

BTec 015/2024

BOLETIM TÉCNICO

APLICAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM PERÍCIAS DE ENGENHARIA

Autores:

Emerson Meireles de Carvalho

Luana de Jesus Souza

INTRODUÇÃO

O IBAPE – Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia, Entidade Federativa Nacional, instituição sem fins lucrativos, congrega entidades atuantes nas áreas de Engenharia de Avaliações e Perícias de Engenharia em diversas Unidades da Federação. Dentre seus objetivos destacam-se ações visando o aprimoramento, divulgação e transmissão do conhecimento técnico.

É filiado às mais importantes entidades internacionais dedicadas ao segmento de avaliações: UPAV¹ – União Pan-americana de Associações de Avaliação e o IVSC Conselho². Internacional de Normas de Avaliação, organismos voltados para a difusão do conhecimento técnico e normalização nos âmbitos continental e global.

Os BTec - Boletins Técnicos têm por finalidade apresentar temas de alta relevância para as Avaliações e Perícias de Engenharia, sempre elaborados por autores que são referências nos assuntos.

Os boletins representam, portanto, a visão dos autores sobre o assunto, não se constituindo como um Estudo ou uma norma do IBAPE.

¹ Unión Panamericana de Asociaciones de Valuación.

² International Valuation Standards Council.

APLICAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM PERÍCIAS DE ENGENHARIA

Emerson Meireles de Carvalho

Luana de Jesus Souza

1 INTRODUÇÃO

Os Ensaio Não Destrutivos (ENDs) configuram-se como métodos investigativos que possibilitam a avaliação do desempenho estrutural sem comprometer a integridade dos elementos analisados; em alguns casos, podem ocasionar fraturas facilmente reparáveis (Machado; Shehata; Shehata, 2009).

No âmbito da engenharia civil, os ENDs destacam-se por sua ampla aplicabilidade, consolidando-se como instrumentos de avaliação da integridade e durabilidade do concreto armado, sem comprometer a estrutura.

Além de auxiliar no diagnóstico da durabilidade e homogeneidade do concreto, esses métodos fornecem valiosos insumos para o mapeamento de aspectos subsuperficiais, tornando-se aliados nos processos de tomada de decisão, com o benefício adicional de apresentarem custos relativamente baixos.

Em que pese a consolidação atual, em 1989 a *International Federation for Structural Concrete* (CEB-FIP) já recomendava o uso de técnicas não destrutivas em inspeções, especialmente para a identificação de corrosão oculta em armaduras de concreto (CEB, 1989).

Atualmente, os ENDs mais usuais em perícias de engenharia civil incluem: termografia, pacometria (detecção das armaduras), esclerometria, ultrassom ou medição da velocidade do pulso ultrassônico, profundidade da frente de carbonatação, profundidade da frente de penetração de cloretos, resistividade elétrica superficial do concreto e avaliação do potencial de corrosão das armaduras.

Isso posto, alinhado aos objetivos do Instituto Brasileiro de Perícias e Avaliações de Engenharia (IBAPE), este boletim visa disseminar as técnicas mais usuais relativas aos Ensaio Não Destrutivos em perícias de engenharia, promovendo o contínuo aperfeiçoamento das metodologias aplicadas às inspeções e avaliações técnicas do setor.

2 EXECUÇÃO E APLICAÇÕES DOS ENDS

Neste boletim, foram abordados os ensaios voltados à avaliação de concreto armado. Considerando que a termografia possui vasta aplicação e apresenta particularidades que justificariam a elaboração de um boletim técnico específico para o tema, este ensaio não foi abordado neste boletim.

Além dos ensaios previamente mencionados, a boroscopia tem se destacado no âmbito das perícias. Embora não seja classificada como um ensaio, trata-se de um método de inspeção utilizado para acessar áreas de difícil alcance, sendo frequentemente empregada em investigações preventivas e/ou em conjunto com os ENDS. No setor da construção civil, suas principais aplicações incluem inspeções em tubulações, shafts, ambientes confinados, lajes caixão ou em locais onde o acesso direto é considerado inseguro para o operador.

Ademais, destaca-se que cada ensaio abordado neste boletim técnico possui características intrínsecas e requisitos específicos para sua execução. A maioria dos ensaios ainda não dispõe de normatização em âmbito nacional, sendo que alguns são usualmente conduzidos com base em normas internacionais de referência, ao passo que outros se fundamentam em diretrizes e práticas recomendadas pela literatura especializada, como ocorre nos ensaios de resistividade elétrica superficial do concreto e na análise da presença de íons cloreto.

Diante disso, a estruturação deste tópico contempla uma descrição geral de cada ensaio, detalhando sua conformidade com as normas aplicáveis e os requisitos indispensáveis para sua execução conforme os padrões estabelecidos.

Tendo em vista que os cuidados prescritos na padronização e no rigor operacional dos ensaios desempenham papel crucial na fidedignidade dos resultados, e que a maioria desses ensaios gera parâmetros indiretos, os quais, apesar de fornecerem subsídios valiosos para as perícias, demandam uma interpretação criteriosa e conjunta. Assim, para assegurar a plena confiabilidade do diagnóstico, torna-se indispensável a análise integrada e rigorosa dos dados, com especial consideração aos elementos técnicos e metodológicos inerentes à condução dos ensaios apontados a seguir.

2.1 PACOMETRIA (DETECÇÃO DAS ARMADURAS)

A pacometria é o ensaio destinado à identificação da posição, do cobrimento e do diâmetro das armaduras em estruturas de concreto armado.

No mercado há uma variedade de equipamentos com essa finalidade, os quais apresentam diferentes capacidades em termos de profundidade de alcance e precisão na identificação das informações. Esses dispositivos operam com base em distintos princípios ativos, que podem sofrer interferências conforme o estado da peça, especialmente em condições de umidade ou desuniformidade superficial.

Os princípios ativos mais comuns são: indução eletromagnética, correntes elétricas induzidas, propagação de ondas e suscetibilidade magnética. O princípio de propagação de ondas é aplicado principalmente no *Ground Penetrating Radar* (GPR), embora similar à pacometria convencional, este método é mais voltado à detecção de barras e vazios no concreto.

O ensaio de detecção de armaduras, de modo geral, configura-se como uma etapa preliminar para outros ensaios não destrutivos, sendo essencial na determinação do posicionamento das armaduras e do cobrimento, bem como é amplamente empregado em levantamentos cadastrais de estruturas, na ausência de registros documentais, ou como verificação da execução em conformidade com o projeto e com as normas de concreto armado vigentes à época de sua concepção.

A finalidade precípua do cobrimento nas estruturas de concreto armado é fornecer proteção física e química às armaduras de aço. A insuficiência de cobrimento expõe as armaduras à ação de agentes presentes no ambiente, favorecendo reações químicas que comprometem a durabilidade da estrutura.

Nesse contexto, a pacometria oferece dados essenciais para a avaliação da vida útil do concreto, permitindo a comparação dos valores de cobrimento com as normas vigentes, as quais correlacionam a classe de agressividade ambiental à espessura adequada de cobrimento. O ensaio também auxilia na verificação da conformidade da estrutura em relação à carga suportada.

No Brasil, não há uma norma técnica específica para a pacometria, sendo adotada principalmente a norma internacional “BS 1881 204:1988 (R2014) – *Testing Concrete: Recommendations on the use of electromagnetic covermeters*”.

Os requisitos para a realização da pacometria incluem a remoção do revestimento seguido da regularização superficial da peça, de modo a permitir o contato direto com o concreto. A estrutura deve estar seca para evitar interferências nas leituras do equipamento. Além disso, é imprescindível que o controle dos dados coletados seja realizado em estrita conformidade com o manual do fabricante, uma vez que as informações obtidas variam conforme as limitações e especificações de cada equipamento.

2.2 ESCLEROMETRIA

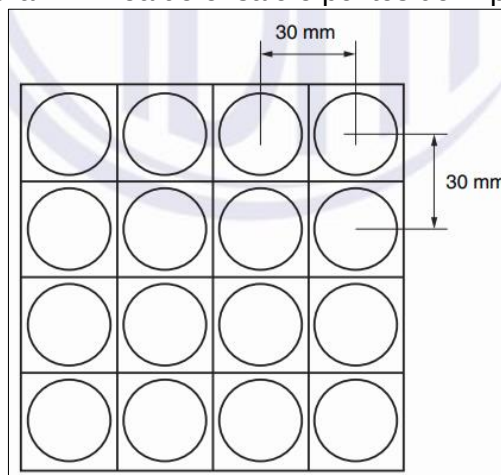
A esclerometria constitui um ensaio complementar amplamente empregado na avaliação da dureza e da homogeneidade superficial do concreto endurecido.

O princípio fundamental que rege este ensaio está baseado na conservação da energia. O equipamento utilizado, denominado esclerômetro, é dotado de um martelo que, ao impactar a superfície do concreto, experimenta uma retração que provoca uma deformação (rebote). Essa deformação, resultante da energia do impacto, possui uma relação inversamente proporcional à dureza do concreto.

Este ensaio é normatizado no Brasil pela “ABNT NBR 7584:2012 – Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio”. De acordo com as disposições normativas, a superfície de ensaio deve estar seca, homogênea, limpa e plana.

Conforme estabelecido pela ABNT NBR 7584:2012, a área a ser ensaiada deve estar afastada pelo menos 50 mm dos cantos dos elementos estruturais, abrangendo uma superfície de ensaio entre 8.000 mm² (aproximadamente 90 mm x 90 mm) e 40.000 mm² (200 mm x 200 mm). Devem ser realizados 16 pontos de impacto, distribuídos de maneira equidistante, com uma distância mínima de 30 mm entre os centros dos pontos, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Área de ensaio e pontos de impacto.



Fonte: ABNT NBR 7584 (2012).

É recomendado que a espessura mínima do concreto seja de 10 cm, uma vez que espessuras inferiores podem provocar interferências devido a fenômenos de ressonância, vibração e dissipação de energia, comprometendo os resultados obtidos.

A ABNT NBR 7584:2012 estabelece que a média aritmética dos 16 valores individuais dos índices esclerométricos de uma mesma área de ensaio deve ser calculada, desconsiderando-se quaisquer índices que se afastem em mais de 10% do valor médio obtido, seguido do cálculo de uma nova média aritmética corrigida.

Ademais, o índice esclerométrico médio final deve ser obtido a partir de um mínimo de cinco valores individuais; na impossibilidade de alcançar esse número, o ensaio esclerométrico daquela área deverá ser desconsiderado.

Determinados aspectos inerentes ao equipamento utilizado podem permitir a correção da média conforme prescrito pela norma, além de abranger outras particularidades associadas aos instrumentos disponíveis no mercado que otimizam a execução dos ensaios quando adequadamente manipulados.

A esclerometria, embora mensure a dureza superficial do concreto, não oferece uma correlação direta com sua resistência à compressão. Importa salientar que este ensaio é sensível aos efeitos da carbonatação, a qual pode aumentar a dureza superficial do material. Esse fenômeno ocorre em virtude da formação de produtos carbonatados, resultando em valores esclerométricos superiores aos esperados.

2.3 ULTRASSOM OU MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO

Este ensaio possui como principais aplicações na construção civil a verificação da homogeneidade do concreto, o monitoramento da variação das propriedades do concreto ao longo do tempo, a detecção de falhas de concretagem, bem como a identificação de vazios, imperfeições e a medição da extensão ou profundidade de fissuras.

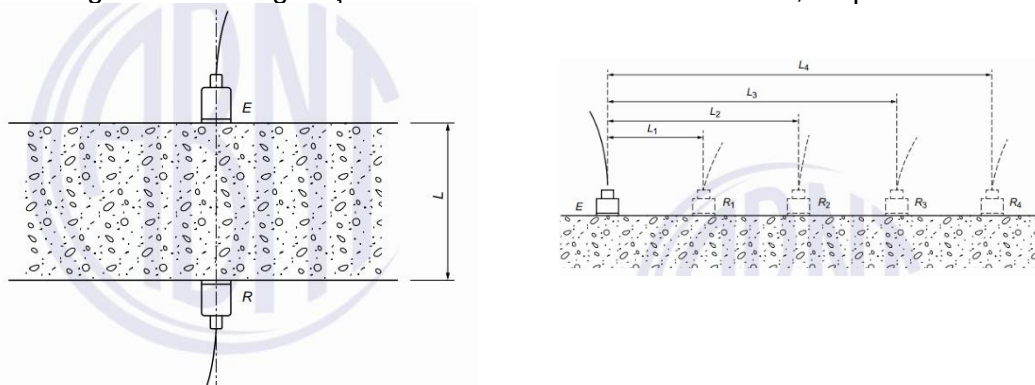
O método de medição da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) fundamenta-se em uma avaliação qualitativa do concreto, realizada por meio da determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais. Esta velocidade varia em função da homogeneidade do material, da quantidade de poros presentes e da ocorrência de vazios.

O princípio deste ensaio reside na relação entre o comprimento percorrido entre os transdutores (emissor e receptor) e o tempo de propagação da onda, resultando em uma velocidade média calculada.

O ensaio pode ser realizado em três configurações distintas. Conforme estabelecido pela norma “ABNT NBR 8802:2019 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica”, a transmissão direta é o método mais recomendado para a determinação da velocidade de propagação de ondas, sendo que os valores obtidos geralmente representam velocidades mais elevadas.

Já os métodos de transmissão indireta e semidireta devem ser empregados quando o acesso ao elemento em análise é restrito a apenas uma face ou a duas faces, respectivamente. A seguir, são apresentados os arranjos correspondentes aos métodos direto e indireto, que são os mais usuais.

Figura 2 – Configuração da transmissão direta e indireta, respectivamente.



Fonte: ABNT NBR 8802 (2019).

Diversos estudos apontam uma relação de influência entre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e diversos fatores, tais como: condições da superfície do concreto, tipo e quantidade de agregado graúdo, exposição a temperaturas extremas, teor de umidade do concreto e presença de armaduras. É importante destacar que a velocidade de propagação das ondas é maior no aço em comparação ao concreto e diminui à medida que aumenta a quantidade de poros ou vazios no concreto.

Diante dessas considerações, recomenda-se que, previamente ao ensaio, seja realizada a pacometria no elemento a ser ensaiado. Além disso, é imprescindível que a peça seja preparada de modo a estar devidamente regularizada, garantindo o acoplamento adequado dos transdutores, bem como assegurar que o concreto esteja seco e que permaneça em condições ambientais favoráveis.

Na literatura, encontra-se a classificação da qualidade do concreto com base na Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) para o método de ensaio por transmissão direta, conforme apresentado a seguir.

Quadro 1 – Classificação da qualidade do concreto em função da 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

O aço presente no concreto, intrinsecamente instável em ambientes expostos, tende a oxidar formando óxido de ferro (Fe_2O_3). Entretanto, o concreto, devido à sua alcalinidade, protege o aço ao promover a formação de uma camada passivadora de

hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$). Essa passivação é mantida pela presença de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na matriz cimentícia (Helene, 1993).

O processo de carbonatação tem início quando o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar reage com o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio e diminuindo o pH do concreto. Quando o pH atinge valores abaixo de 8,3, a camada passivadora começa a ser neutralizada, expondo o aço à corrosão. Esse processo é impulsionado por diferenças de potencial elétrico, resultando na formação de produtos de corrosão, como óxidos de ferro, cujo volume pode ser de 3 a 10 vezes maior que o volume original do aço, causando fissuração e deterioração do concreto (Carvalho, 2014).

Para avaliar a profundidade da frente de carbonatação, é recomendado o método colorimétrico com aplicação de fenolftaleína sobre a área recém fraturada da peça, conforme estabelecido pela norma “*DIN EN 14630 (2007)*”. A fenolftaleína torna-se rosa ou vermelho-carmim em pH acima de 8,3, indicando áreas não carbonatadas, e permanece incolor em pH abaixo de 8,3, revelando zonas carbonatadas. O pH do concreto fresco, que geralmente varia entre 12,5 e 14, é suficiente para assegurar a formação de uma camada passivadora que protege a armadura contra a corrosão (Moraes, 2012).

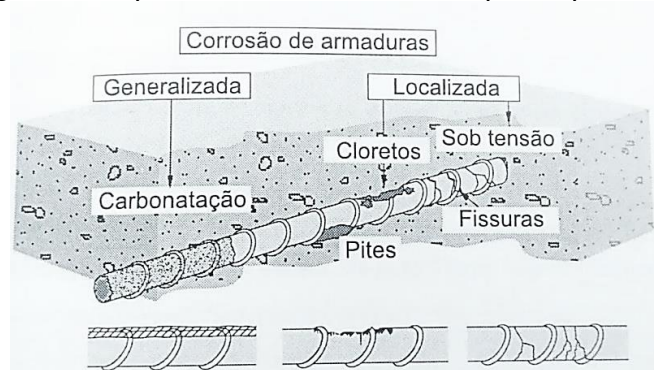
Recomenda-se que a medição da frente de carbonatação seja conduzida com instrumentos de alta precisão, como o paquímetro. Contudo, é necessário destacar que essa mensuração pode ser dificultada pela imprecisão na identificação exata do ponto de viragem da coloração de referência, além da irregularidade dessa transição ao longo da superfície da fratura.

A fratura, por sua vez, deve ser recente para evitar a exposição da área de ensaio a condições ambientais, o que poderia modificar a profundidade da frente de carbonatação à medida que a fratura permanece "em aberto". Diante dessas dificuldades, torna-se crucial fomentar o contínuo aperfeiçoamento da expertise técnica, a fim de minimizar tanto os erros na condução do ensaio quanto as possíveis falhas na interpretação dos resultados.

2.5 PROFUNDIDADE DA FRENTE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Os principais mecanismos de degradação do concreto associados à corrosão das armaduras englobam a carbonatação, descrita anteriormente, e a penetração de íons cloreto (Figura 3).

Figura 3 – Tipos de corrosão e fatores que os provocam.



Fonte: Cascudo (1997).

Ambos os processos comprometem a integridade da camada passivadora do aço, sendo a carbonatação responsável pela corrosão generalizada, enquanto a penetração de cloretos induz a formação de pequenas zonas anódicas na superfície do aço, caracterizando áreas propensas à corrosão localizada, conhecida como pites (Helene, 1993; Moreira, 2006; França, 2011).

A avaliação da presença de íons cloreto no concreto é comumente realizada por meio de métodos colorimétricos, destacando-se a utilização da solução de nitrato de prata (AgNO_3). Para a realização desse ensaio, não há normatização vigente; contudo, menciona-se que esse método teve origem na Itália e era regido pela norma “UNI. *Italian Standard 7928: Determination of Chloride Ion Penetration*”, atualmente suspensa e sem substituição.

O procedimento consiste na aspersão de uma solução de nitrato de prata sobre uma área fraturada do concreto, levando à formação de um precipitado branco (cloreto de prata) em locais onde cloretos livres estão presentes, enquanto a ausência de cloretos ou a presença de cloretos combinados resulta na formação de um precipitado marrom (óxido de prata) (Baroghel-Bouny et al., 2007; Medeiros et al., 2009; Medeiros et al., 2018).

Os mesmos cuidados previamente indicados para o ensaio de carbonatação devem ser rigorosamente observados no ensaio de presença de cloretos, especialmente no que tange à realização de fraturas recentes e à expertise na interpretação do precipitado branco.

Essa interpretação assume especial relevância quando o concreto endurecido apresenta uma coloração mais clara. Para otimizar a identificação do precipitado branco, que constitui a referência deste ensaio, recomenda-se como boa prática o emprego de uma lanterna de luz UV, associada ao paquímetro. Este tipo de iluminação favorece a visualização da coloração branca, fundamental para a avaliação precisa dos resultados.

2.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO

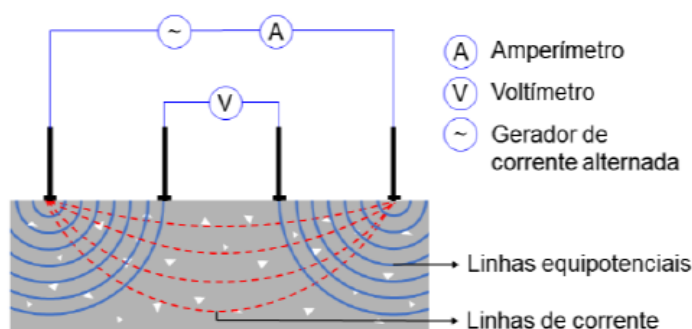
A resistividade elétrica, por definição, refere-se à resistência intrínseca de um material ao fluxo de corrente elétrica, sendo inversamente relacionada à condutividade (Halliday; Resnick, 1994).

Em materiais porosos, como o concreto, estabelece-se uma relação direta entre a resistividade elétrica e a difusividade iônica. Este parâmetro está intimamente vinculado à velocidade dos processos de corrosão das armaduras, em decorrência da resistência do concreto à penetração de agentes agressivos, tais como dióxido de carbono e íons cloreto, que são agentes da corrosão das armaduras, conforme previamente mencionado (Andrade; D'Andrea, 2011).

A técnica preponderantemente empregada para a determinação da resistividade superficial do concreto é o método dos quatro eletrodos, também conhecido como método de Wenner (Andrade; D'Andrea, 2011).

Neste método, os eletrodos são dispostos na superfície do concreto, utilizando-se esponjas de alta condutividade que devem ser mantidas em estado úmido. A ilustração a seguir, adaptada por Millard (1991), exemplifica o procedimento.

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



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

Em consonância com o exposto, a literatura indica que a resistividade elétrica aumenta proporcionalmente à diminuição da porosidade do concreto. O fenômeno da carbonatação resulta na formação de carbonato de cálcio nos poros, conforme citado anteriormente, contribuindo para o endurecimento da superfície do concreto e, em consequência, para o aumento da resistividade elétrica superficial.

No que tange à normatização, atualmente não existe uma norma brasileira específica para o ensaio de resistividade superficial do concreto. Entretanto, a ABNT NBR 9204 (2012), que aborda a determinação da resistividade elétrico-volumétrica, oferece diretrizes para a avaliação das camadas internas do concreto.

Para a classificação do risco de corrosão das armaduras em relação à resistividade elétrica superficial do concreto, são frequentemente adotados os limites estipulados no Boletim 192 do Comitê Euro-Internacional de Cimento e Betão (CEB, 1989), conforme detalhado no Quadro 2.

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).

É imperativo ressaltar que, para a realização do ensaio, além do equipamento configurado de acordo com o método mencionado, é fundamental considerar a condição da peça em análise.

Nesse contexto, a peça ensaiada deve estar em estado saturado, e o ensaio deve ser realizado em regiões íntegras. Além disso, deve-se evitar a presença de armaduras e áreas suscetíveis a temperaturas extremas ou à carbonatação. Essas medidas visam assegurar a precisão das medições de resistividade em relação à condição do concreto, minimizando interferências.

2.7 POTENCIAL DE CORROSÃO DAS ARMADURAS

O ensaio de potencial de corrosão é empregado para avaliar a probabilidade de ocorrência de corrosão nas armaduras imersas no concreto. Este procedimento consiste na medição da diferença de potencial elétrico entre um eletrodo de referência e o aço imerso na peça estrutural (Medeiros et al., 2021).

O princípio subjacente a este ensaio fundamenta-se na diferença de potencial gerada pelo fluxo de corrente, o qual ocorre por meio da migração de íons no concreto entre os sítios anódicos e catódicos, associado a um campo de potencial elétrico ao redor da barra de aço corroída.

Dessa forma, a relação entre os resultados do ensaio de potencial de corrosão e a resistividade elétrica tende a ser inversamente proporcional. Tal relação se deve ao fato de que a resistividade elétrica controla a migração de íons através do concreto sob a influência do campo de potencial que abrange os ânodos e cátodos. Assim, uma diferença de potencial mais negativa indica um fluxo de corrente mais intenso e uma resistividade elétrica reduzida.

A literatura especializada recomenda a realização desse ensaio para o acompanhamento do desempenho de uma estrutura ao longo de sua vida útil, uma vez que a diferença de potencial pode variar com o tempo.

A norma internacional “ASTM C 876, intitulada *Standard Test for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*”, é referência para este método.

Para que os resultados obtidos sejam considerados válidos, é imprescindível que o concreto esteja saturado. Para verificar o grau ideal de saturação, recomenda-se a realização de leituras sucessivas à medida que a peça é saturada, até que a leitura do resultado apresente um valor estável.

Esta premissa é de suma importância, uma vez que a solução aquosa contida nos poros do concreto atua como um eletrólito, promovendo a transferência de potencial elétrico da armadura de um ponto a outro da peça, ao mesmo tempo em que exclui a influência de descontinuidades provocadas por variações de porosidade. Tais descontinuidades podem ocultar os resultados, omitindo os indícios das condições reais de atividade corrosiva.

O equipamento utilizado no ensaio de potencial de corrosão é composto por um voltímetro de alta impedância, que é capaz de registrar as medidas de diferença de potencial, um eletrodo de referência, comumente o de sulfato de cobre-cobre, além de uma esponja de alta condutividade. Para essa configuração de ensaio, a norma 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 RELEVÂNCIA E ANÁLISE DOS ENDS NAS PERÍCIAS

Considerando o envelhecimento das edificações e o consequente aumento na demanda por perícias, bem como a importância da segurança das estruturas de concreto armado e o impacto adverso que a corrosão das armaduras pode exercer sobre a integridade desses elementos, os Ensaio Não Destrutivos (ENDs) tornaram-se imprescindíveis para a avaliação da integridade estrutural de edificações e infraestruturas. Esses métodos fornecem informações cruciais para a fundamentação das decisões no âmbito das perícias de engenharia.

Os ENDs permitem a detecção de problemas ocultos, oferecendo uma abordagem segura que evita danos adicionais às estruturas durante a avaliação. Ademais, apresentam um custo relativamente baixo, especialmente quando comparados às despesas decorrentes de soluções genéricas que adotam um amplo fator de segurança na ausência de informações concretas.

Em suma, os dados obtidos por meio dos ENDs impactam toda a cadeia de processos, desde o diagnóstico inicial, passando pela proposição de soluções e a tomada de decisões, até os custos de recuperação.

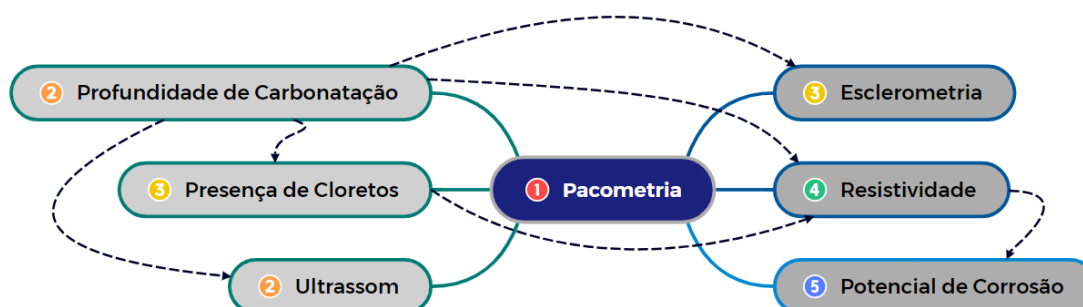
Esses dados são essenciais para diagnosticar o estado de conservação das edificações e para o planejamento de intervenções necessárias, tanto na manutenção preventiva quanto na corretiva. Além disso, a utilização de ENDs agrega valor aos serviços de perícia, evidenciando a seriedade e a eficiência do trabalho realizado.

É importante ressaltar que a maioria dos ensaios proporciona resultados indiretos, o que exige que os profissionais envolvidos estejam cientes dos principais fatores que podem interferir na interpretação dos resultados obtidos. Além disso, é fundamental que esses profissionais possuam a capacidade técnica necessária para realizar uma avaliação conjunta, visando aumentar a confiabilidade do diagnóstico.

Nesse contexto, é altamente recomendável a manutenção de um banco de dados que reúna informações históricas e parâmetros de referência para situações adversas. Tal banco de dados pode contribuir significativamente para a identificação de padrões e tendências, facilitando a interpretação dos dados analisados. O desenvolvimento contínuo de expertise é essencial para assegurar a precisão e a eficácia nas avaliações realizadas.

Isso posto, destacam-se alguns parâmetros essenciais na análise conjunta dos dados fornecidos pelos ENDs, sendo importante ressaltar que a sequência de execução dos ensaios pode influenciar a interpretação dos resultados, assim como a avaliação da interferência entre os ensaios realizados. Desse modo, sugere-se o sequenciamento ilustrado a seguir:

Figura 5 – Esquema ilustrativo da sequência e correlação entre os ensaios.



Fonte: Adaptado de Carvalho, Souza e Cruz (2023).

Na figura apresentada, verifica-se a representação da sequência e da correlação entre os ensaios. Os números contidos nos círculos indicam a ordem sugerida, enquanto as linhas e setas correspondem às correlações, conforme descrito a seguir:

- [1] Pacometria: Este ensaio deve ser obrigatoriamente o preliminar, pois fornece informações essenciais para a execução dos demais ensaios. É fundamental que a peça esteja seca e regularizada antes dessa etapa.
- [2] Profundidade da frente de carbonatação e ultrassom: A execução desses ensaios depende exclusivamente do ensaio de pacometria, sendo recomendável que sejam realizados após a detecção da armadura.
- [3] Esclerometria e presença de cloretos: Esses ensaios estão interligados à detecção da armadura e aos resultados da profundidade de carbonatação. Portanto, sua execução deve ocorrer após a verificação das áreas carbonatadas.
- [4] Resistividade elétrica: Este ensaio está relacionado à detecção da armadura. Para sua execução, é imprescindível que o elemento estrutural esteja em condição saturada, de modo que todos os ensaios precedentes a esta etapa devem ter sido concluídos.
- [5] Potencial de corrosão: Embora não seja obrigatório que este ensaio seja precedido pelo de resistividade elétrica, essa sequência é conveniente para registrar a maior probabilidade de atividade de corrosão. Assim como no último ensaio, a peça também deve estar saturada.

A análise da correlação entre os ensaios, conforme ilustrado pelas setas na Figura 5, evidencia que, excetuando-se a pacometria — que se configura como uma condição preparatória para os ensaios subsequentes — o ensaio de carbonatação exerce a maior interferência nas avaliações.

Tal fenômeno se deve ao fato de que, à medida que a carbonatação avança, ocorre a reação do dióxido de carbono (CO_2) com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse processo preenche os poros do concreto e gera novos compostos sólidos, o que pode, em alguns casos, aumentar a velocidade de propagação das ondas. Além disso, a presença de produtos

carbonatados pode levar a um aumento na dureza superficial do concreto, impactando diretamente os resultados obtidos pela esclerometria.

No que tange à interação entre a carbonatação e o ensaio de presença de cloretos, Medeiros et al. (2018) observaram que, na presença de carbonatos, o nitrato de prata — composto utilizado para a detecção de cloretos — forma um precipitado branco (o parâmetro de medição), o que pode induzir a um “falso positivo” nos resultados do ensaio.

Outrossim, a carbonatação do concreto tende a resultar em um aumento da resistividade elétrica. Esse fenômeno ocorre em virtude da reação do dióxido de carbono (CO_2) com a pasta de cimento, que gera carbonato de cálcio, substância cuja condutividade é inferior à da pasta de cimento original. Consequentemente, a carbonatação provoca a diminuição da concentração de íons nos poros saturados, culminando em um aumento da resistividade elétrica do concreto.

Em contrapartida, a presença de íons cloreto no concreto reduz sua resistividade elétrica. Os cloretos, ao atuarem como eletrólitos, facilitam a condução da corrente elétrica, elevando assim a probabilidade de corrosão das armaduras.

A realização do ensaio de potencial de corrosão após o ensaio de resistividade é tecnicamente justificada quando se visa uma análise sob a pior condição de corrosão. Nesse sentido, recomenda-se aplicar o ensaio de potencial nas regiões em que a resistividade elétrica apresentou os menores valores, uma vez que essas áreas são mais propensas ao desenvolvimento de processos corrosivos. Nessas zonas, é provável que os resultados de potencial sejam mais elevados, isto é, mais negativos, o que caracteriza uma condição mais crítica de corrosão no elemento estrutural.

Além das correlações mencionadas, que devem ser cuidadosamente consideradas na interpretação dos resultados, é imprescindível considerar uma variedade de fatores associados ao concreto analisado.

Isso abrange o tipo e o teor de cimento, a natureza e dimensão do agregado empregado, a idade do concreto, o controle tecnológico vigente à época da construção, o método construtivo, a agressividade ambiental, a concentração da

armadura, a exposição da estrutura, umidade, temperatura, o estado limite de serviço (ELS) e o posicionamento geográfico da estrutura, entre outros aspectos.

Diante dessa complexidade, a manutenção de um banco de dados torna-se essencial. Ademais, o conhecimento adequado acerca do equipamento, de seus princípios e funcionalidades, bem como a indicação de uso, calibração e manutenção e o contínuo aperfeiçoamento técnico, são igualmente cruciais.

Os Ensaios Não Destrutivos (ENDs) proporcionam subsídios valiosos para as perícias, porém é importante ressaltar que os dados obtidos são indiretos e demandam uma interpretação conjunta e criteriosa dos resultados para garantir a confiabilidade do diagnóstico.

4 COMBINAÇÃO DE ENSAIOS (SONREB)

A correlação entre ensaios que fornecem dados indiretos propiciou o desenvolvimento de métodos combinados, cuja finalidade é aprimorar a precisão dos resultados obtidos. A premissa fundamental é que o resultado de um segundo ensaio pode corrigir a influência de fatores não controlados no resultado do primeiro ou corroborar um valor mais representativo para a análise direta (Evangelista, 2002; Breyse, 2012).

Dentre as diversas combinações possíveis, destaca-se o método SONREB, uma abreviação que remete à utilização da ultrassom e ao número de rebote (esclerometria). Na literatura, encontram-se numerosos estudos que correlacionam, por meio de regressões, os resultados dos ensaios de ultrassom e esclerometria para estimar a resistência do concreto (f_c). Um dos modelos mais amplamente reconhecidos neste contexto é o de Breyse¹, que é expresso pela equação:

$$f_{cest} = 1,15 \times 10^{-10} \times VPU^{2,60} \times IE^{1,30}$$

Onde VPU representa a velocidade do pulso ultrassônico obtida no ensaio, IE é o índice esclerométrico, e f_{cest} corresponde à resistência do concreto estimada.

Alguns equipamentos fornecem estimativas de resistência do concreto com base no índice esclerométrico, obtido por meio de modelos matemáticos integrados nos dispositivos. Contudo, é importante ressaltar que esses modelos foram desenvolvidos

¹ D. Breyse, "Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods," Constr Build Mater, vol. 33, pp. 139–163, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103.

para tipos específicos de concreto, os quais muitas vezes não correspondem ao concreto analisado.

A experiência prática demonstrou que, de modo geral, os valores fornecidos pelos equipamentos nos ensaios de dureza superficial do concreto frequentemente resultam em superestimções em comparação aos valores reais de resistência do concreto. Essa discrepância pode ser atribuída a uma variedade de fatores que influenciam os resultados dos ensaios realizados em campo, como as condições climáticas, o estado superficial das peças, a presença de diferentes tipos de agregados e, como já mencionado, o efeito da carbonatação.

Isso posto, o método combinado denominado SONREB é fundamentado na premissa de que os fatores que influenciam os ensaios correlacionados tendem a gerar um equilíbrio na avaliação da resistência à compressão estimada por meio da combinação dos resultados obtidos (Breyse, 2012).

Este método é recomendado pela fabricante Proceq¹ como uma alternativa viável para a avaliação da resistência do concreto, com base nos resultados obtidos de seus equipamentos de esclerometria e ultrassonografia.

A fabricante disponibiliza um manual e uma planilha eletrônica para a criação de um modelo de regressão, permitindo a inserção de dados e a obtenção automática de resultados relacionados à resistência à compressão do concreto (f_c).

Assim, uma abordagem mais precisa para estimar a resistência à compressão do concreto é utilizar um banco de dados real. Esse banco deve incluir informações sobre o índice esclerométrico, a velocidade do pulso ultrassônico (VPU) e a resistência do concreto, sendo esta última obtida a partir de amostras reduzidas (ensaio destrutivo) em comparação com os outros dois parâmetros.

A método SONREB se apresenta como uma ferramenta útil para estimar a resistência à compressão do concreto de forma não destrutiva, além de contribuir para a redução do número de ensaios destrutivos em uma estrutura.

¹ Disponível em: <https://www.screeningeagle.com/pt/products/pundit-200>

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de todo o exposto, apresenta-se a seguir a síntese das informações referentes à execução e às aplicações dos ENDS discutidos.

Quadro 4 – Condensação das informações

ENDS	Normatização	Parâmetro de análise	Objetivo
Detecção da armadura	BS 1881 204:1988 (R2014)	Cobrimento, bitola e posição do aço	Verificar a proteção química e física da armadura e fornecer dados preliminares para os demais ensaios
Esclerometria	ABNT NBR 7584:2012	Método comparativo, série histórica e correlações	Verificar homogeneidade do concreto e complementar análises conjuntas
Ultrassom	ABNT NBR 8802:2019	Análise qualitativa do concreto e correlações	Verificar homogeneidade, detectar falhas e vazios no concreto
Carbonatação	DIN EN 14630 (2007)	Alcalinidade do concreto e constatação de prováveis áreas carbonatadas	Verificar a redução da alcalinidade do concreto ou a probabilidade de despassivação
Presença de cloretos	-	Profundidade da penetração de íons cloreto no concreto	Verificar a possibilidade de despassivação da armadura por reações eletroquímicas
Resistividade	-	Risco de penetração de agentes agressivos de acordo com a resistividade mensurada no concreto	Verificar o risco e a velocidade de processos corrosivos nas armaduras, por penetração de agentes agressivos
Potencial de corrosão	ASTM C 876	Probabilidade de atividades de corrosão na armadura de acordo com a diferença de potencial	Verificar a pior probabilidade de que atividades de corrosão já estejam acontecendo na armadura

Fonte: Adaptado de Carvalho, Souza e Cruz (2023).

Ademais, recomenda-se como boas práticas a análise conjunta dos ensaios que envolvem a avaliação de processos corrosivos, com destaque para os ensaios de resistividade elétrica, potencial de corrosão, detecção de cloretos e carbonatação.

No que tange à ausência de parâmetros específicos para a análise da Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU) em ensaios indiretos e semidiretos, recomenda-se a adoção de uma correlação direta entre os dados obtidos por diferentes métodos aplicados (direto com semidireto ou indireto) a um mesmo elemento estrutural, extrapolando tais resultados para elementos nos quais a aplicação do método direto não se mostrou viável.

Nesse sentido, é recomendável a criação de um banco de dados específico para elementos estruturais com composições semelhantes, de modo a permitir uma avaliação mais acurada, conforme indicado no Quadro 1, utilizando valores corrigidos a partir dessas relações comparativas.

REFERÊNCIAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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.

BREYSSE, D. "Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods," Constr Build Mater, vol. 33, pp. 139–163, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. (1988). Recommendations on the use of electromagnetic covermeters. BS 1881: Part 204.

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).

CARVALHO, E. M.; SOUZA, L. de J.; CRUZ, L. L. P. Metodologia para correlação de ensaios não destrutivos aplicada no diagnóstico de um empreendimento da década de 60 In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS, 12., 2023. Anais [...]. São Paulo: IBAPE, 2023. Disponível em: <https://ibape-nacional.com.br/biblioteca/category/xxii-cobreap/>. Acesso em: 23 set. 2024.

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

CEB – Comité Eurointernatíonal de Béton. (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.

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.
- 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 Lamago. 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.
- 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.

**Emerson Meireles de Carvalho**

Engenheiro civil (UFS/1988), Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Especialista em Avaliações e Perícias de Engenharia, em Engenharia Diagnóstica e em Recuperação e Reforço de Estruturas em Concreto Armado. Professor Adjunto 4 do Departamento de Engenharia Civil da UFS e de cursos de especialização. Atua na área de avaliações e perícias judiciais e extrajudiciais, sendo também diretor de M&C Engenharia e membro do IBAPE-SE, do qual foi vice-presidente. É autor de artigos técnicos e científicos, membro de comissões julgadoras de trabalhos científicos e orientador de trabalhos de conclusão de curso de graduação.

**Luana de Jesus Souza**

Especialista em Engenharia Diagnóstica pelo INBEC e graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). Atua na área de perícias desde 2021, colaborando com a M&C Engenharia, e é autora de artigos técnicos e científicos. É membro do IBAPE-SE e da ALCONPAT. Possui experiência em patologia das construções e engenharia diagnóstica, com especial ênfase na análise de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado. Possui forte atuação acadêmica, sendo fundadora da Empresa Júnior de Engenharia Civil da UFS e da Liga Acadêmica de Estruturas da UFS, além de seu engajamento no setor profissional, com foco em avaliações e perícias.