XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8913

Protocolo metodológico para integração multimétodo na avaliação de corrosão de armaduras com ênfase na técnica de GPR

Methodological protocol for multi-method integration in the assessment of reinforcement corrosion with emphasis on the GPR technique

Brunno Dourado Silva
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | brunno.dourado@discente.ufg.br
Andrielli Morais de Oliveira
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | andriellimorais@ufg.br
Oswaldo Cascudo
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | ocascudo@ufg.br

Resumo

Este artigo apresenta o PIMACC, um protocolo metodológico para integração multimétodo na avaliação da corrosão de armaduras em concreto, estruturado em módulos sequenciais com rastreabilidade e critérios explícitos de decisão. O protocolo organiza planejamento, qualificação metrológica, preparação, indução e validação dos estados corrosivos, além da aquisição padronizada por GPR, potencial de corrosão, resistência de polarização, resistividade, inspeção visual e gravimetria. O estudo, conduzido em etapas piloto e principal, evidenciou que a resposta do GPR é não linear e dependente do sistema, exigindo calibração e validação independentes. Como contribuição, o PIMACC estabelece um modelo replicável baseado na convergência de evidências, ampliando a confiabilidade diagnóstica em aplicações laboratoriais e de campo.

Palavras-chave: Corrosão de armaduras. Concreto Armado. GPR. Ensaios não destrutivos. Protocolo metodológico.

Abstract

This study proposes PIMACC, a methodological protocol for multi-method integration in the assessment of reinforcement corrosion in concrete, structured into sequential modules with traceability and explicit decision criteria. The protocol systematizes planning, metrological qualification, specimen preparation, corrosion induction and validation, as well as standardized data acquisition using GPR, corrosion potential, polarization resistance, resistivity, visual inspection and gravimetry. Developed through pilot and main experimental phases, the study shows that the GPR response is nonlinear and system-dependent, which requires independent calibration, validation and interpretation supported by converging evidence. PIMACC contributes a replicable framework for organizing multi-method data and improving diagnostic reliability in laboratory studies and field-oriented inspection programs.

Keywords: Reinforcement corrosion. Reinforced concrete. GPR. Non-destructive testing. Methodological protocol.

Como citar:
DOURADO, B.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. Protocolo metodológico para integração multimétodo na avaliação de corrosão de armaduras com ênfase na técnica de GPR. ENTAC 2026. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21., 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC/UFG, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8913

INTRODUÇÃO

A corrosão de armaduras configura-se como um processo degradativo de elevada complexidade, cuja evolução resulta da interação entre variáveis físico-químicas, ambientais e estruturais. Essa natureza multidimensional inviabiliza abordagens simplificadas baseadas em indicadores únicos, exigindo modelos interpretativos mais abrangentes e metodologicamente controlados. Por essa razão, métodos não destrutivos têm sido progressivamente incorporados à avaliação de estruturas, com destaque para abordagens capazes de combinar rapidez operacional, repetibilidade e menor interferência física do elemento analisado [1][2].

Entre essas técnicas, o radar de penetração (GPR – *Ground Penetrating Radar*) surge como ferramenta promissora por possibilitar leitura indireta das condições internas do concreto a partir da propagação e da reflexão de ondas eletromagnéticas. Entretanto, sua resposta não representa a corrosão de forma direta, mas sim alterações nas propriedades eletromagnéticas, as quais também são influenciadas por cobrimento, umidade, presença de cloretos, produtos de corrosão e a geometria de aquisição. Em consequência, a interpretação do GPR tende a se tornar mais robusta quando deixa de se apoiar em um único parâmetro do sinal e passa a considerar atributos complementares e contexto físico de inspeção [3][4][5][6].

A literatura tem avançado na integração entre GPR e métodos complementares, como potencial de corrosão e técnicas eletroquímicas, ampliando a confiabilidade diagnóstica e reduzindo inferências baseadas em indicadores isolados [7][8][9]. Entretanto, ainda são limitados os protocolos que asseguram rastreabilidade, reprodutibilidade e aplicabilidade prática [10]. Além disso, persistem desafios na interpretação da corrosão por GPR, pois atributos como amplitude, atenuação, tempo de percurso e resposta refletida são influenciados por umidade, cloretos, cobrimento, propriedades dielétricas/condutivas e geometria de aquisição [4][5][6][7].

Diante dessa lacuna, este trabalho propõe sistematização de um protocolo metodológico para integração multimétodo na avaliação da corrosão das armaduras em concreto (PIMACC), não apenas como combinação de métodos, mas como um sistema metodológico formalizado, no qual cada etapa do processo experimental é controlada, validada e integrada de forma hierarquizada. O objetivo não é medir a corrosão por uma técnica específica, mas estruturar um modelo de interpretação capaz de lidar com a complexidade do fenômeno.

MÉTODO

ESCOPO, FINALIDADE E CAMPO DE APLICAÇÃO DO PIMACC

O PIMACC foi desenvolvido com foco em programas experimentais de corrosão acelerada em concreto armado, sendo concebido para garantir padronização metodológica, controle experimental e reprodutibilidade interlaboratorial. Sua estrutura baseia-se em uma organização modular composta por seis etapas

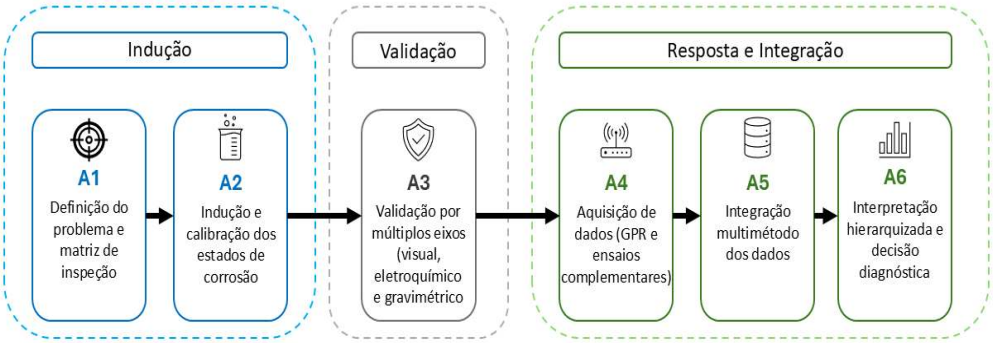
sequenciais e interdependentes, nas quais são definidos: as entradas do sistema; os procedimentos operacionais; os critérios de controle e as saídas analíticas esperadas.

Para garantir coerência interpretativa, o protocolo estabelece três categorias fundamentais de variáveis: as variáveis de indução (tempo, corrente e tensão); as variáveis de validação (potencial de corrosão - E_{corr}, resistência de polarização - R_p e perda de massa) e as variáveis de resposta (dados de GPR e parâmetros derivados).

Essa categorização evita interpretações baseadas apenas em parâmetros operacionais, ao separar o que induz o dano, o que valida o estado corrosivo e o que constitui resposta mensurável do sistema.

A estrutura geral do PIMACC é apresentada na Figura 1, na qual se observa a organização sequencial e hierarquizada dos módulos, bem como a distinção entre variáveis de indução, validação e resposta.

Figura 1: Fluxograma do PIMACC.



Estrutura do Protocolo

Com base nessas premissas, o PIMACC foi organizado em seis módulos sequenciais (Tabela 1). Cada módulo incorpora entradas, procedimentos, critérios de controle e saídas esperadas, permitindo sua aplicação como roteiro estruturado.

Tabela 1: Estrutura do PIMACC em módulos.

Módulo	Título	Objetivo específico
A1	Definição do problema e matriz de inspeção	Delimitar o problema de pesquisa, definir a unidade de análise, estabelecer o papel de cada técnica no estudo e estruturar a matriz inicial de inspeção.
A2	Geração e calibração dos estados de corrosão	Produzir, em condições controladas, diferentes estados de corrosão e calibrar sua correspondência com os níveis de deterioração pretendidos no programa experimental.
A3	Validação primária dos graus de deterioração	Confirmar os estados de corrosão por meio de evidências independentes, com base em inspeção visual, parâmetros eletroquímicos e perda de massa.
A4	Aquisição padronizada do GPR e dos ensaios complementares	Padronizar os procedimentos de aquisição, registro e pré-processamento dos dados de GPR e dos métodos complementares, assegurando repetibilidade e comparabilidade analítica.
A5	Integração analítica e cruzamento de evidências	Relacionar os resultados obtidos pelos diferentes métodos, promovendo o cruzamento sistemático entre indicadores eletromagnéticos, eletroquímicos, gravimétricos e morfológicos.
A6	Interpretação hierarquizada e formulação diagnóstica	Organizar a interpretação final dos resultados em bases hierarquizadas, formulando inferências diagnósticas mais robustas sobre o estado de corrosão avaliado.

Fonte: o autor.

ESTRUTURA MODULAR DO PIMACC

MÓDULO A1

O primeiro módulo estabelece o enquadramento epistemológico e operacional do estudo, sendo responsável por delimitar o escopo da investigação e estruturar a lógica de aquisição e interpretação dos dados.

Diferentemente de abordagens convencionais, este módulo não se limita à definição do objetivo geral, mas exige a explicitação das hipóteses operacionais, das variáveis observáveis e das relações esperadas entre métodos e fenômeno investigado.

A matriz de inspeção é concebida como um instrumento estruturante do protocolo, no qual são definidos: a unidade de análise (corpo de prova e região de leitura); os métodos empregados; o papel analítico de cada técnica e os parâmetros de saídas esperados.

Essa matriz atua como mecanismo de controle metodológico, evitando aquisições desarticuladas e interpretações retrospectivas não rastreáveis. No presente estudo, a matriz foi orientada à avaliação da resposta do GPR frente a estados de corrosão previamente calibrados, sendo obrigatoriamente associada a técnicas de validação independente (potencial de corrosão, resistência de polarização, resistividade elétrica, gravimetria e inspeção visual). Essa associação não é opcional no PIMACC, sendo tratada como requisito metodológico para garantir robustez diagnóstica.

MÓDULO A2

Este módulo corresponde à produção controlada dos estados de deterioração, sendo concebido não apenas como etapa experimental, mas como processo de calibração do sistema físico-químico aço-concreto.

A corrosão foi induzida por eletromigração em solução de NaCl a 5%, sob condições controladas de corrente e tensão, conforme os esquemas eletroquímicos adotados nas etapas piloto e principal (Figura 2). Utilizaram-se corpos de prova de 10 cm × 10 cm × 5 cm e 30 cm × 20 cm × 5 cm, com barras CA-50 de 12,5 mm e cobrimento nominal de 2,5 cm nos ensaios principais. Os tempos foram 6 h, 18 h, 28 h e 48 h, definidos na etapa piloto. Essas variáveis operacionais, contudo, não foram assumidas como equivalentes diretos do grau de corrosão, devido ao comportamento não linear do processo

Figura 2: Esquema de montagem eletroquímica dos corpos de prova piloto (esquerda) e corpos de prova principais (direita).



A etapa piloto assume, portanto, caráter obrigatório e estruturante, sendo responsável por: verificar a estabilidade do sistema eletroquímico; identificar variações de corrente ao longo do ensaio; ajustar parâmetros operacionais e calibrar empiricamente os estados corrosivos.

Durante a execução, observou-se variação significativa da corrente elétrica, evidenciando a evolução da condutividade do sistema. Esse comportamento reforça a necessidade de monitoramento contínuo como critério de controle de ensaio, sendo incorporado ao protocolo como exigência operacional.

Assim, o módulo A2 deixa de ser uma simples etapa de indução e passa a constituir um mecanismo de validação do próprio processo de geração do dano.

MÓDULO A3

O módulo A3 constitui o núcleo de confiabilidade do PIMACC, sendo responsável pela validação independente dos estados de corrosão gerados.

A principal inovação deste módulo é a formalização da validação como requisito obrigatório, estruturada em múltiplos eixos de evidência, eliminando a possibilidade de aceitação de estados corrosivos com base em parâmetros indiretos.

A validação foi organizada em quatro eixos:

a) Inspeção visual e classificação morfológica da barra;
b) Potencial de corrosão (E_{corr}), para inferência termodinâmica da probabilidade de atividade de corrosão;
c) Resistência de polarização (R_p), para estimativa da atividade eletroquímica instantânea; e
d) Perda de massa (dado gravimétrico), como medida acumulada de dano material.

O protocolo estabelece que a classificação do estado de corrosão só é aceita quando há convergência técnica entre os quatro eixos, sendo vedada a utilização de qualquer indicador isolado como critério de validação.

Nesse sentido, adicionalmente são definidos critérios operacionais de decisão:

a) Convergência (estado validado);
b) Divergência parcial (estado incerto, exigindo reavaliação); e
c) Divergência significativa (estado inválido, considerado descartado).

Essa lógica decisória introduz um mecanismo de controle de qualidade de dados, elevando a confiabilidade dos resultados e garantindo rastreabilidade analítica.

Na aplicação, E_{corr}, R_p /I_{corr} e perda de massa foram usados como evidências complementares à inspeção visual. A aceitação de cada estágio exigiu coerência entre esses parâmetros, evitando que o tempo de indução fosse tomado como critério único de severidade.

MÓDULO A4

O quarto módulo estabelece os critérios de padronização da aquisição de dados, sendo responsável por garantir repetibilidade e comparabilidade entre medições.

A aquisição do GPR foi realizada em duas orientações (longitudinal e transversal), conforme previsto no protocolo. A adoção da dupla orientação não é apenas recomendada, mas formalmente estabelecida como requisito metodológico, em função da anisotropia da resposta eletromagnética do sistema aço-concreto.

A aquisição seguiu trajetórias fixas, controle de velocidade, registro de posição/orientação e parâmetros constantes de pré-processamento, conforme o esquema de aquisição por GPR (Figura 3).

Figura 3: Esquema de aquisição de dados por GPR.



Os procedimentos de aquisição incluíram, a definição de trajetórias fixas de varredura, o controle da velocidade de aquisição, o registro da orientação e posição e a padronização dos parâmetros de pré-processamento. A manutenção rigorosa desses parâmetros entre as amostras é tratada como condição indispensável para validade comparativa dos dados.

Os sinais foram processados em ambiente computacional, com extração de atributos quantitativos e análise qualitativa por radargramas. O protocolo estabelece que a extração de atributos deve seguir critérios uniformes e previamente definidos, evitando seleção arbitrária de parâmetros que possam induzir viés interpretativo.

MÓDULO A5

O quinto módulo representa a transição entre aquisição de dados e construção do conhecimento, sendo responsável pela integração sistemática das informações obtidas.

Diferentemente de abordagens convencionais, nas quais os resultados são analisados de forma paralela, o PIMACC estrutura a integração em níveis hierárquicos, estabelecendo uma ordem lógica de interpretação.

A integração foi organizada em três níveis. No nível 1, a validação dos estados de corrosão. No nível 2, a análise dos atributos do GPR em relação aos estados validados. E no nível 3, a incorporação de variáveis explicativas, como resistividade, morfologia e condições do meio.

Essa estrutura impede interpretações diretas do GPR sem validação prévia do estado corrosivo, eliminando um dos principais vieses observados na literatura. O cruzamento de evidências foi conduzido com base em análise de tendência, correlação e coerência física entre parâmetros.

O tratamento estatístico, exploratório, combinou estatística descritivas, tendências e correlações de Pearson e Spearman. A comparação entre coeficientes permitiu distinguir associação linear de tendência ordinal, evitando inferir gradação monotônica entre sinal de GPR e severidade a partir de correlações pontuais.

O protocolo privilegia a consistência entre os indicadores em detrimento de relações matemáticas simplificadas, reconhecendo a natureza complexa do fenômeno estudado.

Para operacionalizar a integração multimétodo proposta no PIMACC, os métodos empregados foram categorizados de acordo com sua função analítica, limitações e contribuição no processo de interpretação, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Papel analítico dos métodos no PIMACC.

Método	Papel	Limitação	Contribuição
GPR	Resposta	Indireto	Identificação
E_{corr}	Validação	Não quantifica	Probabilidade
R_p	Validação	Sensível	Taxa (i_{corr})
Gravimetria	Referência	Destrutivo	Dano real

Fonte: o autor.

MÓDULO A6

O módulo final consolida a lógica interpretativa do protocolo, estabelecendo critérios para formulação do diagnóstico. A principal premissa deste módulo é que o GPR não deve ser interpretado como ferramenta de medição direta da corrosão, mas como sensor de alterações eletromagnéticas associadas ao estado do sistema.

A interpretação segue sequência lógica: confirmação do estado de corrosão (A3), análise da capacidade do GPR em distinguir estados, comparação entre orientações, verificação de coerência com variáveis eletroquímicas e gravimétricas e formulação da inferência diagnóstica.

O protocolo estabelece que nenhuma inferência deve ser realizada com base em um único parâmetro, sendo obrigatória a convergência entre múltiplas evidências. A saída do módulo consiste na classificação do estado avaliado em categorias diagnósticas, acompanhadas de grau de confiabilidade. Essa abordagem substitui modelos determinísticos simplificados por um sistema interpretativo estruturado, mais compatível com a complexidade do fenômeno.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

DESEMPENHO DO PIMACC NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS ESTADOS DE CORROSÃO

A primeira evidência relevante foi o desempenho do protocolo na calibração dos estados de corrosão, demostrando que a relação entre variáveis operacionais e deterioração não é linear nem determinística.

Os tempos de 6 h, 18 h, 28 h e 48 h geraram estados distintos de deterioração. Contudo, a validação independente mostrou que o tempo não equivale diretamente à severidade, pois o sistema é influenciado pela condutividade elétrica e pela redistribuição de íons no meio.

Durante a etapa principal, observou-se aumento espontâneo da corrente elétrica, atingindo valores superiores ao inicialmente estabelecido. Esse fenômeno evidencia a natureza autoajustável do sistema eletroquímico, no qual a progressão da corrosão altera as condições de condução, retroalimentando o processo.

Do ponto de vista metodológico, esse resultado invalida abordagens simplificadas baseadas exclusivamente em parâmetros de indução e confirma a necessidade da validação independente proposta no PIMACC.

A convergência entre inspeção visual, potencial de corrosão, resistência de polarização e perda de massa permitiu consolidar cinco estados de deterioração e os graus A, B, C e D do aço [11]. Como apoio quantitativo, o E_{corr} médio variou de −131,43 mV na referência para valores entre −359,59 mV e −431,22 mV nos tempos induzidos, enquanto a densidade média de corrente foi de 4,68; 10,06; 88,05; 33,87; e 47,51 µA/cm² para 0, 6, 18, 28 e 48 h, respectivamente. Esses resultados indicam ativação eletroquímica, mas foram interpretados em conjunto com a inspeção visual e a perda de massa, conforme sintetizado no Quadro 2.

Quadro 2: Síntese da validação dos estados de corrosão (PIMACC).

Estado de corrosão	Evidência visual	Potencial de corrosão	Resist. de polarização	Perda de massa	Validação
Referência	Ausência de produtos de corrosão	Zona passiva / baixa probabilidade	Condição de referência	Nula	Validado
Pré-oxidação	Início de alteração superficial	Transição para atividade	Atividade inicial	Muito baixa	Validado
Leve	Produtos localizados de corrosão	Zona ativa	Atividade corrosiva detectável	Baixa	Validado
Intermediária	Corrosão visualmente mais desenvolvida	Zona ativa	Atividade corrosiva elevada	Moderada	Validado
Intensa	Corrosão generalizada	Zona ativa	Atividade corrosiva confirmada	Elevada	Validado

Fonte: o autor.

RESPOSTA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL DO GPR E IMPLICAÇÕES PROTOCOLARES

Nas varreduras longitudinal e transversal, a amplitude total do GPR apresentou comportamento não monotônico e não linear em função dos graus de corrosão,

evidenciando sensibilidade às alterações do sistema aço-concreto, porém sem correspondência direta com a severidade do dano.

No sentido longitudinal, observou-se redução da amplitude até o grau B, seguida de recuperação nos graus C e D, com correlação linear negativa relativamente forte em relação ao GECOR (Pearson R = -0,74), mas sem consistência monotônica global (Spearman = -0,10). Em relação à perda de massa, a associação mostrou-se linearmente desprezível (Pearson = 0,15), embora com tendência ordinal moderada (Spearman = 0,60), indicando que a resposta do sinal não acompanha de forma direta o avanço físico da deterioração.

No sentido transversal, a redução foi mais acentuada entre os graus A e C, com recuperação parcial no grau D, porém com correlações fracas com GECOR, perda de massa e grau numérico (Pearson = -0,34, -0,14 e -0,08, respectivamente), evidenciando maior influência de efeitos geométricos, coerência do eco e dispersão da energia refletida.

A divergência entre as orientações confirma o caráter anisotrópico da resposta eletromagnética do sistema, demonstrando que as leituras longitudinal e transversal captam fenômenos distintos e complementares, e não redundantes.

Como implicação metodológica, esses resultados invalidam a utilização da amplitude como indicador linear de severidade e reforçam a necessidade de interpretação baseada em contraste entre estados, análise de tendência e integração multimétodo. Dessa forma, o PIMACC adota a dupla orientação como requisito preferencial de aquisição, não como redundância, mas como estratégia para ampliar a capacidade interpretativa e reduzir incertezas associadas à variabilidade do sinal.

A comparação com a literatura reforça essa interpretação. Estudos sobre amplitude, atenuação e hipérboles indicam sensibilidade do GPR à corrosão, mas também influência das condições do concreto e da aquisição [4][5][6]. Abordagens com potencial de corrosão, imagens e sensores geofísicos mostram maior robustez quando evidências são combinadas [7][8][9]. Assim, este estudo avança ao tratar a integração multimétodo como critério protocolar de validação.

Síntese operacional dos resultados para o PIMACC

A análise integrada dos resultados demonstrou que a avaliação da corrosão não pode ser sustentada por uma única técnica, uma vez que cada método captura dimensões distintas do fenômeno: os ensaios eletroquímicos refletem a atividade corrosiva, a gravimetria representa o dano acumulado e o GPR responde às alterações físicas e eletromagnéticas do sistema.

A convergência entre esses indicadores revelou-se condição necessária para a construção de um diagnóstico confiável, permitindo resolver ambiguidades associadas à interpretação isolada dos dados de GPR.

Nesse contexto, o principal resultado do estudo reside na validação do PIMACC como modelo metodológico estruturado, no qual a calibração experimental, a validação

independente e a integração hierarquizada dos dados constituem etapas indissociáveis do processo analítico.

Os resultados evidenciam que não há relação linear direta entre variáveis operacionais e grau de corrosão. A interpretação do GPR exige contextualização multimétodo e a confiabilidade diagnóstica decorre da convergência de evidências, e não da precisão isolada de um indicador.

CONCLUSÃO

O PIMACC consolida-se como um protocolo metodológico robusto para avaliação da corrosão de armaduras em concreto. Sua principal contribuição não está na aplicação isolada de técnicas, mas na estruturação de um sistema de análise que organiza a complexidade do fenômeno em etapas controladas, validadas e integradas.

Os resultados demonstram que:

- não há relação linear entre parâmetros operacionais e corrosão;
- a validação independente é indispensável;
- a integração de dados aumenta a confiabilidade diagnóstica;
- o GPR deve ser interpretado como parte de um sistema, e não isoladamente.

Ao propor uma abordagem estruturada e replicável, o PIMACC representa um avanço metodológico relevante, com potencial de aplicação tanto em pesquisa quanto em inspeção de estruturas reais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001. O pesquisador Oswaldo Cascudo agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa PQ (Proc. 309876/2022-2).

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1. ed. São Paulo: Editora PINI; Goiânia: Editora UFG, 1997. 237 p.

[2] CASCUDO, O. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de corrosão da armadura. In: ISAIA, G. C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2005. v. 2, p. 1071-1108.

[3] GUIRELI NETTO, L.; LAVANDOSCKI, F. I.; GALLI, V. L.; BRESSAN, D. L. Avaliação do radar GPR para prospecção de armadura em elementos de concreto armado. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE PATOLOGIA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, 15., 2019, Salta, Argentina. Anales… Salta: Universidad Católica de Salta, Eucasa, 2020. v. 1, p. 52-65.

[4] GHANI, A. H. A.; SENIN, S. F.; HAMID, R. Attenuation of Ground Penetrating Radar Signal Amplitude in Monitoring Reinforced Steel Corrosion. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), v. 65, n. 2, p. 1-8, 2013. DOI: 10.11113/jt.v65.2194.

[5] HASAN, M. I.; YAZDANI, N. An experimental study for quantitative estimation of rebar corrosion in concrete using ground penetrating radar. Journal of Engineering, v. 2016, Article ID 8536850, 2016. DOI: 10.1155/2016/8536850.

[6] KARUNANAYAKE, K. T. S.; DISSANAYAKE, P. B. R.; GALAGEDARA, L. W. Ground Penetrating Radar wave behavior under different corrosion levels of concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 2014, Brussels, Belgium. Proceedings… Brussels, 2014. p. 317-322. DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970437.

[7] LAI, W.-L.; KIND, T.; STOPPEL, M.; WIGGENHAUSER, H. Measurement of accelerated steel corrosion in concrete using ground-penetrating radar and a modified half-cell potential method. Journal of Infrastructure Systems, v. 19, n. 2, p. 205-220, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000083.

[8] ABOUHAMAD, M.; DAWOOD, T.; JABRI, A.; ALSHARQAWI, M.; ZAYED, T. Corrosiveness mapping of bridge decks using image-based analysis of GPR data. Automation in Construction, v. 80, p. 104-117, 2017. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.03.004.

[9] FORNASARI, G.; RIZZO, E. A laboratory multisensor geophysical approach for monitoring steel rebar corrosion in concrete structures. Bulletin of Geophysics and Oceanography, v. 65, n. 4, p. 1-15, 2024. DOI: 10.4430/bgo00449.

[10] LEONEL, A. C. A. Estudo das técnicas de tomografia ultrassônica e radar de penetração com contribuição em metodologia de inspeção de obras de concreto. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2022.

[11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8501-1. Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Visual assessment of surface cleanliness — Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings. 2nd ed. Geneva: ISO, 2007.