

Estudo de Viabilidade de Visão Computacional Alinhada à Decodificação de Padrões Corrosivos

Aline Rodrigues Batista*, Diogo da Silva Almeida*, Gabriel Antonio Tavares da Silva*, Maria Eduarda Chidini de Freitas*, Pedro Lucas Cardoso Schizato* and Cristiano Alves Pessoa*

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo,
Guarulhos, São Paulo, Brasil

batista.aline@aluno.ifsp.edu.br, diogo.almeida@aluno.ifsp.edu.br, tavares.s@aluno.ifsp.edu.br,
chidini.freitas@aluno.ifsp.edu.br, pedro.schizato@aluno.ifsp.edu.br, cristianopessoa@ifsp.edu.br

Resumo—This study aims to examine the application of computer vision methodologies in the identification and quantification of corrosion on metallic surfaces, considering its relevance both for diagnostic engineering and for the mitigation of structural risks. The investigation begins with the problematization of corrosion, understood not only as a physicochemical phenomenon but also as an informational process that can be analyzed through algorithms capable of converting visual signals into structured data. Methodologically, a critical review of the literature was conducted in systematic stages, involving the collection, categorization, and comparative analysis of recent scientific publications. The studies considered ranged from classical digital image processing methods to advanced deep learning architectures, including Convolutional Neural Networks (CNNs), *Mask-RCNN*, and *YOLOv8*. The categorization of sources was based on criteria such as the type of data analyzed, performance metrics, application context, and methodological robustness, enabling the mapping of advances, limitations, and research gaps. The results of the review indicate that computer vision offers relevant benefits, such as inspection automation, diagnostic standardization, and early detection of corrosive processes, including in microstructures captured by scanning electron microscopy. However, significant challenges were also identified, including the need for extensive and diverse *datasets*, high computational costs, and the absence of consolidated standards for international validation.

Keywords—computer vision; corrosion; diagnostic engineering; image processing; deep learning.

Resumo—Este estudo tem como propósito examinar a aplicação de metodologias de visão computacional na identificação e quantificação da corrosão em superfícies metálicas, considerando sua relevância tanto para a engenharia diagnóstica quanto para a mitigação de riscos estruturais. A investigação inicia-se pela problematização da corrosão, compreendida não apenas como fenômeno físico-químico, mas como processo informacional suscetível à análise por algoritmos capazes de converter sinais visuais em dados estruturados. Metodologicamente, adotou-se uma revisão crítica da literatura, conduzida em etapas sistemáticas que envolveram levantamento, categorização e análise comparativa de publicações científicas recentes. Foram contemplados estudos que empregaram desde métodos clássicos de processamento digital de imagens até arquiteturas avançadas de aprendizado profundo, incluindo redes neurais convolucionais (CNNs), *Mask-RCNN* e

YOLOv8. A categorização das fontes considerou critérios como tipo de dado analisado, métricas de desempenho, contexto de aplicação e robustez metodológica, permitindo mapear avanços, limitações e lacunas de pesquisa. Os resultados da revisão indicam que a visão computacional oferece benefícios relevantes, como automatização da inspeção, padronização diagnóstica e detecção precoce de processos corrosivos, inclusive em microestruturas captadas por microscopia eletrônica de varredura. Entretanto, também se evidenciaram desafios significativos, entre eles a necessidade de *datasets* extensos e diversificados, o alto custo computacional e a ausência de padrões consolidados para validação internacional.

Palavras-chave—visão computacional; corrosão; engenharia diagnóstica; processamento de imagens; aprendizado profundo.

I. INTRODUÇÃO

A incorporação de tecnologias disruptivas no domínio da engenharia diagnóstica tem se constituído, progressivamente, em vetor paradigmático para a compreensão e mitigação de fenômenos degenerativos em sistemas críticos de infraestrutura. No caso específico da corrosão, observa-se que este fenômeno representa um dos mais relevantes e recorrentes desafios para a engenharia contemporânea, em virtude do impacto direto que exerce sobre a confiabilidade de estruturas essenciais como pontes, oleodutos, reservatórios, aeronaves e equipamentos industriais. Estima-se que os custos globais associados à corrosão atinjam cifras bilionárias anualmente, configurando não apenas perdas econômicas de larga escala, mas também riscos ambientais e sociais de magnitude significativa, cuja mitigação requer soluções inovadoras e interdisciplinares que ultrapassem a abordagem puramente físico-química do problema [1].

Sob uma perspectiva analítica estrita, a corrosão deve ser compreendida como manifestação eletroquímica de degradação localizada, caracterizada por sutilezas morfológicas e químicas que demandam metodologias instrumentais de elevada resolução, como os ensaios eletroquímicos e a microscopia eletrônica de varredura. Entretanto, em sentido mais amplo, o fenômeno não se restringe aos domínios da ciência dos materiais, mas integra-se aos sistemas sociotécnicos, na medida

em que a prevenção de falhas estruturais envolve não apenas práticas laboratoriais de caracterização, mas também políticas de governança, estratégias de sustentabilidade, protocolos de segurança coletiva e racionalização da eficiência operacional [2].

Nesse panorama, a emergência de metodologias oriundas do campo da visão computacional configura-se como ponto de inflexão epistemológico. Ao possibilitar a conversão de imagens de superfícies corroídas em *datasets* digitais, oriundos tanto de experimentação empírica quanto de bases públicas, instaura-se a possibilidade de transitar de diagnósticos essencialmente descritivos para prognósticos fundamentados em inferências estatísticas. Essa transposição do campo visual para o campo informacional permite identificar feições superficiais com elevado grau de precisão e reprodutibilidade, estabelecendo métricas objetivas para quantificação de irregularidades como *pites*, fissuras e degradação de revestimentos [3].

Dessa forma, o problema da corrosão deixa de ser tratado exclusivamente como manifestação físico-química, passando a ser reinterpretado como fenômeno informacional cuja análise depende de estruturas semânticas inscritas em fluxos de dados. Ao permitir a classificação automática de padrões visuais, a visão computacional favorece a padronização de diagnósticos, a integração a sistemas de manutenção preditiva e a construção de modelos previsionais capazes de antecipar a evolução do processo degenerativo [4].

A articulação entre a materialidade da corrosão e a imaterialidade dos algoritmos inaugura um campo de investigação interdisciplinar no qual a engenharia de materiais passa a dialogar de forma direta com a ciência da computação e a ciência de dados. Os efeitos dessa integração ultrapassam a análise laboratorial estrita e alcançam a dimensão social, promovendo maior confiabilidade em sistemas de segurança, mitigação de falhas em infraestruturas críticas, otimização de custos de manutenção e fortalecimento de políticas públicas de monitoramento fundamentadas em evidências tecnológicas.

A presente investigação tem, portanto, como propósito discutir criticamente a aplicação de metodologias de visão computacional na análise de superfícies corroídas, evidenciando não apenas seus avanços e potencialidades, mas também seus desafios. Parte-se do pressuposto de que, ao transformar dados visuais em indicadores quantificáveis, a corrosão deixa de ser percebida como simples processo natural de deterioração e passa a configurar-se como vetor de transformação tecnológica e social, cuja gestão demanda soluções algorítmicas inteligentes e integradas, sintonizadas com as tendências contemporâneas de impacto tecnológico e social.

II. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O objetivo central do presente trabalho consiste em realizar uma investigação aprofundada acerca da aplicação de metodologias de visão computacional para a leitura, interpretação e quantificação de padrões corrosivos em superfícies metálicas, com ênfase na construção, organização e análise de *datasets* visuais derivados de registros experimentais e documentais. Pretende-se, por meio desta abordagem, operar uma transposição epistemológica significativa: a corrosão, usualmente examinada sob a ótica estritamente físico-química, passa a ser reconceptualizada em uma dimensão informacional, na qual os sinais de degradação material se convertem em estruturas de dados passíveis de segmentação, classificação e posterior correlação com parâmetros de confiabilidade estrutural. Essa conversão não apenas modifica o modo como o fenômeno é interpretado, mas também reconfigura os instrumentos disponíveis para sua previsão e mitigação, inserindo-o em uma lógica de monitoramento inteligente, sustentada por algoritmos de interpretação automática.

De maneira mais detalhada, delineiam-se os seguintes objetivos específicos. Primeiramente, avaliar o potencial de algoritmos de detecção de feições visuais na identificação automática de irregularidades superficiais, com destaque para *pites*, fissuras, delaminações e degradação de revestimentos protetivos. Em segundo lugar, estabelecer métricas quantitativas robustas que permitam não apenas estimar a severidade da corrosão, mas também correlacionar graus distintos de degradação com o tempo de exposição, as condições ambientais e a natureza do material. Em terceiro lugar, propor um modelo sistêmico de integração, em que os dados extraídos por meio da visão computacional sejam incorporados a plataformas inteligentes de monitoramento preditivo, ampliando o alcance da manutenção preditiva e consolidando bases empíricas para a formulação de políticas de gestão de ativos.

A justificativa para tal empreendimento científico repousa nas limitações inerentes aos métodos convencionais de inspeção da corrosão. Técnicas consagradas como ensaios eletroquímicos, análise gravimétrica, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, ainda que precisas em sua acuidade experimental, apresentam restrições substanciais no que diz respeito à escalabilidade, ao tempo de resposta e, sobretudo, à capacidade de integração em sistemas de gestão baseados em dados digitais. A inspeção tradicional, por sua natureza laboratorial e, frequentemente, pontual, revela-se incapaz de responder às demandas contemporâneas de monitoramento contínuo, predição automatizada e resposta em tempo real. [1]

Nesse sentido, a visão computacional emerge como alternativa disruptiva e promissora. Ao permitir a automatização da análise visual, torna-se possível ampliar de forma signi-

ficativa a cobertura diagnóstica, reduzindo a dependência de inspeções presenciais demoradas e onerosas. Ao promover a padronização dos diagnósticos, elimina-se a variabilidade associada ao julgamento humano, conferindo maior objetividade e comparabilidade aos resultados obtidos. Ao gerar indicadores quantitativos reproduzíveis em distintos ambientes operacionais, cria-se a possibilidade de desenvolver séries históricas consistentes, aptas a subsidiar modelos preditivos e estratégias de manutenção baseadas em evidências sólidas.

A tradução das manifestações corrosivas em dados digitais constitui, portanto, um marco paradigmático. Essa transposição viabiliza a integração com sistemas de apoio à decisão em tempo real, ampliando as possibilidades de mitigação de riscos estruturais, de otimização da alocação de recursos e de redução substancial dos custos associados à manutenção corretiva. Mais do que uma inovação técnica, trata-se de um movimento de reconfiguração conceitual: a corrosão, antes percebida como um processo natural de deterioração material, passa a ser reconstituída como um fenômeno informacional, dotado de estrutura semântica e passível de manipulação algorítmica.

Sob uma perspectiva sociotécnica mais ampla, a incorporação da visão computacional ao monitoramento da corrosão revela impactos que transcendem a esfera técnica e alcançam dimensões sociais estratégicas. Ao aumentar a confiabilidade de sistemas críticos, promove-se a segurança coletiva em setores sensíveis como transportes, energia, saúde e saneamento. Ao prolongar a vida útil de ativos industriais e infraestruturais, viabiliza-se a racionalização de recursos naturais e financeiros, em consonância com princípios de sustentabilidade. Ao fortalecer políticas públicas fundamentadas em evidências tecnológicas, fomenta-se a criação de diretrizes regulatórias e normativas mais eficazes, capazes de alinhar práticas de inspeção às demandas contemporâneas de resiliência e eficiência operacional.

Assim, a presente investigação justifica-se não apenas como uma contribuição metodológica para o campo da engenharia de materiais e da ciência da computação, mas sobretudo como um esforço interdisciplinar destinado a consolidar um novo paradigma de análise e gestão da corrosão. Nesse paradigma, a sinergia entre materialidade e algoritmos redefine o próprio estatuto epistemológico do fenômeno, inscrevendo-o no horizonte mais amplo das tendências sociais e dos impactos tecnológicos, em que a informação se configura como recurso central para a preservação da integridade estrutural e para a sustentabilidade de sistemas complexos.

III. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A literatura recente evidencia crescente interesse na aplicação de técnicas de visão computacional e aprendizado

profundo para detecção e quantificação da corrosão em materiais metálicos. Tradicionalmente, o estudo da corrosão esteve associado a métodos físico-químicos, como ensaios eletroquímicos e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Contudo, esses métodos apresentam limitações relacionadas à escalabilidade, tempo de resposta e integração a sistemas automatizados de manutenção [1].

Nesse contexto, métodos baseados em análise de imagens digitais emergem como alternativas disruptivas, permitindo identificação de padrões corrosivos de forma automatizada e com elevado grau de reprodutibilidade.

A aplicação da visão computacional na engenharia de materiais fundamenta-se na capacidade de extrair características visuais, como textura, cor, rugosidade e presença de trincas, de superfícies metálicas degradadas. Estudos de Khayatizad, De Pue e De Waele [2] demonstraram que técnicas de processamento de imagens podem detectar e mapear corrosão em estruturas de aço com considerável precisão, utilizando algoritmos de segmentação e análise de contorno. Mesmo sem modelos de aprendizado profundo, esses métodos apresentaram resultados satisfatórios em condições controladas.

Com a incorporação do aprendizado profundo, especialmente de arquiteturas baseadas em redes neurais convolucionais (CNNs), observou-se avanço significativo no desempenho desses sistemas [5]. Ameli, Nesheli e Landis [4] aplicaram *Mask-RCNN* e *YOLOv8* para segmentação de superfícies corroídas em pontes de aço, obtendo métricas superiores a 90% em precisão e Interseção sobre União (IoU). Esses resultados corroboram a tendência apontada por Rajendran e Subbian [3], segundo a qual modelos de *deep learning* têm potencial de se consolidar como padrão na avaliação da corrosão, ainda que enfrentem desafios como treinamento de *datasets*, custo computacional e interpretabilidade dos resultados.

Outro ponto relevante é o uso da MEV como fonte de dados para visão computacional. A MEV revela feições morfológicas em escala micro e nanométrica, produzindo imagens que podem ser exploradas por algoritmos de aprendizado profundo. A integração entre MEV e *deep learning* surge, assim, como linha de investigação promissora, permitindo análise automática de *pites*, trincas e degradações superficiais que seriam difíceis de quantificar por métodos tradicionais [6].

Portanto, o referencial bibliográfico evidencia que a visão computacional, quando aplicada ao monitoramento da corrosão, atua não apenas como ferramenta complementar, mas como vetor de transformação metodológica.

IV. METODOLOGIA

A visão computacional constitui-se como um campo científico de caráter marcadamente interdisciplinar, situado na

interseção entre a ciência da computação, a matemática aplicada, a engenharia elétrica, a física e, em contextos mais recentes, até mesmo a neurociência e a psicologia cognitiva. Seu objetivo central reside na retirada de informações significativas a partir de dados contidos em imagens ou sequências de imagens, em um esforço de traduzir, de forma automatizada, a percepção visual do mundo físico para estruturas digitais que possam ser interpretadas, processadas e utilizadas por sistemas computacionais.

Em linhas gerais, os métodos de visão computacional buscam a automatização de tarefas tradicionalmente realizadas pelo sistema visual humano, tais como a detecção de formas, a identificação de padrões, a segmentação de regiões de interesse, a classificação de objetos e a interpretação de contextos visuais complexos. A diferença fundamental está no fato de que, enquanto a percepção humana opera de maneira intuitiva, adaptativa e fortemente contextualizada, os algoritmos computacionais necessitam traduzir tais percepções em termos matemáticos e estatísticos, exigindo a formulação de modelos rigorosos que permitam a extração objetiva de informações úteis.

Como ilustrado na Figura 1, o processo de aplicação da visão computacional no diagnóstico da corrosão envolve múltiplas etapas, desde a coleta de imagens até a interpretação e integração sociotécnica dos resultados.

Historicamente, o início da aplicação de visão computacional remonta à década de 1960, período em que a disciplina ainda se encontrava em estágio embrionário e os avanços tecnológicos limitavam-se à identificação e à extração de informações geométricas básicas, como linhas, círculos e polígonos simples. Essas primeiras experiências tinham caráter essencialmente experimental e buscavam verificar a possibilidade de reproduzir, em ambiente computacional, habilidades elementares da visão humana. Embora rudimentares, tais esforços abriram caminho para o desenvolvimento progressivo de técnicas mais sofisticadas, que ao longo das décadas seguintes passaram a incorporar conceitos de processamento digital de sinais, estatística aplicada e, mais recentemente, aprendizado de máquina. [7]

Um marco importante nesse processo foi o surgimento e consolidação do Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI), ferramenta voltada à manipulação direta de *pixels* com o objetivo de transformar uma imagem em outra. Diferentemente da visão computacional em sentido estrito, o PADI concentra-se em operações de baixo nível, como o ajuste de contraste, a correção de cores, a remoção de ruídos ou a aplicação de filtros específicos que otimizam a qualidade da visualização. O resultado desse processamento não é, em regra, uma interpretação semântica da cena, mas sim uma imagem refinada, adequada para inspeção visual humana ou para etapas posteriores de análise automatizada.

A visão computacional, por sua vez, não se limita à

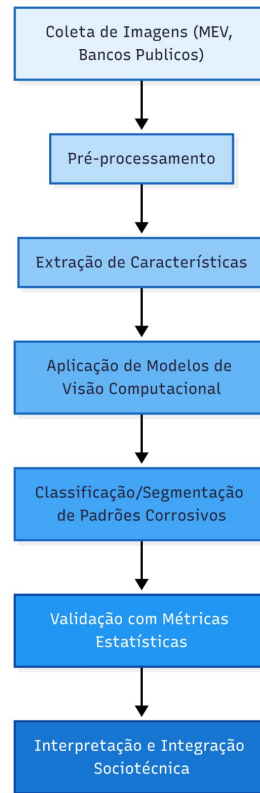


Figura 1. Fluxograma representando as etapas do processo de aplicação da visão computacional no diagnóstico da corrosão: desde a coleta de imagens (MEV e bancos públicos), passando pelo pré-processamento, extração de características, aplicação de modelos de visão computacional, classificação/segmentação de padrões corrosivos, validação com métricas estatísticas, até a interpretação e integração sociotécnica.

manipulação estética ou técnica da imagem, mas procura avançar para um nível de abstração superior. O objetivo é alcançar a extração de informações estruturais e contextuais que permitam fundamentar tomadas de decisão. Nesse sentido, pode-se afirmar que o PADI atua como uma etapa preparatória, enquanto a visão computacional opera como uma camada interpretativa, transformando dados visuais em dados informacionais. É precisamente essa transição, da imagem como representação visual para a imagem como fonte de dados, que confere caráter disruptivo ao campo.

Os avanços recentes em técnicas de aprendizado de máquina, em especial o aprendizado profundo, revolucionaram a área ao possibilitar a análise de ponta a ponta de imagens por meio de redes neurais artificiais e, sobretudo, de redes neurais convolucionais. Enquanto nas abordagens clássicas era necessário definir manualmente quais características, como bordas, texturas e formas, seriam extraídas, nas arquiteturas

profundas essa etapa é automatizada, de modo que a rede aprende diretamente a identificar as feições mais relevantes a partir dos próprios dados. Essa mudança metodológica não apenas aumentou a precisão dos modelos como também expandiu o escopo das aplicações possíveis, indo desde sistemas de reconhecimento facial e veículos autônomos até inspeções industriais complexas, como é o caso da detecção de corrosão em superfícies metálicas. O processo operacional, em sua forma mais elementar, segue um fluxo relativamente padronizado. Uma câmera ou sensor óptico capta as imagens da superfície de interesse, essas imagens são processadas digitalmente e armazenadas em um computador e, em seguida, algoritmos de visão computacional analisam as formas, irregularidades e possíveis anomalias presentes na superfície. Os dados resultantes, organizados em estruturas numéricas ou gráficas, podem ser submetidos tanto a interpretações automatizadas quanto à análise de operadores humanos, que, com base nos diagnósticos obtidos, deliberam sobre intervenções de manutenção, reparo ou monitoramento contínuo [8].

Essa dinâmica revela um aspecto essencial. A visão computacional não visa substituir o papel humano na tomada de decisão, mas sim potencializá-lo, fornecendo insumos objetivos, padronizados e reproduzíveis. Em setores críticos, como transporte, energia, saúde e infraestrutura, essa capacidade de transformar sinais visuais em indicadores quantitativos robustos traduz-se em ganhos expressivos de segurança, eficiência e confiabilidade operacional.

Pode-se afirmar, portanto, que a visão computacional evoluiu de um campo experimental focado em formas geométricas simples para um domínio sofisticado, capaz de operar de forma integrada com sistemas inteligentes, *big data* e Internet das Coisas. Ao lado do PADI, que atua como base de preparação e refinamento de imagens, a visão computacional configura-se hoje como um dos pilares da inteligência artificial aplicada, abrindo possibilidades inéditas para o monitoramento de fenômenos complexos, entre os quais a corrosão ocupa lugar de destaque devido à sua relevância econômica, social e estrutural.

O presente estudo adota uma abordagem de revisão crítica da literatura, cujo objetivo central consiste em investigar a viabilidade, os desafios e as potencialidades associadas à aplicação de técnicas de visão computacional na análise e monitoramento da corrosão em superfícies metálicas. Diferentemente das investigações de natureza eminentemente experimental, que se concentram na coleta, processamento e interpretação de dados primários, esta pesquisa privilegia a síntese, avaliação e integração sistemática de trabalhos prévios, permitindo a construção de um panorama consolidado acerca das metodologias, resultados e limitações relatadas no corpo de literatura científica. A escolha dessa abordagem metodológica se justifica

pela condição ainda emergente do campo em questão, no qual a incorporação de técnicas baseadas em visão computacional e aprendizado profundo voltadas ao diagnóstico e à quantificação de corrosão permanece em estágio inicial de consolidação, carecendo, portanto, de sistematizações críticas que identifiquem tanto avanços promissores quanto lacunas metodológicas e tecnológicas ainda não superadas.

Essa estratégia metodológica é particularmente relevante por permitir não apenas o mapeamento das tendências predominantes no estado da arte, mas também a identificação de desafios recorrentes que dificultam a transposição dos resultados acadêmicos para cenários industriais ou de larga escala. Ademais, a revisão crítica, ao contrário de levantamentos meramente descritivos, busca articular os achados de forma interpretativa, ponderando a robustez metodológica de cada estudo e situando-o em um contexto mais amplo de desenvolvimento científico e tecnológico. Assim, a metodologia aqui adotada visa não apenas a catalogação de informações, mas a produção de uma síntese crítica que subsidie tanto a comunidade científica quanto os setores industriais na tomada de decisões relacionadas ao monitoramento e à gestão da corrosão.

O percurso metodológico desenvolvido foi estruturado em etapas sequenciais e complementares, de modo a assegurar o rigor e a consistência necessários à análise, sendo estas descritas em detalhe a seguir.

V. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A primeira etapa consistiu em um levantamento bibliográfico extenuante, cujo propósito foi identificar, selecionar e reunir fontes relevantes relacionadas ao tema. Foram incluídos artigos científicos publicados em periódicos de alto impacto, relatórios técnicos oriundos de instituições de pesquisa e agências regulatórias, dissertações, teses e documentos disponibilizados em bases de dados públicas e especializadas. O foco recaiu sobre publicações que abordassem, de maneira explícita, a utilização de técnicas de visão computacional, aprendizado profundo e métodos híbridos para a detecção, segmentação e quantificação da corrosão.

Para garantir a consistência e a relevância das referências selecionadas, adotaram-se critérios específicos, tais como: recência das publicações, de modo a captar o estado mais atualizado do campo; relevância temática, assegurada pela pertinência direta ao problema investigado; e diversidade de enfoques metodológicos, contemplando trabalhos realizados sob diferentes condições experimentais, como ambientes industriais, marinhos e laboratoriais. Também se buscou abarcar diferentes tipos de superfícies metálicas (ferrosas e não ferrosas), bem como distintos níveis de complexidade computacional nos modelos empregados. Essa etapa inicial possibilitou a constituição

de uma base sólida de informações, refletindo tanto práticas consolidadas quanto inovações ainda em desenvolvimento.

A. CLASSIFICAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS ESTUDOS

Após a coleta das referências, procedeu-se à etapa de classificação e organização dos estudos, a qual visou estruturar o conhecimento existente em categorias que facilitassem tanto a análise comparativa quanto a subsequente interpretação crítica. Para tanto, foram definidos critérios específicos de categorização:

- Tipo de abordagem computacional, distinguindo métodos clássicos de processamento de imagens (baseados em técnicas de filtragem, segmentação tradicional e extração manual de atributos) das abordagens baseadas em redes neurais convolucionais (CNNs) e arquiteturas avançadas de aprendizado profundo, capazes de realizar extração automática de feições.
- Tipo de dado analisado, incluindo imagens obtidas por inspeção visual convencional, imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), registros macroestruturais e microestruturais, bem como imagens adquiridas em campo sob diferentes condições de iluminação e ruído.
- Métricas de desempenho empregadas, como precisão, revocação, *F1-score*, interseção sobre união (IoU) e outras métricas de confiabilidade, que permitiram avaliar a eficácia dos modelos.
- Contexto de aplicação, abrangendo desde cenários laboratoriais controlados até ambientes industriais complexos, considerando a variabilidade dos fatores ambientais, as exigências operacionais e os níveis de escalabilidade requeridos.

Essa categorização não apenas organizou o corpo de conhecimento de forma sistemática, mas também viabilizou a identificação de padrões metodológicos recorrentes, de lacunas significativas de pesquisa e de oportunidades concretas para a evolução tecnológica.

B. ANÁLISE CRÍTICA E SÍNTESE

A terceira etapa metodológica correspondeu à análise crítica dos estudos reunidos. Diferentemente de uma revisão descritiva, essa análise se propôs a avaliar, de maneira detalhada, a robustez, a aplicabilidade e a generalização dos métodos descritos na literatura. Foram examinadas questões fundamentais como:

- A capacidade dos algoritmos em lidar com variações de iluminação, heterogeneidade das superfícies e ruído de imagem, aspectos que frequentemente comprometem o desempenho dos modelos em ambientes reais;
- O grau de escalabilidade das soluções, considerando sua aplicabilidade a diferentes volumes de dados e condições de operação;

- Os custos computacionais associados tanto ao treinamento de modelos profundos quanto à execução de inferências em tempo real;
- O potencial de integração com sistemas já existentes de manutenção preditiva, monitoramento contínuo e automação industrial.

Além dessas dimensões, foram identificadas limitações recorrentes na literatura, como a necessidade de grandes volumes de dados rotulados, as dificuldades associadas à construção e à padronização de *datasets*, a falta de métricas universalmente aceitas para avaliação da acurácia e a discrepância entre condições laboratoriais controladas e cenários industriais complexos. Essa análise crítica forneceu elementos essenciais não apenas para comparar a eficácia relativa das diferentes abordagens, mas também para refletir sobre os obstáculos que ainda precisam ser superados para que tais metodologias possam ser plenamente incorporadas em contextos industriais.

C. COMPARAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DOS ACHADOS

Contribuições relatadas nos estudos analisados. Essa consolidação buscou identificar as abordagens que apresentam maior precisão, robustez e aplicabilidade em contextos reais, bem como mapear os desafios persistentes que continuam a dificultar a implementação prática dessas técnicas. Entre os pontos destacados, sobressaíram-se questões relacionadas ao custo computacional elevado, à variabilidade ambiental e à ausência de padrões internacionais que regulamentem a aplicação de metodologias de visão computacional na inspeção da corrosão.

Ao mesmo tempo, essa etapa possibilitou o mapeamento de oportunidades para a inovação tecnológica, tais como a integração de sistemas de visão computacional com sensores inteligentes, o desenvolvimento de plataformas voltadas à manutenção preditiva e a proposição de diretrizes metodológicas padronizadas que possam facilitar a replicabilidade e a escalabilidade das soluções propostas.

D. CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS

Ao adotar uma revisão crítica da literatura como eixo metodológico, este estudo alcança a vantagem de oferecer uma visão abrangente, sistemática e interpretativa do estado da arte, sem recorrer diretamente à experimentação primária. Essa estratégia confere a possibilidade de identificar tendências emergentes, limitações recorrentes e oportunidades de inovação, fornecendo subsídios valiosos para pesquisadores e profissionais atuantes na engenharia diagnóstica. Além disso, ao sintetizar e analisar criticamente os trabalhos já existentes, cria-se uma base conceitual e metodológica capaz de orientar futuras investigações, especialmente aquelas que visam ao desenvolvimento de modelos

mais robustos, replicáveis e integráveis a sistemas inteligentes de monitoramento.

Em síntese, a abordagem metodológica adotada não se limita a uma revisão descritiva, mas promove uma análise estruturada e aprofundada da literatura, permitindo um entendimento expandido sobre a viabilidade e os desafios da aplicação da visão computacional na inspeção da corrosão. Por meio dessa estratégia, o estudo contribui de maneira significativa para a consolidação de diretrizes conceituais e práticas, capazes de orientar tanto a produção acadêmica quanto às aplicações industriais, além de ressaltar a importância da integração interdisciplinar entre ciência dos materiais, engenharia computacional e análise de dados no avanço da engenharia diagnóstica.

VI. REVISÃO CRÍTICA DA LITERATURA

A revisão crítica da literatura representa um instrumento metodológico fundamental para a compreensão do estado da arte em áreas emergentes, como a aplicação da visão computacional à inspeção da corrosão em superfícies metálicas. Esse tipo de abordagem possibilita não apenas a identificação de tendências e avanços recentes, mas também o reconhecimento das limitações, dos desafios persistentes e das oportunidades de inovação tecnológica. Ao reunir diferentes estudos, conduzidos sob variados contextos experimentais e industriais, torna-se possível construir uma visão integrada, capaz de evidenciar tanto o potencial transformador da visão computacional na engenharia diagnóstica quanto os obstáculos que ainda dificultam sua implementação em larga escala.

Os trabalhos analisados indicam que, mesmo diante de abordagens metodológicas diversas, é viável identificar padrões consistentes relacionados à degradação superficial dos materiais metálicos. Esses padrões abrangem desde manifestações iniciais, como microtrincas e *pites* localizados, até processos de corrosão generalizada, caracterizados por perda significativa de massa e comprometimento estrutural. A literatura demonstra que tais fenômenos podem ser detectados, segmentados e quantificados por meio de algoritmos de visão computacional com diferentes graus de complexidade, robustez e escalabilidade.

Estudos recentes reforçam esse panorama. *Ali et al. (2023)* [1], por exemplo, demonstram que o uso de redes neurais convolucionais (CNNs) é capaz de alcançar elevados índices de acurácia na detecção automática de regiões corroídas, mesmo em ambientes particularmente agressivos, como estruturas metálicas expostas à maresia em zonas costeiras. Nesse tipo de aplicação, em que a agressividade ambiental acelera processos de degradação e torna as superfícies mais heterogêneas, a eficácia das CNNs ilustra o potencial das técnicas modernas de aprendizado profundo para superar os limites da inspeção convencional.

De forma distinta, *Khayatad, De Pue e De Waele (2020)* [2] evidenciam que métodos clássicos de processamento de imagens, como filtragem, limiarização e análise morfológica, embora desprovidos de recursos de aprendizado adaptativo, ainda se mostram eficazes em contextos laboratoriais controlados. Nessas condições, em que variáveis como iluminação, textura e posicionamento da câmera podem ser rigidamente padronizadas, esses métodos oferecem resultados satisfatórios, de menor custo computacional e mais acessíveis do ponto de vista da implementação. Contudo, quando transpostos para cenários industriais reais, marcados por elevada variabilidade ambiental e heterogeneidade superficial, esses mesmos métodos apresentam limitações significativas em termos de robustez e confiabilidade.

Os avanços mais recentes da literatura concentram-se, sobretudo, na utilização de arquiteturas baseadas em aprendizado profundo voltadas à segmentação semântica e à classificação hierárquica da corrosão. Nesse sentido, o estudo de *Ameli, Nesheli e Landis (2023)* [4] merece destaque, ao aplicar modelos como *Mask-RCNN* e *YOLOv8* em inspeções de pontes metálicas. Esses algoritmos não apenas identificaram com elevada precisão as regiões corroídas, mas também foram capazes de atribuir diferentes níveis de severidade ao processo corrosivo. O fluxograma de operação de um sistema moderno, como o *RustSEG*, ilustra as etapas de processamento desde a detecção até a segmentação final da área corroída (Figura 2). Tal capacidade de correlacionar a degradação superficial com parâmetros estruturais confere às técnicas de visão computacional um papel estratégico, pois permite antecipar falhas potenciais e subsidiar sistemas de manutenção preditiva.

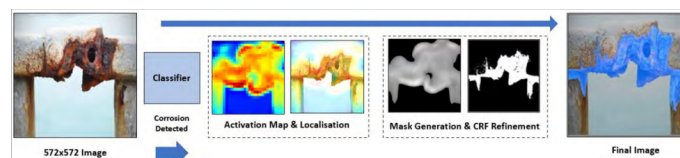


Figura 2. Esquema do fluxo de trabalho do método *RustSEG*, demonstrando as etapas de classificação, localização com mapa de ativação, geração e refinamento da máscara de segmentação até a imagem final com a área de corrosão destacada. Fonte: [6].

Rajendran e Subbian (2025) [3], por sua vez, reforçam que a incorporação de redes neurais profundas à inspeção de corrosão representa uma mudança de paradigma na engenharia diagnóstica. Contudo, destacam que essa transição exige a superação de barreiras relevantes, como a necessidade de grandes volumes de dados rotulados, os elevados custos computacionais associados ao treinamento e à inferência em redes complexas e a obrigatoriedade de metodologias rigorosas de validação para garantir reprodutibilidade e confiabilidade

dos resultados.

Outro ponto de inovação identificado na literatura é a integração entre microscopia eletrônica de varredura (MEV) e algoritmos de visão computacional. Essa combinação permite explorar imagens de altíssima resolução, nas quais microestruturas características da corrosão, como *pites* incipientes, fissuras submicrométricas e irregularidades topográficas, podem ser detectadas em estágios muito precoces. A detecção antecipada desses sinais é particularmente relevante em aplicações industriais críticas, nas quais a falha estrutural decorrente de corrosão pode implicar riscos à segurança e custos elevados de manutenção. Além disso, o uso de MEV contribui para a construção de *datasets* altamente especializados, capazes de treinar modelos com maior precisão e robustez.

A síntese dos principais benefícios identificados pela literatura pode ser organizada em quatro dimensões centrais:

- Automatização da inspeção: as técnicas de visão computacional reduzem substancialmente o tempo de análise, os custos associados à inspeção manual e a dependência de operadores humanos, minimizando falhas decorrentes da subjetividade ou fadiga.
- Padronização de diagnósticos: ao eliminar variabilidades interpretativas inerentes às inspeções visuais, promove-se maior consistência e reprodutibilidade dos resultados, o que é essencial em contextos industriais que demandam certificações rigorosas.
- Detecção precoce da corrosão: a possibilidade de identificar microdefeitos por meio de imagens de alta resolução (como as fornecidas por MEV) amplia a janela de intervenção preventiva, reduzindo riscos de falhas catastróficas.
- Integração com manutenção preditiva: os resultados gerados por algoritmos de visão computacional podem ser incorporados a sistemas inteligentes de monitoramento contínuo, fornecendo subsídios objetivos para a tomada de decisão em tempo real.

Não obstante, a literatura também aponta limitações que comprometem a aplicabilidade imediata dessas tecnologias em contextos industriais reais. Entre os principais desafios, destacam-se:

- Necessidade de *datasets* extensos e diversificados, capazes de abranger a ampla variabilidade de condições ambientais e superficiais em que a corrosão ocorre;
- Alto custo computacional, tanto para o treinamento quanto para a execução de modelos avançados de aprendizado profundo, especialmente quando se busca aplicação em tempo real;
- Ausência de padronização internacional, o que dificulta a validação das métricas utilizadas e compromete a com-

parabilidade entre diferentes estudos;

- Dificuldades de implementação em campo, devido a fatores como iluminação variável, irregularidades topográficas, presença de contaminantes e complexidade operacional.

Em síntese, a análise crítica da literatura evidencia que a visão computacional constitui uma ferramenta viável, inovadora e potencialmente transformadora para a engenharia diagnóstica da corrosão. Todavia, sua aplicação prática ainda depende da adoção de estratégias metodológicas robustas que permitam mitigar os desafios identificados. A combinação de técnicas clássicas, de menor custo e simplicidade, com abordagens modernas de aprendizado profundo e dados de alta resolução, aponta para caminhos promissores rumo à consolidação de metodologias confiáveis, replicáveis e aplicáveis em escala industrial. Nesse cenário, a integração interdisciplinar entre ciência dos materiais, engenharia computacional e análise de dados emerge como elemento essencial para viabilizar avanços efetivos e sustentáveis no monitoramento da corrosão.

VII. CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou a viabilidade da aplicação de metodologias de visão computacional no monitoramento da corrosão em superfícies metálicas, destacando, em especial, o papel das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) como recurso estratégico para a captura de microestruturas relacionadas à degradação. A revisão bibliográfica demonstrou uma evolução notável: desde métodos clássicos de processamento de imagens, baseados em técnicas determinísticas e filtros matemáticos, até arquiteturas avançadas de aprendizado profundo, como CNNs, *Mask-RCNN* e *YOLOv8*, capazes de segmentar, classificar e quantificar diferentes manifestações corrosivas com maior precisão e robustez. Essa trajetória metodológica reflete não apenas o progresso tecnológico, mas também uma mudança epistemológica no modo de compreender a corrosão.

Tradicionalmente tratada como fenômeno físico-químico decorrente da interação entre materiais metálicos e o ambiente, a corrosão passa a ser reinterpretada, sob a ótica da engenharia diagnóstica, como fenômeno informacional. Nesse novo enquadramento, a superfície metálica não é apenas um substrato sujeito à degradação, mas um repositório de dados, cuja leitura e interpretação são mediadas por algoritmos de inteligência artificial. Tal transposição de paradigma desloca o foco do “evento corrosivo” em si para a “informação corrosiva”, ou seja, para os padrões visuais e estruturais que podem ser extraídos, processados e analisados de forma objetiva. Esse movimento confere novas possibilidades analíticas, que transcendem a inspeção convencional, abrindo espaço para diagnósticos mais precoces, padronizados e replicáveis.

As implicações sociais e industriais dessa mudança são expressivas. Ao ampliar a capacidade diagnóstica e reduzir a subjetividade dos laudos técnicos, a visão computacional contribui para a redução significativa dos custos de manutenção, uma vez que intervenções corretivas podem ser substituídas por estratégias de manutenção preditiva baseadas em dados. Além disso, a mitigação de falhas estruturais decorrentes da corrosão, sobretudo em infraestruturas críticas, como oleodutos, pontes, aeronaves e sistemas de abastecimento de água, repercute diretamente na segurança das sociedades contemporâneas. A possibilidade de prolongar a vida útil de ativos metálicos estratégicos também se relaciona a objetivos de sustentabilidade, ao reduzir a necessidade de substituições precoces e otimizar o uso de recursos materiais e energéticos.

Prospectivamente, o cenário que se delinea é o da integração entre visão computacional, Internet das Coisas (*IoT*) e sistemas de manutenção preditiva em tempo real. Essa convergência tecnológica aponta para a criação de ecossistemas inteligentes de monitoramento, nos quais sensores distribuídos coletam dados continuamente e algoritmos de aprendizado avançado os processam de forma autônoma. O resultado esperado é um sistema dinâmico e interconectado, capaz de emitir alertas, sugerir intervenções e até mesmo acionar protocolos de manutenção de forma automatizada. Nesse contexto, a corrosão deixa de ser um fenômeno diagnosticado pontualmente em inspeções programadas para se tornar uma variável monitorada em fluxo contínuo, o que potencializa a resiliência de sistemas industriais e urbanos.

Conclui-se, portanto, que a visão computacional não deve ser interpretada apenas como ferramenta auxiliar no diagnóstico da corrosão, mas como vetor disruptivo na engenharia diagnóstica contemporânea. Sua adoção projeta impactos que transcendem o domínio técnico, alcançando dimensões sociais e ambientais, ao contribuir para sociedades mais seguras, sustentáveis e resilientes. Ao transformar a corrosão em dado inteligível, a visão computacional inaugura um horizonte para a gestão da integridade estrutural, reafirmando a importância da tecnologia como elemento estratégico na construção de futuros industriais e urbanos mais inteligentes.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Oficinas 4.0 do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Guarulhos pelo suporte técnico e pela infraestrutura, disponibilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os quais foram essenciais para a realização das atividades propostas, com empenho e auxílio do Professor Mestre Cristiano Alves Pessoa.

Os agradecimentos se estendem, ainda, ao Professor Doutor Wilson Carlos da Silva Junior, pelas contribuições, sugestões e

pelo incentivo oferecido ao longo do processo, que, de maneira significativa, colaboraram para o enriquecimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] A. A. I. M. Ali, S. Jamaludin, M. M. H. Imran, A. F. M. Ayob, S. Z. A. S. Ahmad, M. F. A. Akhbar, M. I. R. Suhrab, and M. R. Ramli, "Computer vision and image processing approaches for corrosion detection," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 10, p. 1954, 2023.
- [2] M. Khayatad, L. De Pue, and W. De Waele, "Detection of corrosion on steel structures using automated image processing," *Developments in the Built Environment*, vol. 3, p. 100022, 2020.
- [3] M. Rajendran and D. Subbian, "Deep learning in corrosion assessment and control: a critical review of techniques and challenges," *Corrosion Reviews*, no. 0, 2025.
- [4] Z. Ameli, S. J. Nesheli, and E. N. Landis, "Deep learning-based steel bridge corrosion segmentation and condition rating using mask rcnn and yolov8," *Infrastructures*, vol. 9, no. 1, p. 3, 2023.
- [5] A. Das, S. Dorafshan, and N. Kaabouch, "Autonomous image-based corrosion detection in steel structures using deep learning," *Sensors*, vol. 24, no. 11, p. 3630, 2024.
- [6] B. Burton, W. T. Nash, and N. Birbilis, "Rustseg—automated segmentation of corrosion using deep learning," *arXiv preprint arXiv:2205.05426*, 2022.
- [7] V. V. Maurente, N. R. Pereira, and E. Estrada, "Sistema de visão computacional para inspeção da corrosão, em estruturas metálicas na indústria do petróleo, gás natural e energias renováveis," in *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, vol. 3, no. 1, 2022.
- [8] A. Rajender, A. K. Samanta, and A. Paral, "Comparative study of corrosion-based service life prediction of reinforced concrete structures using traditional and machine learning approach," *International Journal of Structural Integrity*, vol. 16, no. 3, pp. 591–621, 2025.