

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA REDUÇÃO DE ENSAIOS DESTRUTIVOS NO CONTROLE DE QUALIDADE DA PINTURA DE TANQUES MOTOCICLÍSTICOS: UM ESTUDO PROPOSITIVO

APPLICATION OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES FOR THE REDUCTION OF DESTRUCTIVE TESTING IN MOTORCYCLE FUEL TANK PAINT QUALITY CONTROL: A PROPOSITIONAL CASE STUDY

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0 PARA LA REDUCCIÓN DE ENSAYOS DESTRUTIVOS EN EL CONTROL DE CALIDAD DE LA PINTURA DE TANQUES DE MOTOCICLETAS: UN ESTUDIO PROPOSITIVO

Françoise do Nascimento Lima¹
Jorge Gama dos Santos²
Midiã Lopes de Vasconcelos³
Ricardo Augusto Lunière Fonseca⁴

RESUMO: Esse artigo buscou analisar a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 como solução inteligente para reduzir ou eliminar ensaios destrutivos no controle de qualidade da pintura de tanques de combustível motociclisticos. A pesquisa classifica-se como aplicada, exploratória e descritiva, adotando a estratégia de estudo de caso com abordagem qualitativa e quantitativa em uma fabricante do Polo Industrial de Manaus. Os resultados revelam que o protocolo de inspeção convencional, embora tecnicamente confiável, gera um gargalo operacional de 350 horas mensais e um custo anual estimado de R\$ 426.268,80 devido ao retrabalho obrigatório decorrente da natureza invasiva dos testes de aderência. Propõe-se um modelo conceitual que integra Visão Computacional, Inteligência Artificial (*Deep Learning*) e sensores não invasivos para o monitoramento contínuo das variáveis do processo. A análise demonstra a viabilidade técnica de reduzir o tempo de inspeção de 20 minutos para um intervalo entre 5 e 15 segundos por peça, permitindo a inspeção de até 100% da produção e a mitigação de riscos ocupacionais físicos e químicos. Conclui-se que o modelo responde de forma robusta ao problema de pesquisa, evidenciando que a transição para o monitoramento preditivo otimiza a eficiência operacional e elimina desperdícios financeiros, embora demande futuras validações experimentais em ambiente industrial real.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Visão Computacional. Controle de Qualidade. Tanques de Combustível Motociclisticos. Transformação Digital.

¹ Bacharel em Ciências Contábeis pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

² Gestão da Qualidade - Fametro.

³ Ensino Superior Tecnólogo em Gestão da Qualidade - Nilton Lins.

⁴ Doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Mestrado acadêmico em Administração pela Universidade Federal de Viçosa (UFV); Auditor (de carreira) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA); Orientador do artigo; Formado em Administração de Empresas.

ABSTRACT: This article aims to analyze the implementation of Industry 4.0 technologies as a smart solution to reduce or eliminate destructive testing in the quality control of motorcycle fuel tank painting. The research is classified as applied, exploratory, and descriptive, employing a case study strategy with a mixed-methods approach (qualitative and quantitative) at a manufacturer in the Manaus Industrial Pole. The results reveal that the conventional inspection protocol, while technically reliable, creates an operational bottleneck of 350 hours per month and an estimated annual cost of R\$ 426,268.80 due to mandatory rework resulting from the invasive nature of adhesion tests. A conceptual model is proposed that integrates Computer Vision, Artificial Intelligence (Deep Learning), and non-invasive sensors for the continuous monitoring of process variables. The analysis demonstrates the technical feasibility of reducing inspection time from 20 minutes to a range of 5 to 15 seconds per part, enabling the inspection of up to 100% of production and the mitigation of physical and chemical occupational risks. It is concluded that the model provides a robust response to the research problem, highlighting that the transition to predictive monitoring optimizes operational efficiency and eliminates financial waste, although it requires future experimental validation in a real industrial environment.

Keywords: Industry 4.0. Computer Vision. Quality Control. Motorcycle Fuel Tanks. Digital Transformation.

RESUMEN: Este artículo buscó analizar la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 como una solución inteligente para reducir o eliminar ensayos destructivos en el control de calidad de la pintura de tanques de combustible de motocicletas. La investigación se clasifica como aplicada, exploratoria y descriptiva, adoptando la estrategia de estudio de caso con un enfoque cualitativo y cuantitativo en un fabricante del Polo Industrial de Manaus. Los resultados revelan que el protocolo de inspección convencional, aunque técnicamente confiable, genera un cuello de botella operacional de 350 horas mensuales y un costo anual estimado de R\$ 426.268,80 debido al retrabajo obligatorio derivado de la naturaleza invasiva de las pruebas de adherencia. Se propone un modelo conceptual que integra Visión Computacional, Inteligencia Artificial (Deep Learning) y sensores no invasivos para el monitoreo continuo de las variables del proceso. El análisis demuestra la viabilidad técnica de reducir el tiempo de inspección de 20 minutos a un intervalo de entre 5 y 15 segundos por pieza, permitiendo la inspección de hasta el 100% de la producción y la mitigación de riesgos ocupacionales físicos y químicos. Se concluye que el modelo responde de manera robusta al problema de investigación, evidenciando que la transición hacia el monitoreo predictivo optimiza la eficiencia operacional y elimina desperdicios financieros, aunque requiere de futuras validaciones experimentales en un entorno industrial real.

Palabras clave: Industria 4.0. Visión Computacional. Control de Calidad. Tanques de Combustible de Motocicletas. Transformación Digital.

INTRODUÇÃO

A transformação digital, impulsionada pela Indústria 4.0, tem redefinido os processos produtivos e a gestão da qualidade, permitindo que as empresas monitorem suas operações de

maneira integrada por meio de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Visão Computacional dentre outras. Nesse cenário, o controle de qualidade evolui de inspeções de qualidade pontuais para aplicações inteligentes capazes de detectar falhas em tempo real, reduzir desperdícios com ganhos operacionais. No Polo Industrial de Manaus, essa evolução é particularmente crítica na pintura de tanques de combustível motociclísticos, onde o rigoroso controle de variáveis é essencial para garantir que atendam os critérios estabelecidos por protocolos internos e exigências do mercado consumidor.

Atualmente, para assegurar tais critérios, a indústria utiliza protocolos, como medição de espessura, teste de aderência (*cross-cut*), dureza por lápis e resistência ao xileno. Contudo, a aplicação prática desses métodos revela um conflito entre a necessidade de conformidade e a eficiência operacional. Durante o estudo de caso de caráter propositivo, verificou-se que o ensaio de aderência, por sua natureza destrutiva, exige um retrabalho obrigatório de aproximadamente duas horas e trinta e cinco minutos por peça para a recuperação da superfície. Esse fluxo gera um gargalo de 350 horas mensais e um custo anual estimado em R\$ 426.268,80, além de expor os operadores a riscos físicos e químicos.

Essa contradição evidencia que o retrabalho não decorre de defeitos de fabricação, mas da própria metodologia de inspeção de qualidade invasiva. Embora as tecnologias da Indústria 4.0 ofereçam potencial para realizar análises não invasivas e preditivas, observa-se na literatura científica uma escassez de estudos voltados à sua aplicação integrada especificamente na pintura de tanques motociclísticos. Diante dessa lacuna de oportunidade de pesquisa entre a tecnologia disponível e as limitações do método convencional aplicado atualmente, emerge o seguinte problema: como a integração de tecnologias da Indústria 4.0 pode otimizar o controle de qualidade na pintura de tanques motociclísticos, visando a substituição de ensaios destrutivos? Para responder a esta questão, o presente trabalho fundamenta-se no seguinte norteador, tendo como objetivo geral, analisar a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 como uma solução inteligente reduzindo ou eliminando a necessidade de ensaios destrutivos no controle de qualidade da pintura de tanques motociclísticos, otimizando custos operacionais, a produtividade e a mitigação de riscos ocupacionais, e para isso, viabilizando o alcance definimos como objetivos específicos balizando o estudo de caso aplicado, exploratório com abordagem qualitativa e quantitativa, definimos mapear o protocolo de ensaios metrológicos e físico-químicos (como o *cross-cut*, dureza e resistência ao xileno) para identificar os gargalos

operacionais e os impactos financeiros do retrabalho obrigatório, analisar o tempo de ciclo, os custos operacionais estimados e os riscos físicos e químicos aos quais os operadores são expostos no método convencional, investigar as tecnologias da Indústria 4.0 que possuam potencial técnico para realizar inspeções de qualidade de forma não invasiva e preditiva, e ainda, propor um modelo conceitual de inspeção de qualidade com as tecnologias da Indústria 4.0 realizando a inspeção em tempo real, integrando sensores e algoritmos para prever a conformidade sem danificar o revestimento.

Importante ressaltar que os avanços observados nos últimos anos demonstram que tecnologias da Indústria 4.0 vêm ampliando as possibilidades de automação do controle da qualidade. Essas tecnologias são capazes de realizar a análise de imagens, o reconhecimento de padrões, a identificação de defeitos superficiais e a correlação de informações do processo produtivo com características do produto. Dessa forma, é possível desenvolver aplicações capazes de estimar a conformidade das peças sem a necessidade de provocar danos ao revestimento, com caráter mais preventivo, inteligente e integrado evidenciando a importância da possibilidade de viabilizar essas tecnologias em ambientes industriais reais.

A originalidade deste estudo reside na proposta de transição de um modelo de inspeção de qualidade manual e amostral para aplicações inteligentes com caráter preventivo, capaz de avaliar até 100% da produção sem comprometer a integridade física das peças e o ritmo da produção.

1.1 A indústria 4.0 e suas principais tecnologias

Para compreender a transformação digital e a Indústria 4.0, é fundamental observar a trajetória das revoluções industriais que moldaram o desenvolvimento tecnológico nas empresas com a aplicação de inovações tecnológicas na fronteira do conhecimento de cada época. A Primeira Revolução Industrial, iniciada no século XVIII, marcou a transição da força motriz humana e animal que tornava os processos limitados para o uso do motor a vapor. Segundo Dathein (2003), essa tecnologia permitiu que as fábricas se deslocassem para centros comerciais, aumentando a escala produtiva e os lucros.

Já a Segunda Revolução Industrial, por volta de 1850, trouxe avanços significativos com a descoberta da eletricidade, o surgimento da indústria química e a produção de aço. De acordo com Almeida (2005), esses processos impulsionaram novos meios de comunicação, como o

telégrafo e o rádio, além de motores à explosão que dinamizaram os transportes e as trocas globais. A Terceira Revolução Industrial, consolidada nas décadas de 1970 e 1980, introduziu a computação e o microchip, transformando a partilha de informações através da internet e do e-commerce formando a base para a próxima revolução.

Atualmente, vivenciamos a Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, caracterizada pela integração de inovações nos campos de automação, controle e tecnologia da informação aplicadas à produção industrial. Este novo paradigma permite que as empresas identifiquem falhas de forma preventiva ainda durante a produção. Segundo Klaus Schwab em seu livro “A quarta revolução industrial” a Indústria 4.0 não é definida por um conjunto de tecnologias emergentes em si mesmas, mas a transição em direção a novos sistemas que foram construídos sobre a infraestrutura da revolução digital (anterior)”.

De acordo com Schwab (2016), a Quarta Revolução Industrial representa uma nova etapa do desenvolvimento tecnológico, marcada pela integração de tecnologias digitais, físicas e biológicas, capazes de transformar profundamente os processos produtivos, os modelos de negócios e a forma como as pessoas vivem e trabalham.

Podemos citar dentre as principais tecnologias que sustentam esse modelo, destacam-se:

- Internet das Coisas (IoT): Atua como uma ponte entre o mundo real e o digital, permitindo que máquinas interajam entre si e com humanos de forma autônoma. Valente (2011) ressalta que esse paradigma visa integrar o estado das "coisas" em aplicações de software, permitindo a tomada de decisões eficientes sem intervenção humana direta.

- Big Data e Computação em Nuvem: O Big Data permite o processamento de grandes massas de dados estruturados e não estruturados para prever incidentes e agregar valor estratégico. Taurion (2013) compara essa ferramenta a um microscópio, essencial para a análise organizacional. Paralelamente, a Computação em Nuvem oferece armazenamento ilimitado e acesso remoto independente de plataforma.

- Inteligência Artificial (IA) e *Deep Learning*: A aplicação de algoritmos avançados e redes neurais permitindo a aprendizagem de características visuais complexas para a classificação automática de peças. Essa tecnologia é essencial para sistemas preditivos de monitoramento contínuo, alinhando-se à abordagem de controle preventivo defendida por Montgomery (2020).

- **Visão Computacional:** Esta ferramenta busca reproduzir a percepção humana utilizando câmeras e sensores industriais para capturar e processar imagens. Szeliski (2022) destaca que o

processamento digital permite identificar falhas superficiais, como riscos e bolhas, de forma não invasiva e com alta repetibilidade.

- **Fábricas Inteligentes e Cibersegurança:** O conceito de *Smart Factories* envolve a interação entre trabalhadores, robôs e produtos conectados em rede. Conforme Yoon et al. (2013), a fábrica inteligente utiliza a tecnologia de computação ubíqua para resolver problemas no chão de fábrica. Esse ambiente exige protocolos robustos de segurança cibernética para proteger ativos de informação e infraestruturas críticas no espaço digital.

Essas tecnologias, quando aplicadas isoladas ou integradas, permitem a transição de um modelo de inspeção manual e destrutivo para um sistema de inspeção de qualidade inteligente. De acordo com Juran e De Feo (2017), tal evolução permite que as organizações equilibrem custos de avaliação e benefícios, sendo capaz de avaliar todas as peças em tempo real, preservando sua integridade física e mitigando riscos ocupacionais.

1.2 Inspeção de qualidade

6

Buscando se sobressair diante da concorrência, as empresas estão investindo cada vez mais na qualidade do seu produto e serviço. A qualidade é um parâmetro em constante evolução, uma vez que seu significado vai se modificando de acordo com a perspectiva e necessidades dos consumidores, que estão cada vez mais exigentes (BOUER et al. 2016).

Buscando atingir melhores parâmetros de qualidade, a inspeção, que é uma das tecnologias para a avaliação da qualidade é bastante difundida e refere-se ao procedimento para detectar se um produto/serviço atende determinadas especificações de qualidade (ZU, 2009).

O foco da inspeção de qualidade de acordo com Zu (2009) é garantir que o funcionamento, as etapas de um processo ou um produto atendem as especificações estabelecidas pelo controle da qualidade. Essa verificação resulta na aprovação, rejeição ou ajustes para garantir o desempenho adequado.

Tendo como seu maior propagador, Taylor, sendo considerado por muitos como o “Pai da Administração”, o processo de inspeção de qualidade recebeu credibilidade, fazendo que os

processos passassem a ser atribuídos a profissionais especializados, tornando-se um procedimento independente e atribuído ao controle de qualidade (CAMPOS, 2014).

A constatação do problema, sua amplitude, as áreas afetadas e a forma como saná-los, podem ser identificados pelos programas e tecnologias da qualidade (NADAE et al., 2009). Diante dos avanços tecnológicos associados à Indústria 4.0 as propostas voltadas à inspeção tecnológica avançada têm se tornado progressivamente mais sofisticadas possibilitando maior precisão na detecção de não conformidades, ampliação da rastreabilidade dos processos e incremento da eficiência no controle da qualidade.

MÉTODOS

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, desenvolvido a partir de um problema real identificado em uma indústria do setor de duas rodas, buscando contribuir com alternativas tecnológicas para o controle da qualidade da pintura de tanques motociclísticos. Quanto aos objetivos, classifica-se como exploratória e descritiva. É exploratória por investigar tecnologias da Indústria 4.0 com potencial para reduzir os ensaios destrutivos atualmente empregados, tema ainda pouco explorado na indústria de fabricação de motocicletas. Também é descritiva por caracterizar o processo atual de inspeção da pintura, os ensaios realizados e seus impactos sobre a produtividade, os custos operacionais, o retrabalho e a segurança dos operadores. A abordagem adotada é qualitativa e quantitativa, tendo em vista que busca compreender o processo de inspeção, interpretar as práticas atualmente utilizadas e analisar o potencial das tecnologias disponíveis para esse contexto. A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa de campo, utilizando entrevistas e observação direta das atividades desenvolvidas no processo de pintura, análise dos procedimentos internos de inspeção da qualidade e levantamento de informações operacionais. Foram acompanhados os ensaios de medição da espessura da película, teste de aderência pelo método *Cross-cut*, ensaio de dureza por lápis e teste de resistência ao xileno, além da coleta de dados referentes ao tempo de execução das inspeções, tempo de recuperação das peças, quantidade mensal de tanques ensaiados e custo unitário de retrabalho decorrente da natureza destrutiva dos testes. Complementarmente, realizou-se pesquisa bibliográfica em livros, artigos científicos, dissertações, teses, normas técnicas e documentos especializados sobre Indústria 4.0, Visão Computacional, Inteligência Artificial, *Deep Learning*, inspeção automatizada, controle da

qualidade, pintura industrial e ensaios não destrutivos, com o objetivo de identificar soluções tecnológicas já consolidadas e aplicáveis ao contexto investigado.

Como estratégia metodológica, adotou-se o estudo de caso, por possibilitar a investigação de um fenômeno contemporâneo em seu contexto real. De acordo com Yin (2015), esse método é indicado quando se pretende compreender como e por que determinado fenômeno ocorre, especialmente em situações nas quais o pesquisador possui pouco controle sobre os eventos analisados. O estudo foi desenvolvido em uma fábrica de motocicletas, tendo como objeto de análise o processo de inspeção da qualidade da pintura de tanques de combustível.

A análise dos dados foi conduzida por meio de uma abordagem qualitativa interpretativa, relacionando as evidências obtidas durante o estudo de caso com os conceitos apresentados na literatura científica. Inicialmente, foi realizado o diagnóstico do processo atual de inspeção, identificando suas principais limitações quanto ao tempo de execução, necessidade de retrabalho, custos associados ao processo de avaliação da qualidade, riscos ocupacionais e capacidade de inspeção. Em seguida, essas limitações foram confrontadas com as características e potencialidades das tecnologias da Indústria 4.0 descritas na literatura, permitindo discutir sua aplicabilidade como alternativa aos ensaios destrutivos empregados no controle da qualidade da pintura.

Ressalta-se que esta pesquisa possui caráter diagnóstico e propositivo, não contemplando o desenvolvimento, a implantação ou a validação experimental de uma solução tecnológica no ambiente industrial. Seu propósito consiste em demonstrar, com base nas evidências obtidas no estudo de caso e no estado da arte, que já existem tecnologias capazes de reduzir ou, em determinadas aplicações, substituir os ensaios destrutivos atualmente utilizados no processo de inspeção da pintura. A fundamentação metodológica apoia-se nas contribuições de Gil (2019) e Prodanov e Freitas (2013) para a classificação da pesquisa; de Yin (2015) e Miguel (2018) para o estudo de caso; de Lakatos e Marconi (2021) para os procedimentos de pesquisa bibliográfica; e de Creswell e Creswell (2021) para a abordagem qualitativa interpretativa.

RESULTADOS

O processo produtivo inicia-se na preparação e masqueamento do tanque, estabelecendo uma proteção física das áreas funcionais e de difícil acesso, designadamente bordas, juntas e cavidades profundas. Esta proteção deve ser realizada em conformidade com o desenho técnico

do componente. Posteriormente o tanque é submetido a um tratamento de superfície, chamado de pré-tratamento, que consiste na sujeição das peças a um processo de limpeza química, com o objetivo de remover completamente os óleos, as graxas e a sujeira, para então realizar a aplicação do primer, que é a aplicação da camada base com o objetivo de promover a aderência e a proteção galvânica, seguida por um ciclo de cura térmica controlada. Por fim, é feito o acabamento, que é a aplicação da camada de tinta e submissão ao ciclo de cura final, em conformidade com rígidos parâmetros de tempo, umidade e temperatura.

Após a cura, estabilização mecânica da tinta e atingimento da temperatura ambiente do tanque, ele é submetido aos ensaios de qualidade. Os ensaios e avaliações da conformidade do revestimento são realizados através da aplicação de um protocolo técnico composto por quatro ensaios rigorosos, projetados para garantir a proteção anticorrosiva e a integridade estrutural das peças metálicas.

Entre eles, é realizada a medição da espessura da camada de revestimento através da utilização de um medidor eletromagnético devidamente calibrado. A medição é realizada em três pontos distintos, espaçados por um mínimo de 50 mm. A espessura de referência é passível de variação, estando definida em conformidade com a especificação normativa.

Também é realizado o Teste de Aderência, designado por *Cross-cut Test*, que consiste num ensaio mecânico de caráter destrutivo. A fim de executar uma grade de ranhuras, recorre-se a uma faca retrátil. Esta deve apresentar 11 ranhuras paralelas e 11 perpendiculares, com uma distância de 1 mm entre cada uma, para camadas simples. Deste modo, obtêm-se um total de 100 quadrados expostos até ao metal base. A aplicação de uma fita adesiva padronizada (Nichiban ou equivalente) é efetuada manualmente, sob pressão, com a subsequente remoção rápida sob um ângulo de 45°. O resultado é expresso pela fração de quadrados remanescentes.

É realizado ainda o teste de dureza, que é designado como "*Pencil Scratch Hardness Test*", e consiste numa avaliação da resistência ao risco, utilizando-se um lápis Mitsubishi Drawing Pencil UNI (ou equivalente), cuja ponta é previamente nivelada em lixa n.º 400. O lápis é transportado sob uma carga constante, a uma velocidade de aproximadamente 3 mm/s, através de uma extensão de 10 mm, com uma inclinação de 45°.

E por fim, é realizado o teste de resistência ao xileno é uma verificação da integridade química e do nível de cura da película. O operador envolve o dedo com dez camadas de gaze

embebidas em xileno e realiza oito ciclos de fricção sob carga equivalente de 9,8 N (1 kgf), mantendo uma velocidade aproximada de um segundo por ciclo.

Os resultados obtidos são formalizados num relatório de inspeção, com o objetivo de garantir a qualidade e a rastreabilidade durante a realização de auditorias. No entanto, todo esse processo demonstra que o processo de inspeção da qualidade da pintura dos tanques motociclistas ainda depende da realização de ensaios destrutivos para validar propriedades do revestimento, como espessura da película, aderência, dureza e resistência química.

Os ensaios em questão estão em conformidade com os requisitos técnicos e normativos em vigor, com elevados níveis de confiabilidade para a avaliação da conformidade do revestimento. Entretanto foi observado que a sua implementação pode resultar em impactos substanciais sobre a produtividade, os custos operacionais, a utilização dos recursos produtivos e a segurança dos colaboradores.

A Tabela 1 apresenta os principais indicadores observados durante o estudo de caso.

Tabela 1 – Indicadores do processo atual de inspeção

Indicador	Valor observado
Tempo médio para realização dos ensaios	20 minutos/peça
Tempo de retrabalho após os ensaios	2 h 35 min/peça
Quantidade média de peças ensaiadas	120 peças/mês
Tipo predominante de inspeção	Ensaio destrutivo
Necessidade de retrabalho	100% das peças ensaiadas
Custo de recuperação por tanque (Estimado)	R\$ 296,02
Exposição ao risco de corte (Cross-cut)	Sim
Exposição ao solvente xileno	Sim

Fonte: LIMA FRANCOISE, et al., 2026.

Foi observado que todas as peças submetidas aos ensaios destrutivos necessitam de regressar ao processo produtivo para a recuperação da superfície pintada. Este procedimento requer operações de nivelamento da área ensaiada e um novo ciclo completo de pintura, resultando em consumo adicional de tinta, energia elétrica, mão de obra, utilização dos equipamentos e ocupação da capacidade produtiva. É importante enfatizar que este retrabalho

não decorre da identificação de defeitos no produto, mas sim da própria natureza destrutiva dos ensaios empregados para validação da qualidade do revestimento.

Em conformidade com os dados obtidos, constatou-se que o tempo atribuído exclusivamente à realização dos ensaios é de aproximadamente 40 horas por mês (120 peças x 20 minutos). O retrabalho necessário para a recuperação das peças representa cerca de 310 horas mensais (120 peças x 2 horas e 35 minutos), totalizando aproximadamente 350 horas por mês dedicadas ao processo de inspeção de qualidade e recuperação dos tanques de combustível motociclísticos utilizados no controlo da qualidade.

Para além do impacto operacional, o estudo permitiu quantificar o impacto económico resultante do método de inspeção atualmente utilizado. Considerando o custo médio de recuperação de 296,02 reais por tanque e uma média de 120 peças ensaiadas mensalmente, estima-se um dispêndio de aproximadamente 35.522,40 reais por mês, equivalente a 426.268,80 reais ao ano. Os valores apresentados mostram que os ensaios destrutivos geram um custo significativo no âmbito do processo de avaliação da qualidade, uma vez que a recuperação da peça é imperativa, independentemente da sua conformidade com as especificações técnicas. A Tabela 2 sintetiza os principais impactos operacionais e económicos observados.

Tabela 2 – Impactos do processo atual de inspeção

Indicador	Valor
Tempo mensal de inspeção	40 horas
Tempo mensal de retrabalho	310 horas
Tempo total consumido	350 horas/mês
Custo unitário de recuperação	R\$ 296,02
Custo mensal estimado	R\$ 35.522,40
Custo anual estimado	R\$ 426.268,80

Fonte: LIMA FRANCOISE, et al., 2026.

Os resultados obtidos demonstram que o retrabalho corresponde à parcela mais significativa do tempo consumido pelo processo de inspeção de qualidade, evidenciando que os impactos dos ensaios destrutivos extrapolam a atividade de avaliação em si. Sob essa ótica, torna-se evidente a necessidade de investigar métodos alternativos que preservem a integridade

física da peça, reduzam a utilização de recursos produtivos e aumentem a eficiência do sistema de controlo da qualidade. Os resultados observados estão em aderência com os princípios da Indústria 4.0, cuja proposta consiste na digitalização dos processos produtivos por meio da integração entre sistemas ciberfísicos, sensores inteligentes, conectividade e análise de dados. Conforme descrito por Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), a utilização destas tecnologias possibilita a substituição de processos convencionais por sistemas inteligentes, capazes de aumentar a produtividade, reduzir desperdícios e ampliar a flexibilidade do processo de produção.

Nesse âmbito, a Visão Computacional evidencia um elevado potencial para automatizar atividades que são tradicionalmente executadas por inspeção visual humana. Conforme referido por Szeliski (2022), as técnicas de processamento digital de imagens possibilitam a identificação de padrões, o reconhecimento de defeitos superficiais e a realização de medições com elevada repetibilidade, contribuindo para a realização de inspeções mais céleres e consistentes. Aplicadas ao processo de pintura, estas tecnologias podem auxiliar na identificação de falhas de cobertura, irregularidades superficiais, manchas, escorrimentos e variações de textura sem causar danos ao revestimento.

De acordo com a abordagem apresentada, Goodfellow, Bengio e Courville (2016) demonstram que os modelos de *Deep Learning*, em particular as Redes Neurais Convolucionais (CNN), apresentam uma elevada capacidade de aprendizagem de características visuais complexas. Esta capacidade permite a classificação automática de superfícies conformes e não conformes. Estudos recentes reportam elevados níveis de precisão na inspeção automatizada de superfícies industriais, indicando que estas soluções atingiram um elevado grau de maturidade tecnológica para aplicações em ambientes produtivos.

Sob a perspectiva do Controle Estatístico da Qualidade, Montgomery (2020) destaca que o monitoramento contínuo do processo possibilita a detecção de desvios antes que estes resultem em produtos não conformes, reduzindo a necessidade de inspeções corretivas e aumentando a estabilidade do processo produtivo. A integração entre as tecnologias de Inteligência Artificial, IoT, *Deep learning* e Visão Computacional está alinhada com esta abordagem preventiva, permitindo que a qualidade seja monitorizada continuamente ao longo do processo de produção.

No âmbito da Gestão da Qualidade, Juran e De Feo (2017) salientam que as organizações devem procurar continuamente alcançar um equilíbrio entre os custos associados à avaliação e

os benefícios obtidos com as atividades de inspeção. No caso em análise, constatou-se que o elevado custo financeiro e operacional está associado ao próprio método destrutivo utilizado para validar a conformidade da pintura, e não à ocorrência de falhas no processo produtivo. Este resultado evidencia uma oportunidade para a adoção de tecnologias capazes de ampliar a confiabilidade da inspeção, reduzindo simultaneamente os recursos consumidos pelo processo de avaliação e retrabalho.

A análise dos resultados obtidos no estudo de caso revela que o processo atual de controle de qualidade na pintura dos tanques motociclísticos gera gargalos operacionais expressivos, consumindo mensalmente 350 horas (40 horas de ensaios e 310 horas de retrabalho) para inspecionar e recuperar 120 tanques de combustível motociclísticos submetidos a ensaios destrutivos.

DISCUSSÃO

A comparação entre o método atualmente utilizado e as soluções tecnológicas descritas na literatura é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre o processo atual e as tecnologias da Indústria 4.0

Aspecto	Processo atual	Tecnologias da Indústria 4.0
Tipo de inspeção	Destrutiva	Não destrutiva
Tempo de inspeção	Aproximadamente 20 minutos	Inspeção em tempo real ou poucos segundos
Necessidade de retrabalho	Obrigatória	Potencialmente eliminada
Integridade da peça	Comprometida	Preservada
Exposição do operador	Elevada	Reduzida
Rastreabilidade	Registros manuais	Registros digitais integrados
Cobertura da inspeção	Amostral	Potencial para inspeção de 100% das peças
Custo associado à avaliação	Elevado	Tendência de redução após implantação

Fonte: LIMA FRANCOISE, et al., 2026, com base na literatura.

A análise comparativa demonstra que as tecnologias atualmente disponíveis apresentam potencial para transformar o processo de inspeção da pintura industrial. A integração da visão computacional com a Inteligência Artificial, IoT e *Deep learning* permite a realização de inspeções automatizadas, o registro de resultados em tempo real, a ampliação da rastreabilidade do processo e a redução dos recursos consumidos nas atividades de avaliação da qualidade.

Contudo, é importante salientar que o presente estudo não visou desenvolver ou validar experimentalmente uma solução tecnológica, mas antes avaliar a sua viabilidade conceitual. Esta avaliação foi realizada com base no estudo de caso propositivo e nas evidências disponíveis na literatura científica. Desta forma, não é viável afirmar que uma tecnologia específica seja capaz de substituir integralmente os ensaios destrutivos atualmente empregados, uma vez que essa hipótese depende de validações técnicas em ambiente industrial.

Ainda assim, a convergência entre os resultados obtidos no estudo de caso e o estado da arte indica que a aplicação integrada de Visão Computacional, Aprendizagem Profunda, sensores inteligentes e análise de dados constitui uma alternativa tecnicamente promissora para reduzir a dependência de ensaios destrutivos, preservando a integridade das peças, reduzindo o tempo de inspeção, diminuindo os custos associados ao processo de avaliação da qualidade e fortalecendo a rastreabilidade e a eficiência do controle da qualidade da pintura de tanques motociclisticos.

14

O Problema atual dos testes destrutivos é muito usado na indústria para garantir a qualidade da pintura em peças de metal. Testes como aderência, dureza e resistência ao xileno servem para conferir se a pintura está dentro do padrão, o problema é que esses métodos têm várias desvantagens: estragam a peça, demoram muito, dão retrabalho, custam caro e trazem risco para quem opera. Na análise feita, cada teste leva cerca de 20 minutos. Se a peça reprovar, para arrumar e pintar de novo pode levar até 2h35. Como são testadas cerca de 120 peças por mês, isso derruba bastante a produção, por isso, a Visão Computacional junto com a Inteligência Artificial aparece como uma saída, pois ela consegue reduzir ou até acabar com a maior parte dos testes destrutivos, aumentar a quantidade de peças conferidas, cortar gastos e deixar o processo mais seguro.

Como será a Solução: A ideia é montar um sistema automático com câmeras industriais de alta qualidade, Luz LED controlada por Sensores sem contato para medir espessura, Inteligência Artificial treinada com milhares de fotos Programa de Visão Computacional ligado

direto na linha de produção de modo que o sistema vai ficar logo depois da estufa. Assim que a peça sair, ela vai direto para estação de conferência. Em poucos segundos o sistema tira fotos de toda a superfície e vai analisar pontos como: Pintura uniforme, espessura, escorrido, efeito casca de laranja, falhas, bolhas, sujeira, riscos, rachaduras, defeitos, contaminação, brilho e diferença de cor e tudo isso sem encostar na peça. Como os Testes Destrutivos serão trocados a proposta não acaba só com a conferência feita por pessoas, mas também corta muito os testes destrutivos. Teste de Espessura o aparelho manual será trocado por sensores a laser ou magnéticos. Eles medem centenas de pontos em segundos. Teste de Aderência - *Cross-cut* hoje é preciso cortar a tinta com estilete, colar fita e arrancar parte da pintura, com a Visão Computacional dá para identificar sinais na superfície que mostram se a aderência está boa, assim o teste destrutivo só seria usado para validação no início, auditorias e conferência de amostras de teste de Dureza. A dureza pode ser acompanhada de forma indireta controlando a temperatura da estufa, tempo de secagem, espessura, umidade, temperatura do ambiente e grossura da tinta. Com esses dados, os programas conseguem prever se a tinta ficou dura como deveria. Teste de Resistência ao Xileno a resistência depende da cura da tinta monitorando a temperatura, tempo de cura, lote da tinta e espessura. Como o Sistema vai funcionar a peça sai da pintura Passa direto pela estação de inspeção as câmeras tiram várias fotos o programa acha qualquer defeito na superfície os sensores medem a espessura a IA compara com milhares de peças boas em segundos sai um relatório de aprovado ou reprovado se tiver defeito, a peça já é separada para arrumar antes de ir para próxima etapa. Ganhos Esperados na produção: Um teste destrutivo leva 20 min o sistema novo leva de 5 a 15 segundos, assim dá para conferir quase 100% das peças. Menos gasto: Acabar com o *Cross-cut* reduz perda de peça, gasto com fita, estilete, retrabalho, tinta, primer e horas de trabalho. Mais segurança: O funcionário para de usar estilete e xileno toda hora, diminuindo risco de acidente e contato com química. Controle melhor: Todas as fotos ficam salvas. Isso ajuda em auditorias e no histórico da qualidade. Padrão igual: A avaliação não depende mais só do olho humano, reduzindo erro. Como implantar pode ser feito aos poucos. No começo o sistema só ajuda os inspetores, Depois de testado, parte dos testes destrutivos pode ser trocada. Nesta fase final, os testes destrutivos ficariam só para aprovar material novo, validar processo novo, auditoria de cliente e conferência por amostra. Assim os custos caem sem perder a confiança no processo.

Portanto, a utilização da Visão Computacional integrada à Inteligência Artificial representa um importante avanço para a inspeção da pintura industrial. Com a instalação de câmeras industriais, sensores sem contato e um sistema com milhares de imagens, torna-se possível inspecionar praticamente 100% das peças em poucos segundos, identificando defeitos como escorrimentos, bolhas, riscos, falhas de pintura, diferença de cor, brilho inadequado, contaminações e medindo a espessura da camada de tinta sem contato físico. Além disso, o monitoramento contínuo de variáveis como temperatura da estufa, tempo de cura, umidade, espessura da tinta e condições do processo permite prever, com alta confiabilidade, os resultados dos ensaios de aderência, dureza e resistência ao xileno, reduzindo a necessidade de realizar esses testes de forma destrutiva em todas as peças. Como consequência, o tempo de inspeção é reduzido de aproximadamente 20 minutos para apenas 5 a 15 segundos por peça, diminuindo significativamente os custos com retrabalho, desperdício de tinta, primer, materiais de ensaio e mão de obra. A solução também aumenta a segurança dos operadores ao reduzir o contato com estiletes e produtos químicos, padroniza as inspeções ao eliminar a subjetividade da avaliação visual e mantém um histórico completo das imagens e resultados para rastreabilidade e auditorias. Dessa forma, os ensaios destrutivos passam a ser utilizados apenas para validação inicial do sistema, homologação de novos materiais, auditorias e inspeções por amostragem, enquanto a inspeção automatizada garante a qualidade do processo de forma contínua, rápida e confiável.

De acordo com as perspectivas econômica e de segurança ocupacional (Tabela 1 e Tabela 2), este fluxo acarreta um custo anual estimado de 426.268,80 reais e expõe diretamente os operadores a riscos de corte por estiletes e à inalação do solvente químico xileno. Em conformidade com as teorias de Juran e De Feo (2017), o elevado custo de avaliação observado não decorre da incidência de falhas produtivas ou defeitos de fabricação, mas sim da própria natureza destrutiva dos ensaios. Esta realidade evidencia uma desconexão prática com os preceitos de eficiência e eliminação de desperdícios da Indústria 4.0 estabelecidos por Kagermann, Wahlster e Helbig (2013). A confrontação dos indicadores em questão com o estado da arte na literatura científica, nomeadamente o processamento digital de imagens, conforme abordado por Szeliski (2022), e os modelos de *Deep Learning* e Redes Neurais Convolucionais discutidos por Goodfellow, Bengio e Courville (2016), fundamenta a viabilidade conceitual da transição para uma inspeção não destrutiva automatizada. Conforme detalhado no mapeamento

comparativo (Tabela 3), a substituição dos testes invasivos manuais por sensores magnéticos ou a laser e algoritmos de inteligência artificial alimentados com dados do processo permite prever a espessura, a aderência e a cura química de forma não invasiva. Esta proposta inovadora alinha a prática de manufatura com o monitoramento preventivo e contínuo defendido por Montgomery (2020), viabilizando uma cobertura de inspeção de 100% das peças em poucos segundos, preservando a integridade física dos tanques de combustível motociclísticos e mitigando integralmente a exposição de operadores a riscos ocupacionais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do estudo demonstram que o processo de inspeção da qualidade da pintura de tanques motociclísticos, embora tecnicamente confiável, depende de ensaios destrutivos que têm um impacto significativo no tempo de produção, nos custos operacionais, na utilização dos recursos produtivos e na segurança dos operadores. A necessidade de retrabalho decorre diretamente da execução dos testes e não da identificação de defeitos nas peças. Diante deste cenário, o problema de pesquisa foi respondido ao demonstrar, por meio do estudo de caso e da revisão da literatura, que tecnologias da Indústria 4.0, como Visão Computacional, Inteligência Artificial, *Deep Learning* e análise de dados, apresentam potencial para reduzir a dependência desses ensaios, ampliando a capacidade de inspeção, fortalecendo a rastreabilidade e tornando o controle da qualidade mais eficiente. A principal contribuição deste estudo consiste na proposta de um modelo conceitual de inspeção inteligente, que integra tecnologias já consolidadas na literatura e que poderão orientar futuras iniciativas de modernização industrial. Contudo, dada a natureza do estudo, que é propositiva, não se procedeu à implantação nem à validação experimental da solução proposta, o que constitui a sua principal limitação. Recomenda-se, portanto, que futuras investigações sejam desenvolvidas em ambiente industrial, de modo a avaliar o desempenho destas tecnologias na predição de propriedades do revestimento, tais como a aderência, a dureza e a qualidade da cura, bem como os seus impactos sobre a produtividade, os custos operacionais e a confiabilidade do processo de inspeção.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. R. O Brasil e a nanotecnologia: rumo à quarta revolução industrial. Espaço Acadêmico, Maringá, ano VI, n. 52, set. 2005.

- BOUER, R. et al. *Gestão da Qualidade: Teoria e Casos*. 3. ed. São Paulo: Elsevier, 2016. 732 p.
- CAMPOS, Vicente Falconi. *Qualidade Total: Padronização de Empresas*. Nova Lima : Falconi, 2014.
- CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. *Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto*. 6. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.
- DATHEIN, R. *Inovação e Revoluções industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX*. Publicações DECON Textos Didáticos, Porto Alegre, n. 02/2003, DECON/UFRGS, fev. 2003.
- GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.
- JURAN, J. M.; DE FEO, J. A. *Juran's quality handbook: the complete guide to performance excellence*. 7. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. (org.). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry*. Frankfurt: National Academy of Science and Engineering (acatech), 2013.
- KRUGER, J. M. *Metodologia da pesquisa em Administração: em linguagem descomplicada*. 1. ed. Curitiba: Bagai, 2023. E-book.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. *Fundamentos de metodologia científica*. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- MIGUEL, P. A. C. (org.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- MIRANDA, F. S. M. P. *A Mudança do Paradigma Econômico, a Revolução Industrial e a Positivização do Direito do Trabalho*. *Revista Eletrônica Direito*, v. 3, n. 1, p. 11-12, 2012.
- MONTGOMERY, D. C. *Introduction to statistical quality control*. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.
- NADAE, J.; OLIVEIRA, J. A.; OLIVEIRA, O. J. *Um estudo sobre a adoção dos programas e tanque em empresas com certificação ISO 9001: estudos de casos múltiplos*. *GEPROS: Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, ano 4, n. 4, p. 93-114, 2009.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SCHWAB, Klaus. A quarta revolução industrial. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

SZELISKI, R. Computer vision: algorithms and applications. 2. ed. Cham: Springer, 2022.

TAURION, Cezar. BIG DATA. ED. RIO DE JANEIRO: BRASPORT, 2013.

TRINDADE, A.; PEREIRA, G.; HOUNSELL, M. Chão interativo e jogos sérios ativos para autistas: A plataforma t-tea e o jogo repetea. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOGOS E ENTRETENIMENTO DIGITAL, 21., 2022. Anais Estendidos... Porto Alegre: SBC, 2022. p. 512-521.

VALENTE, B. A. L. Um middleware para a Internet das coisas. 2011. Tese (Doutorado) — Sistemas Integrados de Bibliotecas Repositórios, Lisboa, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt>. Acesso em: 8 jul. 2026.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZU, X. Infrastructure and core quality management practices: how do they affect quality? International Journal of Quality & Reliability Management, v. 26, n. 2, p. 129-149, 2009.