

INSPEÇÃO DE VIDROS LAMINADOS COM USO DE IA

Almir Rodrigues da Silva¹; Valdeci Donizete Gonçalves²; Elton Oliveira Ferreira³; Ivan Lucas Arantes⁴

¹ Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (almir.silva@aluno.ifsp.edu.br).

² Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (valdecidgoncalves@ifsp.edu.br).

³ Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (elton.ferreira@ifsp.edu.br).

⁴ Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (ivanlucas@ifsp.edu.br).

Resumo: Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de inspeção visual automatizado voltado para a detecção de falhas em vidros laminados, utilizando técnicas avançadas de Inteligência Artificial e Visão Computacional. No cenário industrial contemporâneo, a inspeção visual de vidros ainda é predominantemente realizada de forma manual por operadores humanos posicionados em linhas de produção. No entanto, esse método tradicional apresenta limitações críticas e desafios inerentes à natureza humana, como a fadiga ocular após longos períodos de exposição, a variabilidade subjetiva de julgamento entre diferentes avaliadores e a baixa repetibilidade, fatores que comprometem severamente a eficiência em linhas de produção contínuas e de alta velocidade. Com o advento e a consolidação da Indústria 4.0, a integração de soluções baseadas em redes neurais profundas e aprendizado profundo (*Deep Learning*) surge como uma alternativa robusta e escalável para a automação completa do controle de qualidade. O objetivo central deste estudo foi projetar, implementar e validar um modelo computacional capaz de identificar defeitos típicos em vidros laminados, como bolhas, trincas, riscos e impurezas, garantindo alta precisão diagnóstica. A metodologia empregada consistiu na estruturação de um *pipeline* completo de visão computacional, iniciando pela aquisição de um conjunto de dados (*dataset*) proprietário, composto por imagens reais de vidros capturadas em condições variadas de iluminação e posicionamento. Posteriormente, foi realizada a etapa de anotação supervisionada das falhas através da plataforma Makesense.ai, permitindo o treinamento guiado do algoritmo. Para o processamento e análise das imagens, utilizou-se a arquitetura YOLOv11 (*You Only Look Once*), escolhida por sua reconhecida eficiência em detecção de objetos em tempo real e arquitetura otimizada para dispositivos de borda. O modelo foi treinado e validado em ambiente controlado, onde foram realizados ajustes finos em hiperparâmetros para otimizar a sensibilidade do sistema e reduzir falsos negativos. Os resultados experimentais demonstraram um desempenho de 91,5% em *Precision*, 86,5% em *Recall* e um mAP50 de 92,6% no conjunto de teste. A análise da matriz de confusão validou a robustez do sistema, que apresentou um tempo médio de inferência de apenas 1,9 ms por imagem. O sistema mostrou-se plenamente capaz de operar de forma autônoma, identificando falhas milimétricas que frequentemente passam despercebidas ao olho humano sob condições de estresse e ruído industrial. Conclui-se que a proposta apresentada é tecnicamente viável e oferece uma contribuição significativa para a modernização dos processos fabris no setor de vidros, permitindo uma redução substancial no descarte desnecessário de materiais e um aumento direto na confiabilidade

do produto final entregue ao consumidor. A implementação deste sistema automatizado não apenas otimiza o fluxo produtivo e reduz custos operacionais, mas também eleva os padrões de segurança e qualidade exigidos pelo rigoroso mercado global de vidros laminados.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Visão Computacional; Inspeção Industrial; Vidros Laminados; YOLOv11.

LAMINATED GLASS INSPECTION USING AI

Almir Rodrigues da Silva¹; Valdeci Donizete Gonçalves²; Elton Oliveira Ferreira³; Ivan Lucas Arantes⁴

¹ Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (almir.silva@aluno.ifsp.edu.br).

² Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (valdecidgoncalves@ifsp.edu.br).

³ Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (elton.ferreira@ifsp.edu.br).

⁴ Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Campus São José dos Campos. (ivanlucas@ifsp.edu.br).

Abstract: This study addresses the development of an automated visual inspection system for detecting defects in laminated glass, utilizing advanced Artificial Intelligence and Computer Vision techniques. In the contemporary industrial landscape, the visual inspection of glass is still predominantly performed manually by human operators positioned along production lines. However, this traditional method presents critical limitations and challenges inherent to human nature, such as eye fatigue after long periods of exposure, subjective judgment variability among different evaluators, and low repeatability—factors that severely compromise efficiency in continuous and high-speed production lines. With the advent and consolidation of Industry 4.0, the integration of solutions based on deep neural networks and Deep Learning emerges as a robust and scalable alternative for the full automation of quality control. The central objective of this study was to design, implement, and validate a computational model capable of identifying typical defects in laminated glass, such as bubbles, cracks, scratches, and impurities, ensuring high diagnostic precision. The methodology consisted of structuring a complete computer vision pipeline, starting with the acquisition of a proprietary dataset composed of real glass images captured under varied lighting and positioning conditions. Subsequently, the supervised annotation of flaws was performed through the Makesense.ai platform, allowing for guided algorithm training. For image processing and analysis, the YOLOv11 (You Only Look Once) architecture was used, chosen for its recognized efficiency in real-time object detection and an optimized architecture for edge devices. The model was trained and validated in a controlled environment, where fine adjustments to hyperparameters were made to optimize system sensitivity and reduce false negatives. Experimental results demonstrated a performance of 91.5% in Precision, 86.5% in Recall, and a mAP50 of 92.6% on the test set. The confusion matrix analysis validated the system's robustness, which presented an average inference time of only 1.9 ms per image. The system proved fully capable of operating autonomously, identifying millimetric flaws that often go unnoticed by the human eye under conditions of industrial stress and noise. It is concluded that the presented proposal is technically feasible and offers a significant contribution to the modernization of manufacturing processes in the glass sector, allowing for a substantial reduction in unnecessary material waste and a direct increase in the reliability of the final product delivered to the consumer. The implementation of this automated system not only optimizes production flow and reduces

operational costs, but also raises the safety and quality standards required by the rigorous global market for laminated glass.

Keywords: Artificial Intelligence; Computer Vision; Industrial Inspection; Laminated Glass; YOLOv11.