www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/jzzgy312

Proposta de sistema de monitoramento de falhas nos cordões de solda e detecção de descontinuidades no processo

Proposal of a system for monitoring weld bead defects and detecting discontinuities during the process

Angélica Gonçalves Nunes[1]
Ednilson Silva Andrade[2]
Lucas Barbosa Porto[3]
Gabriel Souza Galdino[4]
Thadeu Alfredo Farias Silva[5]

Resumo

Na fabricação de eixos para veículos pesados, o processo de soldagem é utilizado para unir o flange ao eixo da estrutura do veículo. Este trabalho apresenta diversos pontos de melhoria na soldagem industrial voltados à fabricação desses componentes. Identifica-se um procedimento fabril no qual são caracterizados defeitos microestruturais, como porosidade do material, mordeduras, trincas e deslocamento de solda. Com base nos estudos realizados, propõe-se um novo método de fabricação para reduzir as perdas de materiais e aprimorar a qualificação da mão de obra. Por meio da implementação do monitoramento do processo via câmeras fotográficas e sensores, obtêm-se imagens de alta resolução que indicam áreas específicas de falha no cordão de solda. Essa abordagem visa estabelecer um controle de qualidade eficaz para alcançar melhores resultados na fabricação do eixo, além de reduzir impactos financeiros e ambientais e melhorar os índices de manutenção.

Palavras-Chave: Soldagem MAG; Arame tubular; Processo de soldagem

Abstract

[1] Faculdade de Tecnologia de Osasco – Osasco – São Paulo – Brasil. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1426-5557
[2] Faculdade de Tecnologia de Osasco – Osasco – São Paulo – Brasil. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1031-0120
[3] Faculdade de Tecnologia de Osasco – Osasco – São Paulo – Brasil. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3841-7607
[4] Faculdade de Tecnologia de Osasco – Osasco – São Paulo – Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7885-6760
[5] Universidade de Campinas – Campinas – Brasil. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9652-4632

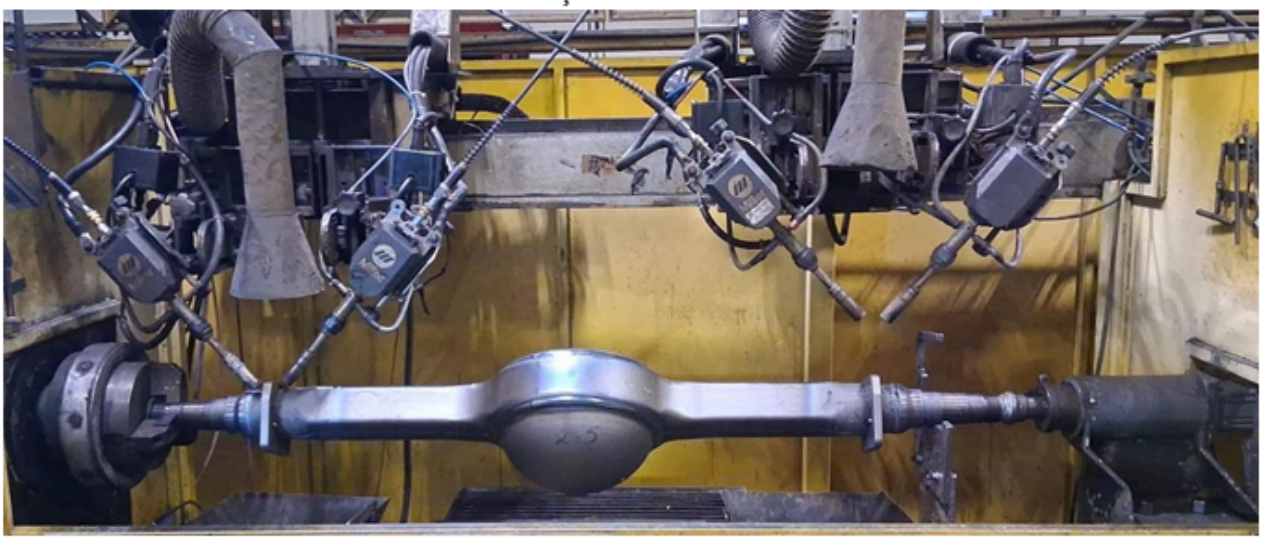
In the manufacturing of axles for heavy-duty vehicles, a welding process is used to join the flange to the axle shaft. This paper presents several areas for improvement in the industrial welding of these components. A manufacturing procedure is identified that is prone to microstructural defects, such as material porosity, undercut, cracks, and weld displacement. Based on the studies conducted, a new manufacturing method is proposed to reduce material waste and enhance workforce qualification. By implementing process monitoring via cameras and sensors, high-resolution images are obtained, revealing specific areas of failure within the weld bead. This approach aims to establish effective quality control to achieve superior results in axle manufacturing, while simultaneously reducing financial and environmental impacts and improving maintenance metrics.
Keywords: MAG welding; Metal cored; Welding process

1 Introdução

Na fabricação de eixos de caminhões, a união dos flanges à carcaça é realizada pelo processo de soldagem MAG (Metal Active Gas). Esse método semiautomático baseia-se na fusão por arco elétrico com o emprego de arame sólido e gás ativo de proteção. No posto operacional analisado, a operação conta ainda com um dispositivo de fixação (gabarito) que assegura o alinhamento e o posicionamento preciso dos componentes antes da soldagem, conforme relatado em LOPERA, Jesús Emilio Pinto, 2011.

A Figura 1 apresenta o equipamento de soldagem MAG multiprocesso, configurado como uma proposta de uma máquina semiautomática em que um eixo rotativo e quatro tochas operam de forma integrada para garantir a precisão e a eficiência na união dos flanges.

Figura 1 - Processo de soldagem do flange finalizado no dispositivo de fixação, com inserção de sensores.

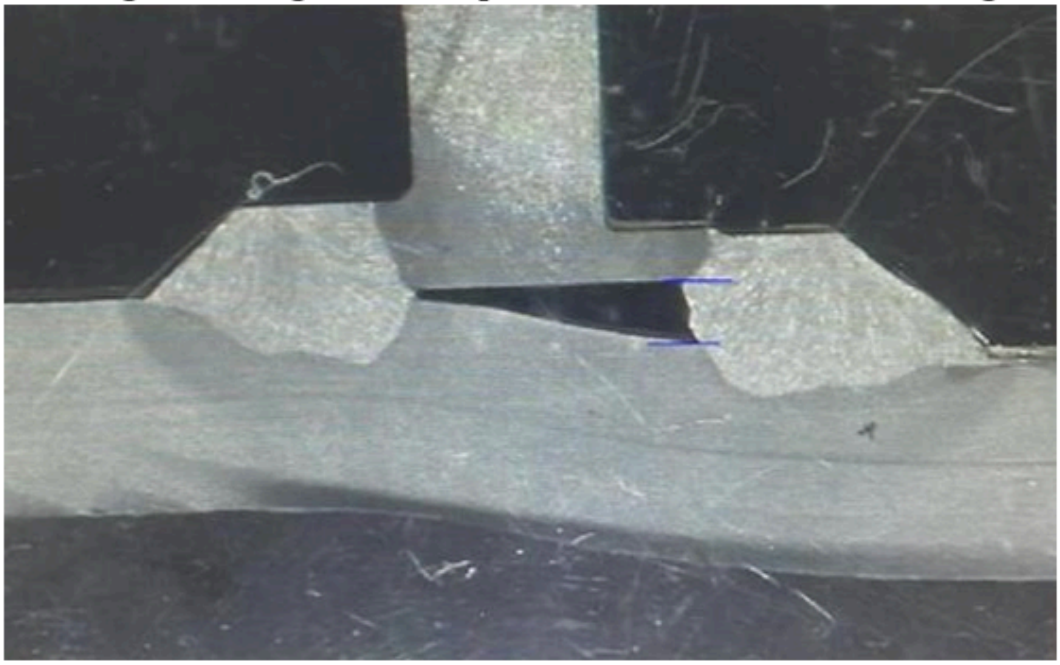


Fonte: Próprio Autor (2026).

Durante a soldagem dos eixos de caminhões, observa-se descontinuidades como porosidades, mordeduras e trincas a frio. Outros problemas operacionais decorrem do posicionamento incorreto dos componentes no dispositivo de fixação e da higienização deficiente dos bocais metálicos das tochas. A presença de impurezas nestes bocais altera o fluxo do gás de proteção e provoca turbulência, o que reduz a eficiência da blindagem da poça de fusão.

A Figura 2 apresenta a macrografia do eixo em vista de corte total para a análise da solda. Evidencia-se uma falha na união entre o flange e a carcaça, atribuída a um posicionamento inadequado do componente no dispositivo de fixação.

Figura 2 - Imagem macrografa de um posicionamento incorreto do flange no eixo.



Fonte: Próprio autor (2026).

Na Figura 3, observa-se o detalhe ampliado da macrografia em corte total, empregado para aprofundar a avaliação do cordão de solda. Essa visualização evidencia com maior clareza a falha de união entre o flange e a carcaça, associada ao posicionamento inadequado da peça no dispositivo de fixação.

Figura 3 - Imagem macrografa aproximada de uma falha de soldagem.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A análise do processo identificou pontos críticos passíveis de melhoria, uma vez que desvios operacionais podem originar defeitos como porosidade, mordeduras, trincas e deslocamento de solda. Tais descontinuidades acarretam retrabalhos, desperdício de insumos e subaproveitamento de mão de obra qualificada. A partir desse diagnóstico, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para aprimorar o controle de qualidade e elevar o padrão de fabricação dos eixos.

2 Revisão da Literatura

Os processos de soldagem são qualificados conforme a norma da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), Seção IX, para garantir a padronização dos processos e a repetibilidade do resultado pretendido. O material da carcaça estampada é o aço SAE 1020, enquanto a fabricação do flange é realizada por meio de forjamento — método que produz uma estrutura de grãos densa e contínua, resultando em flanges mais rígidos e resistentes a falhas.

Conforme a definição da *American Welding Society* (AWS), a soldagem consiste em um processo de união no qual a coalescência dos materiais é obtida por aquecimento a temperaturas apropriadas, podendo incluir o uso de pressão e de material de adição. No âmbito industrial, a Seção IX da ASME (QW-100) estabelece as diretrizes para a qualificação de procedimentos e de soldadores. A aplicação dessas normas garante a obtenção de juntas soldadas com integridade metalúrgica e mecânica, assegurando a repetibilidade e o rigor no controle de qualidade.

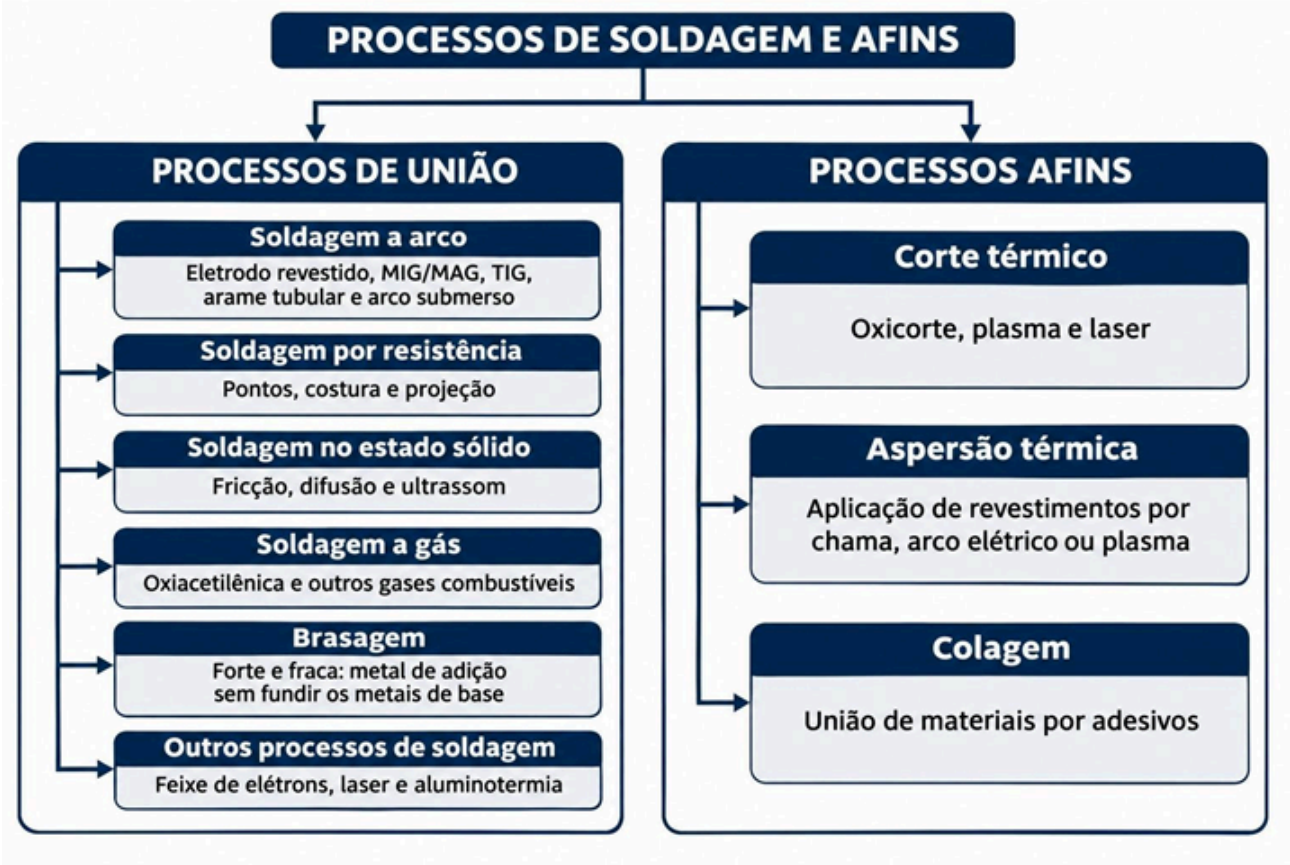
A norma *International Organization for Standardization* (ISO) 4063 (2023) classifica os processos de soldagem como métodos de união de materiais por fusão ou pressão, estruturando-os em categorias padronizadas, a exemplo dos processos MIG/MAG, TIG e por eletrodo revestido.

2.1 Processo MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa, conhecida internacionalmente como *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), é um processo utilizado para unir peças metálicas por meio do calor gerado por um arco elétrico. Esse arco é estabelecido entre um eletrodo metálico nu e consumível e a peça de trabalho. Para evitar que a solda seja contaminada pela atmosfera, utiliza-se um gás ou uma mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. No Brasil, esse processo recebe duas denominações: MIG (*Metal Inert Gas*), quando a proteção é feita com gases inertes ou misturas ricas em gases inertes; e MAG (*Metal Active Gas*), quando se empregam gases ativos ou misturas predominantemente ativas.

A Figura 4 mostra a definição de etapas com os tipos de proteções nos processos de soldagem e qual a sua melhor aplicação.

Figura 4 - Fluxograma de etapas do processo.



Fonte: Silva, A. B. 2014.

3 Metodologia

Para o desenvolvimento da proposta, este estudo estabelece as etapas necessárias à implementação do sistema de monitoramento, compreendendo a definição dos parâmetros do processo de soldagem, tais como corrente elétrica, tensão, velocidade de alimentação do arame e tipo de gás de proteção.

Em seguida, propõe-se a execução de um cordão de solda controlado, com o objetivo de possibilitar a identificação de possíveis falhas e descontinuidades geradas durante o procedimento.

A investigação dessas descontinuidades será conduzida por meio de inspeção visual, utilizando-se como ferramentas principais medições estruturais e parâmetros qualitativos de visualização, conforme descrito em MÓL, Gerson de Souza, 2017. Essa etapa visa avaliar o cordão de solda e os fundamentos das descontinuidades, destacando-se variações térmicas,

porosidade, falta de fusão e irregularidades geométricas. Os dados obtidos serão registrados para subsidiar análises posteriores e a identificação de oportunidades de melhoria no processo.

A implementação do monitoramento fundamenta-se na padronização dos cordões durante a execução, permitindo intervenções imediatas. Ao detectar qualquer irregularidade, o processo poderá ser interrompido para que o operador realize os ajustes necessários, assegurando a qualidade e a confiabilidade da junta soldada. A avaliação do perfil do cordão obedece aos critérios estabelecidos por normas técnicas vigentes, como as diretrizes da *American Welding Society* (AWS) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as quais definem parâmetros de aceitabilidade relacionados à geometria e à presença de descontinuidades, garantindo a padronização da inspeção.

Para a execução experimental, empregam-se equipamentos de soldagem *Metal Active Gas* (MAG), consumíveis (arames eletrodos e gás de proteção), câmeras e sistema de iluminação adequado para a captura de imagens e verificação do procedimento, visando auxiliar na avaliação técnica da operação.

Com base na metodologia apresentada, a proposta busca garantir maior eficiência na detecção de falhas e descontinuidades em tempo real, promovendo o controle de qualidade, a padronização da soldagem e a redução de retrabalhos.

4 Resultados e Discussão

A Figura 5 trata-se de um projeto mecânico que mostra pontos de fixação dos componentes a serem instalados para melhoria do processo de soldagem MAG.

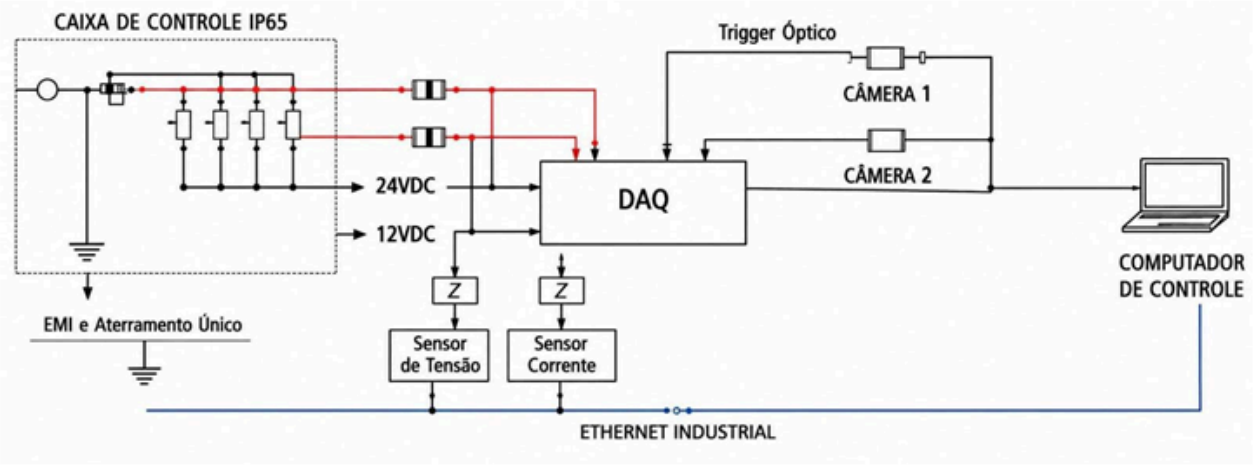
Figura 5 - Projeto mecânico proposto, com adaptações.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A Figura 6 apresenta o sistema de entrada e saída de dados voltado ao controle sistêmico e à melhoria da qualidade, que integra a instrumentação ao sistema de controle industrial. O sistema é composto por: fonte de alimentação de 24 VDC e 12 VDC, com proteção individual; sensores de corrente e tensão elétrica, que coletam os dados do processo de soldagem; câmeras, responsáveis pela sincronização óptica; integração com o sistema óptico, com proteção contra poeira (classificação IPXX); aterramento e blindagem eletromagnética; e comunicação com a rede Ethernet industrial já existente na planta. (BAUMGAERTNER FILHO, 2017)

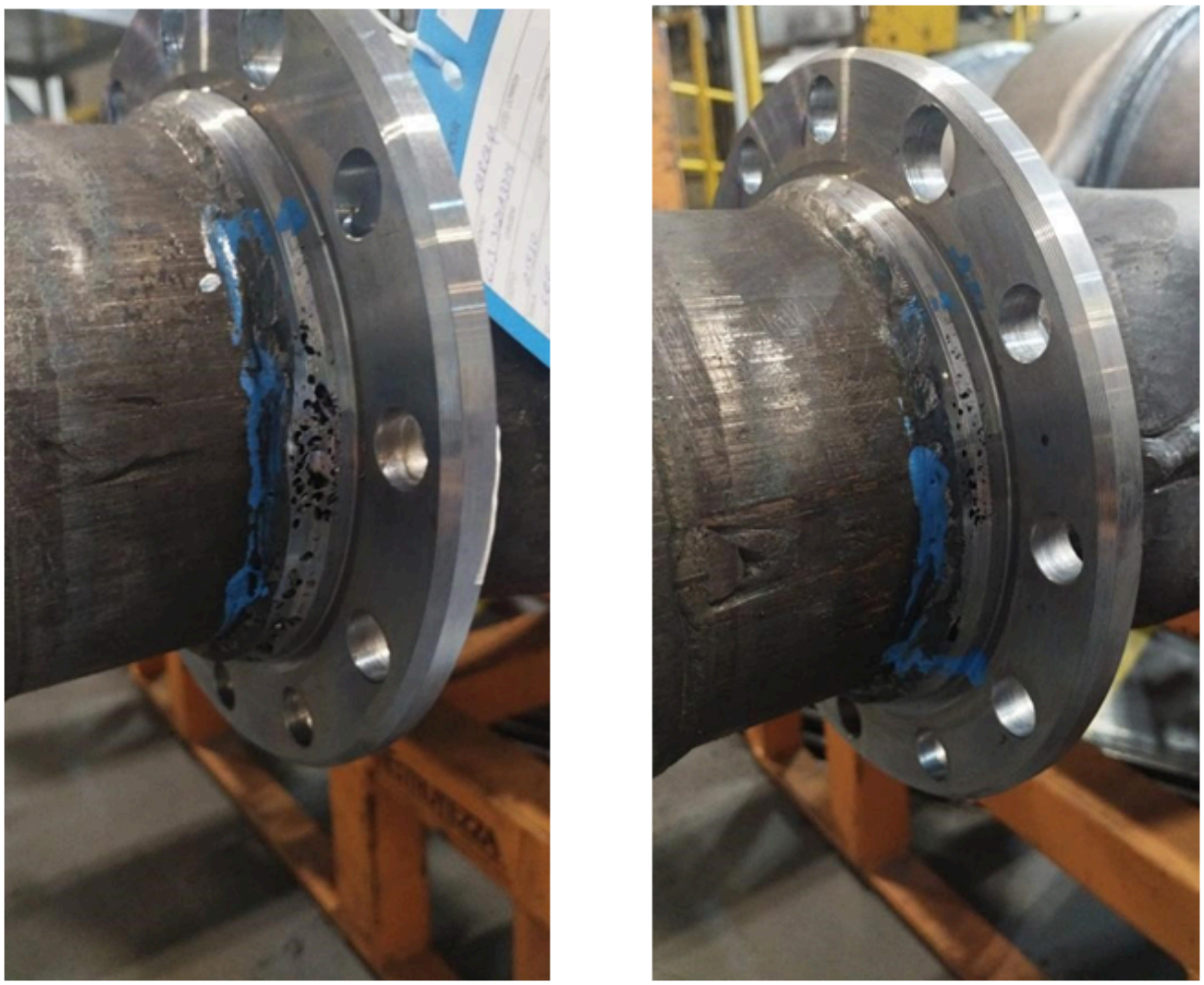
Figura 6 – Projeto elétrico proposto para controle do sistema e instrumentação industrial.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A Figura 7 mostra peças com falhas identificadas durante o processo produtivo, que exigem retrabalho.

Figura 7 – (a) e (b) Peças produzidas com falha de qualidade, em processo produtivo, com necessidade de retrabalho.



(a) (b)

Fonte: Próprio Autor (2026).

Nas peças produzidas com o controle das variáveis apontadas e com as melhorias propostas, observam-se ganho econômico, menor consumo de insumos e redução dos impactos ocupacionais e ambientais. A Figura 8 mostra peças com melhor acabamento e qualidade assegurada na produção.

Figura 8 – (a) e (b) Peças produzidas com o possível ganho da qualidade, com o controle das variáveis propostas.



(a) (b)

Fonte: Próprio Autor (2026).

Além dos ganhos ambientais e econômicos na produção, há outros custos a considerar: o retrabalho, o acionamento da garantia por falha da peça, os acidentes ligados ao eixo e a perda de qualidade do produto final. Segundo os dados levantados, em uma produção média de 250 peças por dia, retornam de 2 a 3 peças diariamente, o que equivale a cerca de 540 peças retrabalhadas por ano. Esses retornos comprometem a qualidade final e a credibilidade do produto.

O cálculo de 540 peças retrabalhadas por ano é consistente com um calendário fabril padrão de 240 dias úteis (considerando uma média de 2,25 peças retrabalhadas por dia, exatamente no centro da faixa de 2 a 3 peças).

A economia gerada pelo sistema proposto divide-se em três frentes principais:

$$E_{total} = E_{retrabalho} + E_{insumos} + E_{garantia} \quad (1.1)$$

Economia com Retrabalho: 540 peças/ano × Custo médio de retrabalho por peça *(inclui horas-homem de lixamento/ressoldagem, energia e nova inspeção)*.

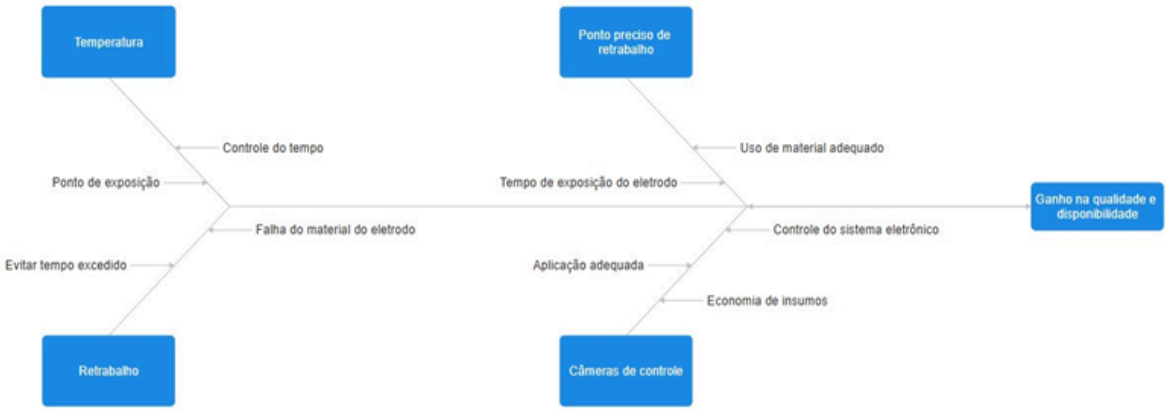
Economia de Insumos na Linha: peças/ano × Economia unitária de arame e gás *(o controle de corrente/tensão evita deposição excessiva e respingos)*.

Custos Evitados de Garantia e Passivos: Nº de falhas em campo evitadas × Custo de logística reversa, reposição e indenizações.

Com esses ganhos, é possível elevar o volume produzido e uniformizar a fabricação, mantendo a qualidade final das peças.

Como estratégia para a implantação final do sistema, propõe-se uma gestão técnica integrada à manutenção da fábrica, que utilize as falhas identificadas e suas soluções para apoiar decisões estratégicas, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 Diagrama dos ganhos do processo produtivo e gestão da produção e manutenção industrial.



Fonte: Próprio Autor (2026).

A implementação do sistema de monitoramento em tempo real proporciona ganhos significativos no controle de qualidade dos cordões de solda, assegurando maior padronização, estabilidade e confiabilidade na fabricação de juntas soldadas. Por meio do acompanhamento contínuo dos parâmetros de soldagem, torna-se possível identificar falhas e descontinuidades de forma imediata durante a execução, o que evita a propagação de defeitos ao longo da linha produtiva e reduz substancialmente a ocorrência de porosidade, trincas, mordeduras e falta de fusão.

Como consequência direta dessa detecção precoce, observa-se uma expressiva redução nos índices de retrabalho e de peças rejeitadas, otimizando o aproveitamento dos consumíveis e mitigando o desperdício de materiais e os custos operacionais. Além disso, a identificação digital automatizada das descontinuidades diminui a dependência da inspeção visual manual, auxiliando o operador na tomada de decisão, elevando a segurança operacional e promovendo um melhor aproveitamento da mão de obra em atividades mais estratégicas.

No âmbito da gestão da produção e da manutenção, o monitoramento contínuo reduz a incidência de paradas não programadas e eleva a disponibilidade operacional dos equipamentos. Esse cenário reflete-se diretamente na melhoria dos indicadores de desempenho, promovendo o aumento do Tempo Médio Entre Falhas — Mean Time Between Failures (MTBF) — e a redução do Tempo Médio Para Reparo — Mean Time To Repair (MTTR). Dessa forma, a proposta consolida um processo fabril mais eficiente, seguro e alinhado ao aumento da produtividade industrial.

5 Conclusão

Conclui-se que a integração entre as adaptações mecânicas e o sistema de instrumentação e controle industrial representa uma solução tecnicamente viável e eficaz para a otimização do processo de soldagem MAG. O monitoramento contínuo das variáveis críticas — como corrente, tensão elétrica e sincronização óptica — aliado à proteção física e eletromagnética dos componentes na rede industrial, assegura maior estabilidade operacional e rastreabilidade na linha de produção.

Os resultados demonstram que o controle rigoroso do processo eleva o padrão de acabamento e a uniformidade das peças, mitigando falhas recorrentes que antes resultavam em cerca de 540 retrabalhos anuais, custos com garantia e riscos de acidentes associados ao eixo. Além de fortalecer a confiabilidade do produto final e permitir o aumento do volume produtivo, a proposta promove a redução do consumo de insumos e minimiza os impactos ambientais e ocupacionais.

A implementação do sistema de monitoramento em tempo real eleva a qualidade e a confiabilidade dos cordões de solda por meio da detecção imediata de falhas e descontinuidades. Essa abordagem preventiva reduz drasticamente os índices de retrabalho, o desperdício de consumíveis e os custos operacionais, além de otimizar a mão de obra ao substituir a inspeção visual manual. Na gestão industrial, a tecnologia aumenta a disponibilidade dos equipamentos — refletida na melhoria direta dos indicadores de MTBF e MTTR — consolidando um processo fabril mais seguro, eficiente e produtivo.

Por fim, a consolidação dessas melhorias depende de uma implantação estruturada por meio de gestão técnica integrada entre a engenharia e a manutenção, garantindo a calibração contínua do sistema e a sustentabilidade dos ganhos econômicos e qualitativos a longo prazo.

Referências

ABNT. NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, ano.2024 Acesso em 23.mar.2026

ALESTIERI, J. A. P.; DIAS, R. A. “Ensinando a ensinar engenharia” no contexto do uso racional da energia. Cobenge, Juiz de Fora MG, p. 9, 2014.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel. Miami: AWS.2020 Acesso em 23.mar.2026

ASME. Boiler and Pressure Vessel Code – Section IX: Welding and Brazing Qualifications. New York: ASME.2021 Acesso em 23.mar.2026

BAUMGAERTNER FILHO, Alexandre José. Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: ufrgs.br. Acesso em: 17 agosto 2026

LOPERA, Jesús Emilio Pinto; RAMOS, Esdras Godinho; CARVALHO, Guilherme Caribé de; ALFARO, Sadek C. Absi. Uso da técnica de “perfilografia” para visualização dos modos de transferência metálica no processo de soldagem GMAW usando uma câmera CMOS de alta velocidade. *In*: BRAZILIAN CONFERENCE ON MANUFACTURING ENGINEERING, 6., 2011, Caxias do Sul: ABCM, 2011

MÓL, Gerson de Souza. Pesquisa qualitativa em ensino de química. Revista Pesquisa Qualitativa, *[S. l.]*, v. 5, n. 9, p. 495–513, 2017. Disponível em: https://editora.sepq.org.br/rpq/article/view/140. Acesso em: 17 agosto 2026

SO. ISO 3834: Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Geneva: ISO, 2021 Acesso em 23.mar.2026

SILVA, Alex Batista da PRODUTIVIDADE EM SOLDAGEM DE TUBULAÇÃO INDUSTRIAL: Análise Comparativa de Desempenho do Processo de Soldagem Mecanizado e Processo de Soldagem Manual / Alex Batista da Silva. – 2014

SOUZA, José Carlos de. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Acesso em: 27 abr.2026

VILLANI, Paulo. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. Acesso em 27: abr.2026