RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano V, v.1, n.1, jan/julho 2025. | submissão: 21/06/2025 | aceito: 23/06/2025 | publicação:25/06/2025

Poka-yokes e rastreabilidade em fundições de ferro: estratégias integradas para a qualidade e redução de refugos

Poka-yokes and traceability in iron foundries: integrated strategies for quality and scrap reduction

Guilherme Casagrande de Miranda – Fundação Getúlio Vargas (FGV)

RESUMO

Este artigo explora a sinergia entre Poka-Yokes e tecnologias de rastreabilidade para otimizar a qualidade do produto e reduzir o refugo em fundições de ferro, ambientes caracterizados por alta variabilidade de processo. Abordaremos como a implementação de dispositivos à prova de erros (Poka-Yokes) nos processos críticos, como fusão, tratamento de metal e vazamento, minimiza a ocorrência de defeitos. Concomitantemente, as tecnologias de rastreabilidade (RFID, IoT, MES), exemplificadas pelo sistema Ladle Tracker da SinterCast (SinterCast, [s.d.]) e pela solução DISA TAG da DISAGROUP (DISAGROUP, [s.d.]), e o monitoramento com câmeras infravermelhas da OPTRIS (OPTRIS, [s.d.]), garantem a identificação e o monitoramento contínuo das peças e seus parâmetros, desde a fusão até a desmoldagem. O objetivo é demonstrar como essa abordagem integrada não só previne falhas através de bloqueios automáticos, mas também permite a análise precisa da causa raiz de não conformidades, resultando em ganhos significativos de produtividade e qualidade.

Palavras-chave: Poka-Yoke. Rastreabilidade. Fundição. Qualidade. Refugo.

ABSTRACT

This article explores the synergy between Poka-Yokes and traceability technologies to optimize product quality and reduce scrap in iron foundries, environments characterized by high process variability. We will address how the implementation of error-proofing devices (Poka-Yokes) in critical processes, such as melting, metal treatment, and pouring, minimizes defect occurrence. Concomitantly, traceability technologies (RFID, IoT, MES), exemplified by SinterCast's Ladle Tracker system (SinterCast, [s.d.]) and DISAGROUP's DISA TAG solution (DISAGROUP, [s.d.]), and monitoring with infrared cameras like OPTRIS (OPTRIS, [s.d.]), ensure continuous identification and monitoring of parts and their parameters, from melting to demolding. The aim is to demonstrate how this integrated approach not only prevents failures through automatic blocking but also allows precise root cause analysis of non-conformities, resulting in significant gains in productivity and quality.

Keywords: Poka-Yoke. Traceability. Foundry. Quality. Scrap.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de fundição de ferro, com sua intrínseca complexidade e a influência de inúmeras variáveis de processo, enfrenta desafios contínuos na garantia da qualidade do produto e na minimização de refugos. Pequenos desvios em qualquer etapa podem levar a não conformidades, impactando a eficiência e a rentabilidade. Neste cenário, a integração de metodologias de prevenção de erros e tecnologias de monitoramento torna-se crucial. Este artigo propõe analisar a combinação estratégica de Poka-Yokes (dispositivos à prova de erros) nos processos críticos de fundição com a implementação de sistemas de rastreabilidade de produto. O objetivo é demonstrar como essa abordagem sinérgica pode não apenas prevenir a ocorrência de defeitos na fonte, através de bloqueios automáticos, mas também fornecer um histórico detalhado da produção, essencial para a análise de causa raiz e a melhoria contínua, abrangendo o processo desde a fusão do metal até a desmoldagem da peça.

2. MARCO TEÓRICO

A busca pela qualidade na manufatura tem levado à evolução de diversas metodologias e ferramentas. Duas abordagens, Poka-Yoke e Rastreabilidade, embora distintas em sua aplicação primária, mostram-se complementares para alcançar a excelência na produção de peças fundidas.

2.1 POKA-YOKES: A PREVENÇÃO DE ERROS NA FONTE

Poka-Yoke, termo japonês que significa "à prova de erros" ou "evitar erros inadvertidos", refere-se a qualquer mecanismo em um processo de manufatura que ajuda a evitar que erros ocorram ou a torná-los imediatamente óbvios. Desenvolvidos por Shigeo Shingo no sistema Toyota de produção, os Poka-Yokes são projetados para eliminar a possibilidade de defeitos humanos ou de processo, agindo antes ou no momento da ocorrência da falha. Em uma fundição, onde variáveis como temperatura, composição da liga, condições de molde e processo de vazamento são críticas, Poka-Yokes podem ser implementados para garantir que determinadas etapas sejam realizadas corretamente.

Em fundições, exemplos de Poka-Yokes incluem o uso de sensores de temperatura para garantir que o metal seja vazado apenas quando atinge a temperatura exata, evitando problemas de preenchimento ou solidificação irregular. Sistemas de encaixe são empregados para assegurar que machos ou partes do molde sejam montados na posição correta, impedindo

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

montagens invertidas ou desalinhadas. Além disso, a pesagem automatizada verifica o peso correto de aditivos ou ligas antes de serem adicionados ao forno, prevenindo composições químicas fora de especificação. Verificadores de presença, por sua vez, confirmam a existência de todos os componentes necessários antes da etapa de vazamento.

2.2 RASTREABILIDADE DE PRODUTOS: O HISTÓRICO COMPLETO DA QUALIDADE

A rastreabilidade é a capacidade de acompanhar o histórico, a aplicação ou a localização de um item ou sua característica por meio de identificações registradas. Em fundições, onde uma peça passa por inúmeras transformações e influências de variáveis, a rastreabilidade é crucial para identificar a origem de qualquer defeito. Ela permite que, diante de um refugo ou reclamação de cliente, seja possível reconstruir todo o processo produtivo daquela peça, desde o lote de matéria-prima até as condições de vazamento e tratamento térmico.

Para a rastreabilidade em fundições, diversas tecnologias podem ser empregadas. A Identificação por Radiofrequência (RFID) permite o rastreamento automatizado de itens, sendo um exemplo o **Ladle Tracker da SinterCast** (SinterCast, [s.d.]), que utiliza tags RFID anexadas a cada panela de transferência de metal. Antenas posicionadas em pontos-chave do processo rastreiam as panelas, registrando parâmetros do metal como temperatura, peso e composição química, conectando o histórico de moldagem ao histórico do metal líquido. Códigos de Barras e Códigos QR são soluções econômicas para identificar lotes ou peças específicas, registrando parâmetros de processo em pontos chave. A **DISAGROUP** oferece a solução **DISA TAG** (DISAGROUP, [s.d.]), que adiciona um ID único a cada peça fundida por meio de marcação automática no molde produzido, permitindo vincular a peça aos parâmetros de processo coletados durante a produção para investigação de defeitos. Sensores e a Internet das Coisas (IoT) possibilitam a coleta contínua de dados em etapas críticas (temperatura do metal, umidade da areia, pressão de injeção), que podem ser associados a peças específicas, criando um histórico detalhado. Câmeras infravermelhas, como as da **OPTRIS** (OPTRIS, [s.d.]), podem fornecer medições de temperatura online e sem contato, adicionando precisão aos dados de rastreabilidade. Por fim, Sistemas de Execução da Manufatura (MES - Manufacturing Execution Systems) integram dados de RFID, códigos de barras e sensores, fornecendo uma visão em tempo real e abrangente do processo, gerenciando ordens de produção, status de peças e controles de qualidade.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

3. MATERIAL E MÉTODO

Para este artigo, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática sobre Poka-Yokes, rastreabilidade e suas aplicações em processos de fundição de ferro. A pesquisa abrangeu bases de dados científicas, periódicos da área de engenharia de produção e metalurgia, além de literatura técnica sobre sistemas de gestão da qualidade e manufatura avançada (Indústria 4.0), incluindo tecnologias de empresas como SinterCast, DISAGROUP e OPTRIS. Foram analisados estudos de caso e artigos que descrevem a implementação bem-sucedida de ambas as metodologias em ambientes fabris, com foco em como a combinação impacta a redução de defeitos e a capacidade de análise. A coleta de dados qualitativos visou identificar as melhores práticas e os desafios inerentes à integração dessas ferramentas.

3.1 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO: POKA-YOKES E PONTOS DE RASTREABILIDADE

Para contextualizar a aplicação de Poka-Yokes e rastreabilidade, descrevemos as etapas principais do processo de fundição de ferro, apontando pontos críticos e a aplicação das ferramentas.

1. Fusão e Preparação do Metal. Nesta etapa, sucata e elementos de liga são carregados em fornos e fundidos, sendo a composição química e a temperatura do metal líquido cruciais para a qualidade final. Poka-Yokes aqui incluem sistemas automatizados de pesagem e dosagem de aditivos para garantir a proporção correta, impedindo o vazamento se a composição estiver fora da especificação. Sensores de temperatura contínuos também atuam como Poka-Yokes, bloqueando o vazamento do forno para a panela de transferência se a temperatura do metal estiver fora da faixa operacional ideal. Os parâmetros de rastreabilidade associados à panela de transferência via RFID (utilizando o **SinterCast Ladle Tracker** (SinterCast, [s.d.])) abrangem o ID do lote de fusão, composição química detalhada, temperatura exata do metal vazado, peso do metal na panela e o ID da própria panela.

2. Tratamento de Metal (na Panela de Transferência), que envolve processos como nodularização ou inoculação para ajustar a microestrutura do ferro. Poka-Yokes nesta fase incluem sensores que verificam a quantidade correta de material injetado, bloqueando o processo se a dosagem for incorreta, e controles de tempo de tratamento para garantir a duração mínima ou máxima. Os parâmetros de rastreabilidade adicionados à panela via RFID

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

incluem o tipo e quantidade de material injetado, o tempo de tratamento na panela e uma nova medição de temperatura do metal após o tratamento.

3. Moldagem e Confecção de Machos é a etapa de produção dos moldes e machos. Poka-Yokes aqui envolvem ferramentas e gabaritos que garantem o posicionamento correto dos machos no molde, impedindo montagens invertidas ou desalinhadas. Sensores de umidade e compactação da areia asseguram a qualidade do molde, bloqueando a continuidade se fora de especificação, e verificadores visuais ou sensores confirmam que todas as seções do molde estão montadas corretamente e sem rebarbas. Os parâmetros de rastreabilidade associados ao ID do molde (aplicado automaticamente pela solução **DISA TAG** (DISAGROUP, [s.d.])) incluem data e hora da moldagem, parâmetros da areia, ID dos machos utilizados (se aplicável) e o número da máquina de moldagem.

4. Vazamento é uma etapa crítica, onde o metal líquido é transferido para os moldes. Poka-Yokes neste ponto são fundamentais para prevenir defeitos; eles incluem controle de inoculação (sensores que verificam a quantidade correta), detecção de fluxo de metal para garantir início e fim corretos, detecção de tubo entupido por transmissor de pressão, controle de tempo de fading para evitar perda de efeito do inoculante, e controle de tempo de vazamento para evitar vazamentos interrompidos. A medição de temperatura online com sistemas como o da **OPTRIS** (OPTRIS, [s.d.]) atua como Poka-Yoke, bloqueando instantaneamente se a temperatura do vazamento estiver fora da faixa ideal. Os parâmetros de rastreabilidade adicionados ao ID da peça/molde incluem tempo de vazamento, quantidade de metal vazado, quantidade de inoculação no vazamento, tempo de fading, temperatura do metal durante o vazamento (registrada pelo sistema OPTRIS), ID da panela vazadora e todos os dados de processo de moldagem e areia previamente atribuídos.

5. Solidificação e Resfriamento, onde o metal líquido se solidifica. Um Poka-Yoke nesta fase é o controle de tempo de resfriamento, que bloqueia a desmoldagem da peça enquanto o tempo pré-determinado para aquela liga e espessura não for atingido, garantindo a completa solidificação e evitando tensões internas. Essa informação é gravada com a peça, tornando o tempo de permanência no molde/tempo de resfriamento real e as condições ambientais da área de resfriamento parâmetros de rastreabilidade associados ao ID da peça.

6. Desmoldagem e Acabamento envolve a remoção e processamento da peça fundida. Poka-Yokes aqui incluem gabaritos "passa/não passa" para verificar rapidamente se a peça está

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

dentro das tolerâncias dimensionais, inspeção visual assistida (jigs ou estações de luz) para destacar defeitos visuais, e controles de tratamento térmico que asseguram que as peças só avancem se o ciclo foi completo e dentro dos parâmetros. Os parâmetros de rastreabilidade adicionados ao ID da peça incluem data e hora da desmoldagem, resultados da inspeção visual e dimensional, parâmetros do tratamento térmico (se houver), o ID final da peça (mantendo a ligação com o ID do molde e da panela via DISA TAG e SinterCast Ladle Tracker) e resultados de ensaios não destrutivos (END) ou mecânicos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A integração de Poka-Yokes em processos críticos da fundição, seguida pela rastreabilidade robusta das peças, gera um ciclo virtuoso de melhoria da qualidade e redução de refugo. Os Poka-Yokes atuam na prevenção, impedindo que erros comuns ocorram na fonte. Por exemplo, sensores de temperatura no vazamento e sistemas de controle de dosagem em tratamentos de liga evitam que parâmetros críticos estejam fora da especificação, prevenindo problemas como vazamentos incompletos ou estruturas metalográficas inadequadas. Isso significa que menos peças defeituosas chegam às fases subsequentes do processo.

Quando, apesar dos Poka-Yokes, uma não conformidade ainda ocorre ou é detectada, o sistema de rastreabilidade entra em ação. Ao consultar o histórico da peça por meio de suas informações de RFID (como o **SinterCast Ladle Tracker** (SinterCast, [s.d.]) que conecta o histórico da panela de metal aos moldes vazados) ou de sua marcação única (**DISA TAG** (DISAGROUP, [s.d.]) que vincula a peça aos parâmetros de produção), é possível identificar precisamente as variáveis de processo associadas àquela peça. Se um lote de peças fundidas apresentar trincas, o sistema de rastreabilidade pode revelar que essas peças passaram por um tratamento térmico com parâmetros específicos (tempo e temperatura), ou que foram produzidas a partir de um lote de metal com uma composição ligeiramente diferente ou mesmo que um Poka-Yoke de inoculação não foi acionado corretamente devido a uma falha no sistema. Essa capacidade de pinpointing é impossível sem um sistema de rastreabilidade eficaz.

A aplicação do **SinterCast Ladle Tracker** (SinterCast, [s.d.]) permite que as fundições monitorem o progresso das panelas de metal ao longo do processo, registrando dados cruciais do metal, o que é vital para a qualidade do vazamento. Complementarmente, a **DISA TAG** (DISAGROUP, [s.d.]) otimiza o processo de fundição ao associar um ID exclusivo a cada

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

peça fundida, permitindo que, ao escanear esse ID, os usuários possam vincular a peça a uma causa específica de defeito ou consultar os parâmetros de processo coletados durante a produção. A inclusão de sistemas como as câmeras infravermelhas da **OPTRIS** (OPTRIS, [s.d.]) no ponto de vazamento adiciona uma camada de precisão na medição de temperatura, garantindo que o metal seja vazado dentro da janela térmica ideal, e essa informação crítica é automaticamente vinculada ao histórico da peça. Essa visão detalhada, no nível da peça individual, é fundamental para investigar as causas raízes e determinar quais parâmetros de processo levaram a uma peça com defeito, otimizando a qualidade, reduzindo o desperdício e minimizando o tempo de inatividade.

Os Poka-Yokes específicos, como os sensores de vazamento com bloqueio instantâneo (detecção de fluxo, tubo entupido, tempo de fading, medição de temperatura online com sistemas como **OPTRIS** (OPTRIS, [s.d.])), são cruciais para a prevenção de defeitos graves que, de outra forma, resultariam em refugo imediato ou retrabalho dispendioso. A informação gerada por esses Poka-Yokes (como o motivo do bloqueio, o parâmetro excedido) também é integrada à rastreabilidade da peça (mesmo que seja uma peça "abortada" ou "não vazada"), fornecendo dados valiosos para a melhoria do processo. O Poka-Yoke de controle de tempo de resfriamento, por exemplo, não só evita a desmoldagem precoce, mas também registra o tempo real, enriquecendo o histórico da peça.

A integração entre Poka-Yokes e rastreabilidade oferece múltiplos benefícios:

- **Redução Proativa de Refugo:** Poka-Yokes diminuem a ocorrência de defeitos na fonte, com bloqueios automáticos em pontos críticos.
- **Análise de Causa Raiz Eficaz:** A rastreabilidade permite identificar rapidamente a origem de qualquer não conformidade, facilitando ações corretivas pontuais, com o auxílio de sistemas como o SinterCast Ladle Tracker, DISA TAG e os registros dos Poka-Yokes.
- **Melhoria Contínua do Processo:** Os dados de rastreabilidade, combinados com as falhas que os Poka-Yokes conseguiram impedir ou indicar, fornecem insights valiosos para otimizar ainda mais o processo e reavaliar os Poka-Yokes existentes.
- **Maior Confiabilidade do Produto:** Peças produzidas sob um regime de Poka-Yokes e rastreabilidade oferecem maior garantia de qualidade ao cliente.
- **Otimização da Gestão de Variáveis:** O monitoramento contínuo das variáveis de processo é aprimorado pela combinação, permitindo ajustes mais finos e intervenções preventivas.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

A discussão deve também abordar os desafios, como o investimento inicial em tecnologias e a necessidade de treinamento da equipe para operar e manter esses sistemas integrados. No entanto, os ganhos em eficiência, redução de custos com retrabalho e refugo, e a melhoria da reputação da fundição justificam a implementação dessa abordagem integrada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção conjunta de Poka-Yokes e sistemas de rastreabilidade representa um salto qualitativo significativo para as fundições de ferro. Enquanto os Poka-Yokes atuam na linha de frente, prevenindo a ocorrência de erros e defeitos nos processos principais através de bloqueios automáticos, a rastreabilidade, com o suporte de tecnologias como o Ladle Tracker da SinterCast (SinterCast, [s.d.]) e o DISA TAG da DISAGROUP (DISAGROUP, [s.d.]), além de soluções de monitoramento como as da OPTRIS (OPTRIS, [s.d.]), fornece a inteligência necessária para entender e corrigir as falhas que porventura escapem. Essa sinergia não só minimiza o refugo e os custos associados, mas também eleva a qualidade do produto final, fortalece a confiança do cliente e posiciona a fundição em um patamar de excelência operacional e tecnológica. A implementação dessa abordagem é um investimento estratégico na sustentabilidade e competitividade da indústria de fundição, pavimentando o caminho para um futuro com menos desperdício e maior precisão.

REFERÊNCIAS

DISAGROUP. **DISA TAG**. [S.d.]. Disponível em: https://www.disagroup.com/disa-tag#:~:text=Full%20casting%20traceability%20to%20eliminate,parameters%20created%20a%20bad%20casting. Acesso em: 19 jun. 2025.

OPTRIS. **Infrared Cameras | Precision Line | PI 05M**. [S.d.]. Disponível em: https://optris.com/products/infrared-cameras/precision-line/pi-05m/. Acesso em: 19 jun. 2025.

SinterCast. **Tracking Technologies 4.0 - Portuguese**. [S.d.]. Disponível em: https://sintercast.com/media/1587/sc-tracking-technologies-40-portuguese-wbc.pdf. Acesso em: 19 jun. 2025.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.