



**Utilização do Relatório A3 para Melhoria de Processos em Fundição
Automotiva: um Estudo de Caso**

Rodrigo Costenaro Diniz

Centro Universitário da Fundação Herminio Ometto

(rc.costenaro@gmail.com)

Gabriel Rodrigues da Rocha

Centro Universitário da Fundação Herminio Ometto

(gabrielrocha699@alunos.fho.edu.br)

Ivana Salvagni Rotta

Centro Universitário da Fundação Herminio Ometto

(ivanasr@fho.edu.br)

Resumo

O setor automotivo demanda processos produtivos cada vez mais estáveis e de alta repetibilidade, sobretudo nas fundições, onde pequenas variações térmicas podem comprometer a microestrutura do produto e, conseqüentemente, o seu desempenho. Este estudo tem como objetivo otimizar o processo de fundição centrífuga de ferro fundido cinzento por meio da aplicação de ferramentas da filosofia *Lean Manufacturing*. Para isso, será utilizado o Relatório A3 como estrutura de raciocínio científico para análise de lacunas, desperdícios e falhas no desenho do processo de fabricação de camisas de cilindro. A pesquisa, de natureza aplicada e abordagem quantitativa, foi conduzida em uma fundição automotiva. Foi estruturada em etapas de diagnóstico, análise de causa raiz,



implementação de ações corretivas e verificação dos resultados. A principal ação consistiu na substituição da carga refratária na formulação da tinta de revestimento do molde, aliada à padronização dos métodos de medição e controle. Os resultados demonstraram significativa melhoria microestrutural, com redução das grafitas de super-resfriamento e diminuição do índice de peças no limite de aceitação de 25% para menos de 10%. O estudo evidencia que a utilização dos princípios *Lean* promove o pensamento científico de forma organizada, colaborando para a estabilidade operacional e o aumento da competitividade industrial.

Palavras-chave: Fundição centrífuga, *Lean manufacturing*, Relatório A3, Tinta refratária, Controle de processo.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Vanalle e Salles (2011), as empresas que integram o setor automobilístico brasileiro enfrentam ambientes produtivos cada vez mais desafiadores em função da intensificação da competição global. O aumento das exigências de qualidade por parte das montadoras em relação aos seus fornecedores decorre da modernização das instalações, da reorganização dos métodos de produção e trabalho e da adoção de novos padrões de relacionamento na cadeia de suprimentos. Essa busca pela excelência impõe às indústrias fornecedoras a necessidade de inovar continuamente, uma vez que o atendimento a especificações mais restritivas frequentemente exige revisões de processo e incorporação de soluções tecnológicas.

Na cadeia automotiva, o setor de fundição assume papel estratégico, pois é responsável pela produção de componentes críticos e pelo desempenho estrutural das peças de motor. Entretanto, trata-se de um processo complexo, sujeito a variações térmicas e químicas que podem comprometer a microestrutura do material e elevar custos operacionais. A fundição demanda equilíbrio entre domínio técnico, controle ambiental e capacitação da mão de obra, em um ambiente caracterizado por altas temperaturas, presença de poeira e necessidade constante de controle dimensional e metalúrgico (SOARES, 2000).

Diante desse cenário, abordagens voltadas à melhoria contínua e à estabilidade dos processos tornam-se essenciais para a competitividade industrial. Entre essas abordagens, a filosofia *Lean Manufacturing*, associada a ferramentas de análise científica como o Relatório A3, apresenta-se como um caminho eficaz para a identificação de causas fundamentais, a eliminação de desperdícios e a padronização de métodos produtivos (SOBEK II; SMALLEY, 2010; WOMACK; JONES; ROOS, 1992).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo otimizar o processo de fundição centrífuga de ferro fundido cinzento utilizado na fabricação de camisas de cilindro, por meio da aplicação de ferramentas da filosofia *Lean Manufacturing*. A investigação busca reduzir a ocorrência de grafitas de super-resfriamento na microestrutura de camisas de cilindro. Devido a ocorrência desse microconstituente tem-se a redução das propriedades mecânicas desejadas para esse tipo de produto, bem como a redução da eficiência das etapas seguintes de fabricação. O estudo propõe, portanto, a utilização do Relatório A3 como estrutura metodológica para diagnosticar as causas fundamentais, implementar contramedidas e verificar os resultados. Com isso, tem-se a melhoria da qualidade da microestrutura e a estabilidade operacional do processo de fundição.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Origens e fundamentos históricos sobre o *lean manufacturing*

Segundo Womack; Jones e Roos (1992), o *Lean Manufacturing* tem origem no Sistema Toyota de Produção (STP), desenvolvido por Taiichi Ohno e Eiji Toyoda nas décadas de 1950 e 1960. O contexto do pós-guerra no Japão exigia um modelo produtivo capaz de atender a uma demanda instável, com alta variedade de produtos e restrições de recursos. Nesse cenário, Ohno adaptou os conceitos da produção em massa de Henry Ford, introduzindo um sistema que buscava a eliminação total de desperdícios e o equilíbrio entre qualidade e produtividade. O objetivo era produzir apenas o que o cliente demandava, na quantidade e no momento certos, por meio de um sistema de produção puxada (WOMACK; JONES; ROOS, 1992).

De acordo os autores, a filosofia que emergiu dessa adaptação resultou em um sistema de negócios revolucionário que combinava as vantagens da produção artesanal, voltada à flexibilidade e à qualidade, com a eficiência e a estabilidade da produção em massa. Esse modelo, posteriormente denominado *Lean Production*, demonstrou ser capaz de gerar maior produtividade com menor uso de espaço, tempo, capital e esforço humano. O termo “*Lean*” foi introduzido por Krafcik, para designar um sistema que “utiliza menos de tudo” quando comparado à produção tradicional (WOMACK; JONES; ROOS, 1992).

Takeuchi (2023) explica que o STP deve ser entendido como uma filosofia que busca constantemente o estado ideal de manufatura. Segundo o autor, essa filosofia baseia-se na aprendizagem contínua e na capacidade de a organização ajustar-se às necessidades do cliente, oferecendo o produto certo no momento certo, com o mínimo desperdício possível.

2.2. Princípios e valores essenciais

De acordo Womack e Jones (1998), o pensamento *Lean* é sustentado por cinco princípios fundamentais: definir valor a partir da perspectiva do cliente, identificar o fluxo de valor, assegurar o fluxo contínuo dos processos, permitir que o cliente puxe o valor e buscar a perfeição de forma contínua. Esses princípios orientam a empresa a enxergar o sistema produtivo como um fluxo integrado, no qual todas as atividades devem agregar valor ao cliente final.

Liker (2021) complementa essa concepção ao propor uma estrutura composta por quatorze princípios organizados em quatro dimensões: filosofia de longo prazo, processos estáveis e padronizados, desenvolvimento de pessoas e parceiros e resolução científica de problemas. O autor ressalta que a filosofia de longo prazo é o fundamento do sistema Toyota, pois sustenta as decisões estratégicas voltadas à sustentabilidade e à melhoria contínua, mesmo que em detrimento de resultados financeiros imediatos.

Segundo Ohno (1997) a essência do STP reside na eliminação sistemática de desperdícios em todas as formas, incluindo, movimentações e processamento desnecessárias, transporte, defeitos, superprodução, espera e estoque. O autor também destaca que a



padronização das operações e o aprimoramento contínuo (*kaizen*) são pilares fundamentais para a estabilidade do sistema e para o aprendizado organizacional.

2.3. Ferramentas e métodos *lean*

De acordo com Takeuchi (2023), as ferramentas *Lean* operam como instrumentos que tornam visíveis os problemas e orientam o aprendizado organizacional. Entre as mais relevantes estão o *Kanban*, utilizado para coordenar o fluxo de materiais, o *Andon*, que permite o controle visual e a parada imediata em caso de falhas, o *Heijunka*, que nivela a produção, o 5S, que organiza o ambiente de trabalho, e a padronização do trabalho, que estabelece a base para o aperfeiçoamento contínuo. O autor destaca ainda a importância do princípio *Genchi Genbutsu*, que incentiva os gestores a irem ao local onde os fatos ocorrem, observando os processos de forma direta.

Ohno (1997) havia defendido que o sistema de produção deve permitir que qualquer colaborador possa interromper o processo sempre que identificar um problema. Essa prática, conhecida como *Andon*, estimula o trabalho em equipe e o aprendizado coletivo, fortalecendo a cultura de resolução imediata de problemas. O mesmo autor também formalizou o método dos cinco porquês, que consiste em investigar de maneira sistemática as causas-raiz dos problemas, evitando que eles se repitam.

Rother (2010) complementa que o verdadeiro diferencial da Toyota não está apenas no uso das ferramentas, mas na forma como elas são aplicadas para desenvolver capacidades humanas. O autor apresenta as rotinas denominadas *Improvement Kata* e *Coaching Kata*, que estruturam a maneira como a empresa aprende, experimenta e se adapta. Essas práticas criam um ambiente de aprendizado contínuo, em que cada colaborador é incentivado a pensar cientificamente e a propor melhorias graduais nos processos.

2.4. Dimensão humana e organizacional

Segundo Liker (2021), o STP e o pensamento *Lean* são sustentados por dois pilares inseparáveis: respeito pelas pessoas e melhoria contínua. O autor argumenta que o sucesso do modelo Toyota depende da criação de uma cultura em que todos os colaboradores sejam valorizados e envolvidos no processo de aperfeiçoamento. A

liderança tem o papel de orientar, ensinar e desenvolver as equipes, promovendo a aprendizagem coletiva e o comprometimento com os objetivos organizacionais.

Rother (2010) reforça essa perspectiva ao afirmar que a Toyota adota uma filosofia de gestão pelos meios, em que o foco está no desenvolvimento das pessoas e não apenas na obtenção de resultados. Para o autor, as lideranças atuam como mentores que ensinam os colaboradores a aplicarem o raciocínio científico para resolver problemas, criando um ciclo de aprendizado contínuo.

De acordo com Takeuchi (2023), o Sistema Toyota é essencialmente um sistema de formação de pessoas, no qual o ambiente produtivo é também um espaço de aprendizado. Cada nível hierárquico tem a responsabilidade de treinar e capacitar o próximo, garantindo que o conhecimento prático seja transmitido e aprimorado. Essa característica confere ao modelo um caráter humano e educacional, consolidando-o como um sistema sociotécnico que integra eficiência e desenvolvimento humano.

2.5. Expansão e atualidade do pensamento *Lean*

Segundo Womack e Jones (1998), o conceito de *Lean Manufacturing* evoluiu de um método de produção para um sistema de gestão universal, aplicável a diferentes setores econômicos, como saúde, educação e serviços. Essa evolução deu origem ao conceito de empresa enxuta, na qual todos os processos, desde o desenvolvimento de produtos até o atendimento ao cliente, são orientados pela criação de valor e pela eliminação de desperdícios.

Liker (2021) destaca que o desafio contemporâneo consiste em adaptar os princípios *Lean* ao contexto tecnológico da indústria na atualidade, caracterizado pela automação e pela digitalização dos processos. O autor ressalta que, embora as tecnologias digitais ampliem as possibilidades de eficiência e rastreabilidade, elas devem considerar as pessoas ao centro dos processos.

Essa visão está alinhada ao entendimento de que o *Lean* constitui um ponto de convergência entre os paradigmas industriais tecnológicos recentes e une a eficiência tecnológica com o respeito ao fator humano. Assim, o sistema *Lean* permanece atual

como um modelo de gestão capaz de integrar desempenho operacional, sustentabilidade e propósito organizacional.

2.6. Relatório A3

2.6.1. Origem e fundamentos

Segundo (Sobek II; Smalley, 2010), o relatório A3 é uma ferramenta desenvolvida pela Toyota para organizar o raciocínio na solução de problemas, na elaboração de propostas e no acompanhamento de projetos. Os autores explicam que o A3 não é apenas um formulário, mas um processo de pensamento estruturado, baseado na aplicação disciplinada do ciclo *PDCA* (Planejar, Executar, Verificar e Agir). O formato do papel A3 (42 x 29,7 cm) foi adotado justamente para restringir o espaço, estimulando a síntese, a clareza visual e a comunicação objetiva.

De acordo com os mesmos autores, o pensamento A3 tem como essência o método científico de investigação, no qual o colaborador formula hipóteses, coleta dados no *gemba* (local onde o trabalho ocorre) e valida contramedidas com base em evidências. Essa lógica reflete o princípio do aprender fazendo, característico do Sistema Toyota de Produção, no qual a compreensão profunda do problema precede qualquer solução (SOBEK II; SMALLEY, 2010).

Liker e Hoseus (2009) complementam que o A3 surgiu da necessidade de sintetizar informações complexas em um formato padronizado, de modo a facilitar o alinhamento entre líderes e equipes.

Assim, o A3 se consolidou como um mecanismo de comunicação estratégica, capaz de traduzir objetivos corporativos em planos de ação claros, conectando a gestão operacional com o *hoshin kanri* (desdobramento da estratégia).

2.6.2. Estrutura e tipos de relatórios

Sobek II e Smalley (2010) descrevem três tipos principais de relatórios A3: solução de problemas, proposta e status. O A3 de solução de problemas é o mais difundido e segue rigorosamente as etapas do ciclo *PDCA*. Ele inclui seções como tema, histórico, condição

atual, análise da causa fundamental, contramedidas, verificação de resultados e ações de acompanhamento.

O A3 de proposta é voltado à apresentação de novos projetos ou mudanças significativas, com foco na fase de planejamento (*Plan*), enfatizando a comparação entre alternativas e a obtenção de consenso (*nemawashi*). Já o A3 de status é utilizado para monitorar a execução e avaliar o progresso de um projeto em andamento, destacando indicadores de desempenho e ações pendentes.

De acordo com os mesmos autores, a estrutura do A3 é sempre uma representação visual do raciocínio científico. O lado esquerdo do relatório geralmente retrata o planejamento e a análise do problema, enquanto o lado direito contém as ações, verificações e resultados. Essa disposição gráfica traduz o fluxo lógico do *PDCA* e permite ao leitor compreender rapidamente o encadeamento entre causa, ação e efeito.

2.6.3. Aplicações organizacionais e papel no aprendizado *Lean*

O A3 é um símbolo da cultura de melhoria contínua (*kaizen*) da Toyota (LIKER; HOSEUS, 2009). Ele atua como um instrumento de comunicação e aprendizado organizacional, estimulando a reflexão e o pensamento crítico entre os colaboradores.

Na prática, o A3 é utilizado para o desdobramento de metas, o gerenciamento de projetos e o registro de melhorias operacionais, funcionando como uma narrativa lógica da jornada de aprendizado da equipe.

No processo de elaboração o valor do A3 não está no documento em si. Durante sua construção, o colaborador é acompanhado por um mentor, que orienta o raciocínio e questiona a profundidade das análises. Esse processo constitui uma forma de *coaching* estruturado, na qual o líder ensina o subordinado a pensar cientificamente. Assim, o A3 se torna uma ferramenta de desenvolvimento de lideranças *Lean*, promovendo aprendizado contínuo e autonomia (SOBEK II; SMALLEY, 2010).

Os mesmos autores reforçam que o A3 promove o respeito pelas pessoas, um dos pilares do *Toyota Way*, pois possibilita que cada membro da organização participe ativamente do processo de melhoria e tome decisões baseadas em fatos. O uso consistente do A3 cria

um ambiente de aprendizado coletivo e consenso, conectando propósito, processos e resultados.

2.6.4. Síntese conceitual sobre o Relatório A3

Com base nos autores analisados, o relatório A3 deve ser compreendido como um método de raciocínio estruturado e visual, que traduz a filosofia *Lean* em prática gerencial. Ele integra o método científico do *PDCA*, a padronização da comunicação e o desenvolvimento das pessoas em um único instrumento. Sua aplicação contínua transforma a forma como a organização pensa e aprende, consolidando o A3 como um dos pilares do Sistema Toyota de Produção e um vetor de aprendizado organizacional sustentável (SOBEK II; SMALLEY, 2010; LIKER; HOSEUS, 2009).

2.7. Fundição centrífuga

2.7.1. Conceito e fundamentos do processo

De acordo com Dilavarian (2012), a fundição centrífuga é um processo amplamente empregado na fabricação de peças metálicas de geometria de revolução, como tubos, camisas de cilindros e anéis. O princípio de funcionamento consiste em introduzir o metal líquido em um molde em constante rotação.

A força centrífuga gerada pela alta velocidade de rotação distribui o metal de forma uniforme ao longo da parede interna do molde, garantindo elevada compactação e ausência de defeitos internos.

Segundo o autor, a utilização de moldes metálicos proporciona rápida extração de calor, o que reduz o tempo de solidificação e favorece a formação de uma estrutura colunar orientada no sentido da extração térmica. A pressão centrífuga exerce um papel fundamental, pois assegura o preenchimento de vazios de contração que normalmente ocorrem durante o processo de solidificação.

Conforme Janco (1983), as máquinas de fundição centrífuga podem operar tanto na posição horizontal quanto na vertical, dependendo do tipo de liga e da aplicação desejada. As centrífugas horizontais são preferidas para tubos de grandes comprimentos, enquanto as verticais são indicadas para peças curtas ou componentes de geometria complexa.

2.7.2. Fenômenos físicos e transferência de calor

O desempenho do processo de fundição centrífuga depende do comportamento térmico na interface metal-molde. O autor desenvolveu um modelo matemático para descrever a transferência de calor durante a solidificação, determinando o coeficiente de transferência térmica como função do tempo por meio da técnica da solução inversa.

O estudo mostrou que o coeficiente apresenta valores elevados imediatamente após o vazamento do metal e decresce exponencialmente com o tempo, comportamento semelhante ao observado em fundições estáticas (DILAVARIAN, 2012).

Ainda conforme o mesmo autor, o modelo proposto considera os mecanismos de condução e radiação através do vão formado entre o metal e o molde, incluindo os efeitos da contração térmica e da deformação plástica da casca metálica solidificada. Essa modelagem permitiu reproduzir de forma precisa as curvas de resfriamento experimentais e a posição da frente de solidificação, demonstrando alta aderência entre teoria e prática (DILAVARIAN, 2012).

Romanoff (1981) destaca que a intensidade da força centrífuga aplicada ao metal líquido exerce influência direta sobre a densidade, a homogeneidade e a segregação das ligas. Segundo o autor, a força centrífuga pode alcançar valores superiores a duzentas vezes a gravidade (200 G), promovendo excelente compactação e minimizando a ocorrência de porosidades.

2.7.3. Microestrutura e propriedades do fundido

De acordo com Dilavarian (2012), o gradiente térmico imposto pela parede metálica do molde resulta em uma microestrutura colunar orientada no sentido radial. Nas regiões próximas à parede externa, onde o resfriamento é mais intenso, observam-se dendritas primárias finas, enquanto as regiões mais internas apresentam estrutura eutética composta por perlita e ledeburita. Essa configuração microestrutural contribui para o aumento da resistência mecânica, a redução da porosidade e a melhoria do acabamento superficial das peças.

Romanoff (1981) acrescenta que o processo centrífugo favorece a segregação controlada dos constituintes de acordo com suas densidades, eliminando gases e inclusões não metálicas. Essa característica resulta em fundidos de alta integridade estrutural, amplamente utilizados em componentes que exigem resistência mecânica, resistência térmica e durabilidade em condições severas de operação.

2.7.4. Inovações e aplicações tecnológicas

Segundo Odawara (2017), os avanços tecnológicos recentes expandiram a aplicação da fundição centrífuga para a produção de materiais bimetálicos e metal-cerâmicos. O autor descreve a utilização da síntese autossustentada de alta temperatura (SHS) sob rotação, que possibilita a formação de tubos revestidos internamente com cerâmica.

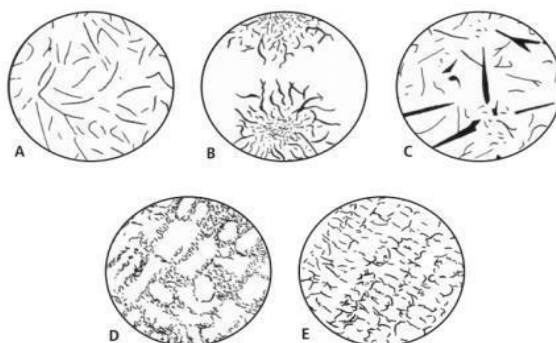
Durante o processo, ocorre uma reação altamente exotérmica entre os componentes metálicos e cerâmicos, separando as fases em camadas distintas de acordo com a densidade. O resultado é a formação de uma estrutura composta por uma camada interna cerâmica, uma camada intermediária metálica e uma camada externa de aço, fortemente aderidas entre si.

Conforme o mesmo autor, o aumento da força centrífuga melhora a uniformidade das camadas e a densidade do revestimento. No entanto, forças excessivas podem comprometer a aderência entre as interfaces e reduzir a resistência ao choque térmico. Dessa forma, o controle preciso dos parâmetros de rotação, temperatura e composição é essencial para garantir a qualidade e o desempenho das peças produzidas.

2.8. Ferro fundido cinzento

Os ferros fundidos cinzentos possuem fratura “cinza”, e, portanto, são nomeados como tal. A disposição da grafita, na microestrutura do fundido, pode ser classificada de acordo com a distribuição A, B, C, D, & E. Como a grafita se manifesta no material, implica em suas propriedades mecânicas. O formato da grafita do ferro fundido cinzento são classificados a partir da norma ASTM 247 e ISO 945, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Disposição das grafitas



Fonte: ISO 945-1 (2008)

Segundo Callister e Rethwisch (2015), o ferro fundido cinzento, do ponto de vista mecânico, é relativamente pouco resistente e frágil quando submetido a tração. Tal característica deve-se as implicações da geometria afiladas e pontiagudas da grafita que, desse modo, servem como pontos de concentração de tensões quando submetida a esforços e cargas.

Para o autor, embora o ferro fundido cinzento não possua bom desempenho mecânico quando submetido a tração, estes materiais apresentam considerável resistência e ductilidade sob cargas de compressão. Outra característica importante, intrínseca ao ferro fundido cinzento, é a sua estimável capacidade de amortecimento de energia vibracional.

3. MÉTODO

De acordo com Gil (2022) e Severino (2014), esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois visa gerar conhecimento de uso prático e direcionado à solução de problemas concretos do processo produtivo.

Quanto à abordagem, é uma pesquisa quantitativa, visto que se baseia na mensuração e análise de variáveis metalúrgicas e de desempenho do processo. No que se refere aos objetivos, enquadra-se como pesquisa explicativa, uma vez que busca identificar e compreender relações de causa e efeito entre variáveis do processo de fundição e os resultados microestruturais.

Trata-se de um estudo de caso único, desenvolvido em uma fundição automotiva, incorporando elementos de pesquisa-ação, conforme Gil (2022), pois envolve a implementação prática de melhorias e a avaliação dos seus impactos no ambiente real de produção.

3.1. Unidade de análise e contexto empírico

A unidade de análise é o processo de fundição centrífuga de ferro fundido cinzento, responsável pela fabricação de camisas de cilindro utilizadas em motores automotivos. O estudo foi conduzido em uma empresa do setor automotivo, com produção seriada e controle metalúrgico padronizado. A escolha desse caso deve-se à relevância do processo na estabilidade das propriedades microestruturais das peças, bem como ao potencial de ganhos por meio da aplicação de princípios *Lean*.

3.2. Etapas metodológicas

Conforme os delineamentos sugeridos por Marconi e Lakatos, (2003), a pesquisa foi estruturada em cinco etapas sequenciais:

- Diagnóstico inicial: levantamento de dados históricos do processo, índices de não conformidades e variações térmicas. Essa etapa envolveu observação direta no ambiente produtivo e análise documental de relatórios de controle de qualidade.
- Análise de causa raiz: aplicação das ferramentas *Lean* (Diagrama de *Ishikawa* e 5 Porquês) para identificação das causas fundamentais das falhas microestruturais.
- Planejamento das ações corretivas: elaboração do plano de ação A3, alinhado ao ciclo *PDCA*, com definição das contramedidas e indicadores de desempenho.
- Implementação: substituição da carga refratária na formulação da tinta de revestimento, acompanhada da padronização dos métodos de controle e medição.
- Verificação e validação: análise comparativa dos resultados obtidos antes e após as intervenções, mediante avaliação metalográfica e indicadores de desempenho produtivo.

Essas etapas foram conduzidas de modo iterativo, assegurando a validação empírica dos resultados observados, conforme recomenda Severino (2014) para estudos aplicados.

3.3. Instrumentos e técnicas de coleta de dados

A coleta de dados envolveu múltiplas fontes:

- Documentação técnica e registros históricos de processo (dados de temperatura, composição química e índices de refugo);
- Observação direta e entrevistas não estruturadas com operadores e engenheiros de processo, para compreensão das práticas operacionais;
- Análise metalográfica quantitativa, com medições de área de grafita e avaliação da morfologia das lamelas sob microscopia óptica;
- Indicadores de desempenho do processo, como taxa de peças fora do limite de aceitação e tempo médio de ciclo.

A triangulação dessas fontes, segundo Marconi e Lakatos (2003), assegura maior confiabilidade e validade interna dos resultados.

3.4. Técnica de análise dos dados

Os dados coletados foram tratados por meio de análise estatística descritiva e comparativa, avaliando a variação das médias e sua dispersão entre os principais parâmetros antes e depois das melhorias.

A análise microestrutural seguiu critérios normativos de classificação das grafitas em ferro fundido cinzento, permitindo estabelecer correlações entre as condições de processo e a qualidade metalúrgica final.

Essa abordagem quantitativa foi complementada por uma análise interpretativa do Relatório A3, que sistematizou o raciocínio científico e as decisões de engenharia ao longo do ciclo *PDCA*, presente no relatório A3.

3.5. Considerações éticas

O estudo respeitou os princípios de confidencialidade industrial e a não divulgação de informações estratégicas da empresa. Os dados foram utilizados exclusivamente para fins de pesquisa científica, sem prejuízo às operações produtivas.

4. RESULTADOS

Os resultados foram organizados conforme as etapas do Relatório A3 de solução de problemas, proposto por Sobek II e Smalley (2010), o qual estrutura o raciocínio científico por meio de ciclos iterativos de observação, análise, ação e verificação.

Dessa forma, a apresentação dos resultados reflete o pensamento A3 aplicado ao processo de fundição centrífuga, seguindo as etapas Histórico, avaliação da condição atual e descrição do problema, declaração do objetivo, análise de causas fundamentais, proposição e execução das contramedidas, verificação dos resultados e ações de acompanhamento.

4.1. Histórico

O processo de fundição centrífuga de ferro cinzento é amplamente utilizado na produção de camisas de cilindro, exigindo controle rigoroso das variáveis térmicas e metalúrgicas para garantir a conformidade microestrutural. Em etapas anteriores de melhoria contínua, já havia sido alcançada a eliminação de não conformidades críticas relacionadas à degeneração da grafita.

Apesar dessa evolução, identificou-se que aproximadamente 25% das peças permaneciam no limite de aceitação, mesmo dentro das especificações de qualidade. Essa condição evidenciou a necessidade de revisar o processo com foco em estabilidade e repetibilidade, buscando reduzir a variabilidade microestrutural e elevar o percentual de peças totalmente conformes.

Com base nesse cenário, definiu-se a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing*, utilizando o Relatório A3 como estrutura metodológica de raciocínio científico, com o propósito de compreender a situação atual, identificar oportunidades de melhoria e propor ações voltadas à redução das peças no limite de aceitação.

4.2. Contextualização do problema

Para a avaliação da condição atual, foi fundamental realizar a estratificação dos dados provenientes das análises laboratoriais de microestrutura. O propósito dessas análises foi verificar se a integridade metalúrgica dos lotes atendia às especificações relativas à forma

e à distribuição da grafita. Buscou-se assegurar a predominância de grafita tipo A, cuja morfologia está associada ao processo de solidificação, composição química e etapas de inoculação.

Peças que possuíam, aproximadamente, 100% da grafita do tipo “A” eram classificadas como aceitáveis, representando a condição ideal de conformidade. Quando eram identificadas pequenas áreas contendo outros tipos de grafita (B, C, D ou E), mas ainda dentro das tolerâncias previstas pelo cliente, as peças eram classificadas como no limite de aceitação.

Embora não houvesse mais ocorrência de reprovações, o grupo de peças no limite de aceitação representava aproximadamente 25% da produção, evidenciando a necessidade de intervenções adicionais para reduzir a variabilidade microestrutural.

4.3. Definição dos objetivos

A equipe responsável pelo Relatório A3 definiu como objetivo principal reduzir o percentual de peças no limite de aceitação e aumentar a estabilidade microestrutural no processo de fundição centrífuga de ferro cinzento. Buscou-se diminuir o índice de peças no limite de 25% para menos de 10%, assegurando maior uniformidade na formação da grafita tipo A e maior repetibilidade do processo.

4.4. Análise de causa fundamental

A análise de causa foi conduzida com base na metodologia dos 6M, conforme apresentado no Quadro 1, utilizando o Diagrama de *Ishikawa* para organizar visualmente as possíveis fontes de variabilidade do processo. Essa abordagem permitiu uma avaliação estruturada das categorias fundamentais que compõem o sistema produtivo, destacando elementos relacionados a máquina, mão de obra, método, meio ambiente, medição e matéria prima. A utilização dos 6M favoreceu uma visão sistêmica, possibilitando enxergar o problema de maneira ampla antes de se aprofundar nas causas específicas de cada categoria.

Com a estrutura inicial definida, aplicou-se o método dos 5 Porquês para aprofundar o entendimento das causas indicadas no Diagrama de *Ishikawa*. Esse método permitiu separar hipóteses superficiais de causas mais profundas, revelando relações de

dependência entre fatores aparentemente independentes. O uso combinado do *Ishikawa* e dos 5 Porquês facilitou a identificação de padrões que se repetiam entre diferentes categorias dos 6M, reforçando a necessidade de uma análise detalhada das origens do problema e direcionando a elaboração das ações de melhoria.

Esse processo de investigação resultou em um mapeamento claro das principais influências sobre a variação observada no processo, estabelecendo uma base objetiva para as análises específicas apresentadas nas seções seguintes. A partir dessa estrutura, cada conceito dos 6M pôde ser desdobrado individualmente, permitindo compreender de forma aprofundada a contribuição de cada fator.

Quadro 1 - Análise obtida via Diagrama de *Ishikawa* e 6M

Conceito analisado	Causa Identificada	Detalhamento
Método	Restrição ao uso de carga refratária específicas	A limitação do processo impedia o uso de outro tipo de carga refratária, com melhor desempenho e estabilidade.
Mão de obra	Sobrecarga operacional nas medições manuais	A alta frequência de medições gerava fadiga e variação nos resultados.
Máquina	Entupimentos recorrentes nos difusores e variações na aplicação	O acúmulo de resíduos na tinta afetava a uniformidade da aplicação.
Meio ambiente	Condições estáveis, sem influência significativa	As condições ambientais não apresentaram impacto relevante.
Material	Instabilidade na carga refratária e baixa fluidez da tinta	Lotes com alta gelificação comprometiam a fluidez e a homogeneidade da tinta de revestimento.
Medição	Desgaste das provetas plásticas utilizadas no controle volumétrico	A perda de graduação na proveta reduzia a precisão das medições de volume.

Fonte: Autores (2025)

Em relação ao conceito método, a análise dos 5 porquês permitiu compreender de forma sequencial as causas associadas à restrição do uso da carga refratária da tinta de revestimento. Observou-se que a formulação originalmente utilizada se manteve por apresentar desempenho estável diante dos requisitos anteriores.

Porém o aumento das exigências de qualidade e as variações provenientes de diferentes fornecedores evidenciaram a necessidade de revisão técnica. O Quadro 2 apresenta o detalhamento dessa análise.

Quadro 2 – 5 Porquês para Método

Causa Identificada	Por quê?	Porque
Restrição ao uso de carga refratária	Por que o processo utilizava a carga refratária X na formulação da tinta?	Pois testes anteriores não confirmaram bons resultados com outro tipo de carga refratária
	Por que não se realizaram novos testes de formulação?	Porque o processo apresentava estabilidade aparente e não havia demanda por melhoria.
	Por que o processo era considerado estável?	Porque, até então, a variabilidade da matéria-prima não comprometia a qualidade percebida do produto.
	Por que a variabilidade da matéria-prima não era considerada crítica?	Porque as especificações dos clientes anteriores eram menos rigorosas em relação à morfologia da grafita.
	Por que isso se tornou um problema no cenário atual?	Porque houve mudanças de fornecedores e elevação dos requisitos de qualidade, exigindo maior controle sobre a parâmetros que influenciam a formação e morfologia da grafita.
Ação Proposta	Realização de novos testes com outros tipos de carga refratária na formulação da tinta de revestimento	

Fonte: Autores (2025)

No que se refere à mão de obra, a análise dos 5 Porquês evidenciou que a sobrecarga operacional nas medições estava associada à necessidade de monitoramento frequente e à variabilidade da vazão durante a aplicação da tinta. Constatou-se também que a repetitividade das verificações favorecia fadiga e pequenas alterações no método executado, contribuindo para a inconsistência dos resultados. O Quadro 3, a seguir, explicita essa análise.

Quadro 3 – 5 Porquês para Mão de obra

Causa Identificada	Por quê?	Porque
Sobrecarga operacional nas medições manuais	Por que havia sobrecarga operacional nas medições?	Porque a demanda de verificações era elevada em função da variabilidade do processo e da necessidade de monitoramento frequente.
	Por que havia necessidade de monitoramento frequente?	Porque era fundamental assegurar a estabilidade dos parâmetros durante as a rotina de trabalho, frente as variações na vazão de tinta durante a aplicação.
	Por que havia variações da vazão durante a aplicação?	Porque o sistema de condução da tinta apresentava perda de carga natural devido ao percurso e às características físicas dos dutos.
	Por que o sistema de condução de tinta apresenta características que promovem perda de carga?	Porque a manutenção preventiva e o balanceamento do sistema não estavam previstos na rotina operacional.
	Por que a ausência dessa rotina afeta o desempenho operacional?	Porque o acúmulo gradual de pequenas perdas de eficiência aumenta a necessidade de verificações manuais e a carga de trabalho da equipe.
Ação Proposta	Incluir a verificação preventiva do sistema de aplicação da tinta e revisar a frequência de medições, buscando reduzir a carga operacional e aumentar a estabilidade da aplicação.	

Fonte: Autores (2025)

Quanto a dimensão máquina, a análise dos 5 porquês, conforme Quadro 4, evidenciou que as variações na aplicação da tinta estavam relacionadas a pequenas obstruções e perdas de uniformidade no sistema de difusão, decorrentes de aspectos físicos do equipamento e da ausência de limpeza preventiva.

Quadro 4 – 5 Porquês para Máquina

Causa Identificada	Por quê?	Porque
Entupimentos recorrentes nos difusores e variações na aplicação	Por que ocorriam entupimentos nos difusores?	Porque havia acúmulo de resíduos sólidos da tinta no interior do sistema de aplicação.
	Por que havia acúmulo de resíduos no sistema?	Porque o ciclo de limpeza era realizado apenas de forma corretiva, após observação de falhas.
	Por que a limpeza era realizada apenas de forma corretiva?	Porque o processo apresentava bom desempenho histórico e não havia indícios de obstrução frequente.
	Por que essa condição se alterou recentemente?	Porque o aumento do tempo de operação e a maior frequência de ciclos ampliaram a formação de resíduos
	Por que a frequência de ciclos aumentou?	Porque houve ampliação da utilização do sistema de pintura.
Ação Proposta	Implantar rotina de limpeza preventiva e inspeção dos difusores, assegurando maior estabilidade e uniformidade na aplicação da tinta.	

Fonte: Autores (2025)

Já no pilar relacionado a material, a análise dos 5 porquês demonstrou que a instabilidade observada na fluidez da tinta estava associada à variabilidade natural entre lotes da carga refratária e à ausência de revisão técnica recente da formulação, conforme indicado no Quadro 5.

Quadro 5 – 5 Porquês para Material

Causa Identificada	Por quê?	Porque
Instabilidade na carga refratária e baixa fluidez da tinta	Por que a tinta apresentava variação de fluidez?	Porque a carga refratária apresentava comportamento distinto entre diferentes lotes.
	Por que havia diferenças entre os lotes?	Porque as matérias-primas apresentavam variação natural nas características físico-químicas de origem.
	Por que essa variação impactou o desempenho da tinta?	Porque a formulação original foi projetada para uma faixa mais restrita de propriedades.
	Por que a formulação não foi revisada anteriormente?	Porque o desempenho do processo permanecia estável diante dos requisitos anteriores.
	Por que houve necessidade de revisão técnica?	Porque novas exigências de estabilidade e desempenho tornaram necessário maior controle sobre a composição e a homogeneidade da tinta.
Ação Proposta	Revisar a formulação da tinta e estabelecer controle laboratorial das propriedades da carga refratária, visando garantir estabilidade e reprodutibilidade do processo.	

Fonte: Autores (2025)

No aspecto medição, a análise dos 5 porquês mostrou que a variação nos resultados estava relacionada ao desgaste natural dos instrumentos de medição e à ausência de substituição periódica, o que impactava a precisão das leituras. O Quadro 6 apresenta o detalhamento dessa análise.

Quadro 6 – 5 Porquês para Medição

Causa Identificada	Por quê?	Porque
Desgaste das provetas plásticas utilizadas no controle volumétrico	Por que as provetas apresentavam desgaste?	Porque eram utilizadas com alta frequência nas rotinas de controle de processo.
	Por que o uso era tão frequente?	Porque o controle volumétrico para a aplicação de tinta no molde era uma etapa essencial para garantir um processo de solidificação uniforme
	Por que o desgaste não foi identificado previamente?	Porque as variações dimensionais nas medições eram pequenas e progressivas, sem impacto imediato perceptível.
	Por que as variações passaram a impactar os resultados?	Porque o processo se tornou mais sensível e dependente de maior precisão nas medições.
	Por que é importante revisar esse controle?	Porque a confiabilidade das medições assegura a consistência da formulação e a estabilidade do revestimento refratário no molde.
Ação Proposta	Implantar rotina de substituição periódica da proveta de medição, em casos que estejam inadequadas para trabalho (Provetas com graduação apagada)	

Fonte: Autores (2025)

4.5. Execução das contramedidas

As contramedidas foram definidas com base nas causas fundamentais identificadas na etapa anterior e estruturadas em um plano de ação voltado à estabilização do processo e à redução das variações microestruturais. Cada ação foi planejada para eliminar ou mitigar as fontes de variabilidade associadas ao método de aplicação da tinta refratária, ao controle das medições e ao desempenho operacional dos equipamentos.

O plano foi implementado de forma gradual, priorizando as ações de maior impacto sobre os indicadores de qualidade. A substituição da carga refratária constituiu a principal intervenção, complementada pela padronização dos métodos de medição volumétrica, utilização dos instrumentos em boas condições de uso e revisão das rotinas de manutenção das máquinas e dispositivos.

Durante a execução, adotou-se monitoramento contínuo dos indicadores-chave de desempenho (*KPIs*), garantindo que cada ação gerasse evidências mensuráveis de melhoria. Essa abordagem possibilitou avaliar a eficácia das contramedidas e ajustar eventuais desvios de forma sistemática, consolidando o aprendizado obtido com a aplicação do Relatório A3.

4.6.Confirmação de efeito e acompanhamento

A confirmação dos efeitos obtidos foi conduzida por meio do monitoramento contínuo dos indicadores-chave de desempenho (*KPIs*) de qualidade, que avaliaram o percentual de camisas de cilindro classificadas como aceitáveis e no limite de aceitação.

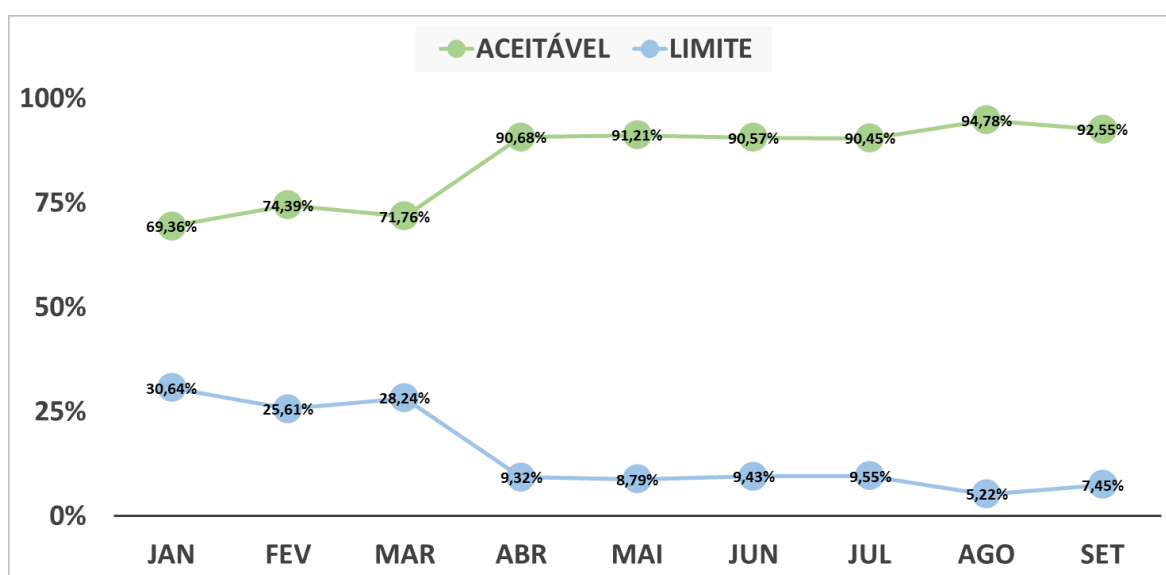
Antes da implementação do novo processo, o índice médio de peças no limite situava-se em aproximadamente 25%, indicando a necessidade de maior estabilidade microestrutural. Após a adoção das contramedidas, observou-se uma tendência de redução progressiva desse índice, acompanhada de aumento no percentual de peças totalmente conformes.

Os resultados obtidos após a implementação das ações demonstram que o processo passou a operar de forma estável, previsível e com controle efetivo das variáveis térmicas e operacionais. As análises laboratoriais confirmaram a predominância da grafita tipo A na microestrutura, refletindo a melhoria na estabilidade metalúrgica e na homogeneidade das camisas produzidas.

Em termos quantitativos, verificou-se a média de 8% de peças no limite de aceitação e mais de 90% classificadas como totalmente aceitáveis, indicando significativa redução da variabilidade do processo.

O Gráfico 1 apresenta a evolução mensal dos indicadores, evidenciando a manutenção dos ganhos e a constância produtiva ao longo dos meses subsequentes. Esse comportamento estável demonstra que as contramedidas foram efetivas não apenas na correção das causas fundamentais, mas também na sustentação do processo, assegurando repetibilidade e qualidade contínua na produção.

Gráfico 1 – Evolução mensal dos indicadores de conformidade



Fonte: Autores (2025)

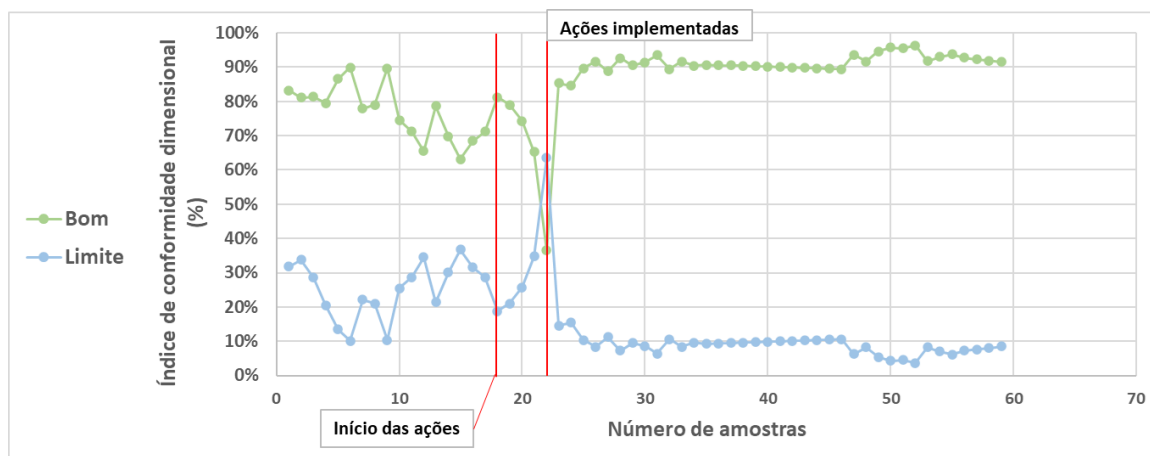
Já o Gráfico 2 demonstra a evolução do índice de conformidade metalográfica (%) ao longo das amostras analisadas, considerando a classificação dos resultados laboratoriais de grafita quanto à conformidade com a especificação técnica. Observa-se que, nas amostras iniciais, o processo apresentava elevada dispersão entre os percentuais de amostras aceitáveis e no limite, refletindo instabilidade microestrutural e variabilidade nas condições de solidificação.

A linha vermelha identifica o momento de início das ações corretivas e o ponto de implementação das contramedidas propostas no relatório A3. A partir desse marco, é possível verificar que inicialmente os resultados não se mostraram satisfatórios.

No entanto, provavelmente se deve ao fato de que as novas práticas ainda estavam sendo compreendidas pela equipe. No entanto, é possível observar que à medida que as ações foram se consolidando uma mudança abrupta de patamar foi percebida.

Com elevação do percentual de amostras aceitáveis para valores acima de 90% e redução das amostras no limite para cerca de 10%. Essa transição confirma a eficácia das ações implementadas e o ganho de estabilidade metalúrgica, assegurando a predominância da grafita tipo A e a homogeneidade da microestrutura das camisas produzidas.

Gráfico 2 – Evolução do índice de conformidade metalográfica por amostra



Fonte: Autores (2025)

Como etapa final, o acompanhamento dos indicadores de desempenho metalúrgico foi incorporado à rotina operacional, para assegurar a sustentação dos resultados e a consolidação das melhorias implementadas como novo padrão de processo.

Essa sistematização do monitoramento permite identificar desvios de forma precoce e promover intervenções preventivas, reforçando o aprendizado organizacional e a estabilidade microestrutural obtida. O controle contínuo das variáveis térmicas, associado à padronização das análises laboratoriais e à disciplina de execução, garantem que os ganhos alcançados se mantenham consistentes ao longo do tempo.

5. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos confirmam que a aplicação estruturada do Relatório A3 favoreceu o raciocínio científico na análise e solução de problemas complexos de processo. A condução sequencial das etapas, desde o diagnóstico até a verificação dos efeitos, permitiu estabelecer relações de causa e efeito claras e fundamentadas em evidências empíricas, assegurando a confiabilidade das conclusões.

A implementação conjunta das ações propostas mostrou-se determinante para a estabilidade do processo e para a melhoria da conformidade microestrutural. Entre as medidas adotadas, destacam-se a substituição da carga refratária, a limpeza preventiva dos difusores e a reorganização das rotinas de inspeção.

Em conjunto, essas intervenções reduziram significativamente a ocorrência de grafitas de super-resfriamento, aumentaram a uniformidade da aplicação e promoveram maior fluidez e homogeneidade da tinta, refletindo diretamente na estabilidade operacional observada após a implementação.

O Gráfico 1 evidencia o ganho de estabilidade mês a mês, com percentuais de peças aceitáveis superiores a 90% após a execução das contramedidas. Quando o indicador é analisado em maior detalhe no Gráfico 2.

Observa-se uma clara transição de comportamento, em que o processo passa a apresentar variabilidade reduzida e previsibilidade estatística, características associadas ao controle de causas especiais e à padronização operacional.

Esses resultados corroboram a literatura Lean, que destaca a importância da combinação entre estabilização de processo, disciplina operacional e aprendizado contínuo como fundamentos da melhoria sustentada (LIKER, 2021; ROTHER, 2010).

O estudo demonstra que a aplicação do Relatório A3 como método científico é eficaz não apenas para identificar causas-raiz, mas também para integrar aspectos técnicos, humanos e gerenciais, consolidando a melhoria contínua em ambientes industriais complexos como a fundição.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing*, estruturados por meio do Relatório A3, é uma abordagem eficiente para otimizar processos de fundição centrífuga de ferro cinzento. As ações implementadas, resultaram em redução expressiva das peças no limite de aceitação, consolidando a estabilidade microestrutural das peças.

Os resultados reforçam a importância de aliar a metodologia científica ao pensamento enxuto, permitindo compreender o processo de forma sistêmica e fundamentar decisões em dados concretos. Além disso, o trabalho contribuiu para o fortalecimento da cultura de melhoria contínua, promovendo aprendizado organizacional e engajamento coletivo em torno da busca pela excelência operacional.

Conclui-se que a filosofia *Lean*, quando aplicada de modo disciplinado e contextualizado, transcende o uso de ferramentas isoladas, configurando-se como um modo de pensar orientado à eliminação de desperdícios, à geração de valor e à sustentabilidade industrial.

Como continuidade do estudo, recomenda-se ampliar o monitoramento estatístico das variáveis térmicas e metalúrgicas, a fim de consolidar o controle do processo e expandir a aplicação do método a outras famílias de produtos fundidos.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering**. 9. ed., SI version ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.

DILAVARIAN, Santiago M. V. **Modelagem matemática da transferência de calor durante a fundição centrífuga**. dissertação—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 4 set. 2012.

GIL, Antônio C. **Como Elaborar Projetos De Pesquisa**. 7. ed. São Paulo, SP: Editora Atlas Ltda, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 945-1:** Microstructure of cast irons — Part 1: Graphite classification by visual analysis. 3 ed. Switzerland: International Organization For Standardization, 2008. 32 p.

JANCO, N. **Centrifugal casting**. Des Plaines, Ill., American Foundrymen's Society, 1983.

LIKER, Jeffrey K. **O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo**. Tradução: Francisco Araújo da Costa. 2. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2021.

LIKER, Jeffrey K.; HOSEUS, Michael. **A Cultura Toyota: A Alma Do Modelo Toyota**. 1. ed. [S.l.]: Bookman, 2009.

MARCONI, Marina De A.; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos De Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2003.

ODAWARA, Koichi. *Development of functionally graded materials by centrifugal casting method*. Tokyo: Japan Foundry Society, 2017.

OHNO, Taiichi. **O Sistema Toyota De Producao: Alem Da Producao Em Larga Escala**. [S.l.]: Artmed, 1997.

ROMANOFF, Melvin. *Centrifugal casting of metals*. Washington: U.S. Government Printing Office, 1981.

ROTHER, Mike. **Toyota kata: managing people for improvement, adaptiveness, and superior results**. New York: McGraw Hill Education, 2010.

SEVERINO, Antônio J. **Metodologia do trabalho científico**. 23. ed. [S.l.]: Cortez Editora, 2014.

SOARES, Glória de A. *Fundição: mercado, processos e metalurgia*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000. 123 p.

SOBEK II, Durward K.; SMALLEY, Art. **Entendendo O Pensamento a3: Um Componente Crítico Do Pdca Da Toyota**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2010.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

TAKEUCHI, Noboru. **The Toyota production system journey: the continuously changing features of TPS and lean thinking**. Tradução: Takehito Kimura. 1. ed. New York, NY Abingdon, Oxon: Routledge, Taylor & Francis Group, 2023.

VANALLE, Rosângela M.; SALLES, José A. A. Relação entre montadoras e fornecedores: modelos teóricos e estudos de caso na indústria automobilística Brasileira. **Gestão & Produção**, 2011.

WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. **A mentalidade enxuta nas empresas: elimine o desperdício e crie riqueza**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1998.

WOMACK, James P.; JONES, Daniel T.; ROOS, Daniel. **A Máquina Que Mudou O Mundo**. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Campus, 1992.