



DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA FTA-FMEA6 PARA MELHORIA DE PROCESSOS NA MANUFATURA

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE FTA-FMEA6 METHODOLOGY FOR PROCESS IMPROVEMENT IN MANUFACTURING

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA FTA-FMEA6 PARA LA MEJORA DE PROCESOS EN LA MANUFACTURA

Silas Almeida Lira ¹, Armando Dias Duarte ^{2*}, Adriano David Monteiro de Barros ³, & Jefferson Carlos de Oliveira Ribeiro Costa ⁴

¹ Autarquia Educacional do Belo jardim (AEB/FBJ), ^{2*} ³ Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), ⁴ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

¹ silas_al@hotmail.com ^{2*} adduarte@ufob.edu.br ³ adriano.david@ufob.edu.br ⁴ jefferson.ribeiro@ufpe.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 04.10.2023

Aprovado: 06.11.2023

Disponibilizado: 10.11.2023

PALAVRAS-CHAVE: Controle Estatístico do Processo; Análise de Árvore de Falhas; Modo de Falha e Efeito.

KEYWORDS: Statistical Process Control; Fault Tree Analysis; Failure Mode and Effect.

PALABRAS CLAVE: Control Estadístico del Proceso; Análisis del Árbol de Fallos; Modo de Falla y Efecto.

*Autor Correspondente: Duarte, A. D.

RESUMO

O presente estudo apresenta os resultados da metodologia desenvolvida através da integração das ferramentas de Árvore de Falhas (FTA) e Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA), denominada FTA-FMEA6. O objetivo foi reduzir a variação e aprimorar a estabilidade no processo de fundição por gravidade de insertos metálicos em uma subárea dedicada aos acumuladores elétricos de uma multinacional do setor automotivo, situada em Belo Jardim/PE. Após a aplicação da metodologia proposta, foram identificadas 21 oportunidades de aprimoramento e em seguida, ações foram implementadas que resultaram em modificações no equipamento e no processo, cujos indicadores de capacidade do processo, evidenciaram uma mudança significativa para a organização, por meio da redução da variação e instabilidade no processo.

ABSTRACT

This study presents the results of the methodology developed through the integration of Fault Tree Analysis (FTA) and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) tools, referred to as FTA-FMEA6. The aim was to reduce variation and enhance stability in the gravity casting process of metal inserts in a subsection dedicated to electrical accumulators of a multinational automotive company located in Belo Jardim, PE. After applying the proposed methodology, 21 improvement opportunities were identified, and subsequent actions were implemented, resulting in equipment and process modifications. The process capability indicators demonstrated a significant change for the organization through the reduction of process variation and instability.

RESUMEN

Este estudio presenta los resultados de la metodología desarrollada a través de la integración de las herramientas de Análisis de Árbol de Fallos (FTA) y Análisis de Modo y Efecto de Fallo (FMEA), conocida como FTA-FMEA6. El objetivo era reducir la variación y mejorar la estabilidad en el proceso de fundición por gravedad de insertos metálicos en una subsección dedicada a acumuladores eléctricos de una empresa automotriz multinacional ubicada en Belo Jardim, PE. Tras la aplicación de la metodología propuesta, se identificaron 21 oportunidades de mejora, y se implementaron acciones posteriores que resultaron en modificaciones en el equipo y el proceso. Los indicadores de capacidad del proceso demostraron un cambio significativo para la organización a través de la reducción de la variación y la inestabilidad del proceso.



1. INTRODUÇÃO

Diante do cenário de crescente competitividade entre as organizações e de clientes cada vez mais exigentes, com especificações mais rigorosas, as considerações dos requisitos de qualidade tornam-se críticas. Nesse contexto, é imprescindível contar com processos mais confiáveis e estáveis para alcançar resultados satisfatórios. Segundo Falconi (1992), um produto ou serviço de qualidade é aquele que atende de forma perfeita, confiável, acessível, segura e pontual às necessidades do cliente.

Uma das ferramentas que auxiliam no cumprimento desses requisitos é o Controle Estatístico do Processo (CEP), que segundo Soriano et al. (2020), compreende um conjunto de ferramentas bem estabelecidas que visam compreender, monitorar, controlar e aprimorar o desempenho dos processos produtivos ao longo do tempo. Um aspecto de destaque é a necessidade de estabilizar o processo ao implantar o CEP, eliminando as causas especiais de variação. Ao adotar metodologias de CEP, as organizações podem garantir maior confiabilidade dos processos, o que resulta em maior satisfação do cliente e vantagem competitiva. Diante das crescentes demandas das empresas modernas, a implementação do CEP torna-se essencial para alcançar um sucesso sustentável.

De acordo com o manual de Controle Estatístico do Processo (CEP) da Automotive International Action Group (AIAG), segunda edição (2005), causas especiais são fatores causadores de variação que afetam apenas parte do processo, sendo frequentemente intermitentes e imprevisíveis. Embora as cartas de controle auxiliem na identificação dessas causas, a literatura não oferece muitas metodologias que permitam eliminar as causas especiais de forma prévia, o que pode resultar em falhas na implantação do CEP. E para o aperfeiçoamento do processo, por meio da redução da variação, geralmente envolve a introdução proposital de mudanças no processo, seguida pela avaliação dos efeitos causados. O objetivo é obter uma compreensão mais profunda do processo, possibilitando a redução adicional das causas comuns de variação.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver uma metodologia de redução da variação e estabilização do processo para a implantação do CEP no processo de fabricação de uma empresa de acumuladores elétricos na cidade do Belo Jardim/PE. A metodologia desenvolvida foi baseada nas ferramentas de Árvore de Falhas e na Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA).

1.1 SETOR DE PEÇAS METÁLICAS FUNDIDAS

De acordo com Santana (2016), o processo de fundição para a fabricação de peças consiste em fundir uma liga metálica e preencher uma cavidade de um molde, onde a forma do fundido corresponde à peça projetada, após sua completa solidificação. A técnica de fundição remonta a mais de 6 mil anos atrás, quando o homem começou a utilizar metais de baixo ponto de fusão, como bronze e cobre, e posteriormente o ferro. Inicialmente, minérios de metais eram fundidos em fornos rudimentares feitos de cerâmica e pedras, para a produção de adornos e armas. Com o passar do tempo, essa tecnologia foi evoluindo até se tornar mais refinada e amplamente conhecida na atualidade.



Segundo a Revista Ferramental (2021), os tipos de processos de fundição incluem: a) fundição por gravidade que faz uso da força da gravidade para preencher e solidificar o metal no molde, sendo popularmente utilizado com moldes de areia devido ao baixo custo e alto percentual de reaproveitamento da areia após peneirada. Esse processo é amplamente empregado para produzir peças com geometrias complexas e em grande escala (Nizer et al., 2018); b) A fundição em areia que é o processo mais simples e comumente utilizado nas fundições atualmente. Nesse método, uma mistura refratária plástica (areia de fundição) é compactada para formar o molde e moldar a peça. A composição da mistura pode variar de acordo com a necessidade de acabamento e o tipo de areia escolhida; c) fundição em molde permanente que utiliza moldes constituídos de um metal com ponto de fusão mais elevado em comparação com o metal da peça a ser fundida. Devido ao seu custo, esses moldes são empregados apenas para produções em série, sendo aplicáveis somente a metais com temperatura de fusão inferior à do ferro e aço; e d) A fundição por centrifugação é empregada na fabricação de peças cilíndricas ou simétricas, onde o metal líquido é vertido em um molde que será rotacionado.

A força centrífuga resultante da rotação do molde força o metal a entrar sob pressão, permitindo que preencha pequenas seções e mantenha um bom contato com o molde e; e) fundição de precisão que pelo próprio nome sugere, difere este processo dos outros tipos de fundição. Por causa disso, essa fundição é bastante utilizada em peças com níveis complexos de detalhamento, como palhetas de turbina e equipamentos médicos.

1.2 PRINCIPAIS TÉCNICAS PARA ESTABILIZAR OS PROCESSOS

No mapeamento das causas de variação, existem diversas metodologias que podem ser aplicadas, sendo a mais utilizada a Fault-Tree Analysis (FTA), também conhecida como Árvore de Falhas (Taha, Yacout, & Shaban, 2023; Yazdi et al., 2023; Park et al., 2023; Öztürk et al., 2023; Chen et al., 2023), essa ferramenta foi inicialmente desenvolvida em 1961 pela Aeronáutica Americana e posteriormente aplicada pela Boeing Company. Sua apresentação formal ocorreu em 1965, durante uma conferência com a temática de segurança de sistemas (Sampaio, 2017). Em algumas situações o FTA é integrado a FMEA como apontam os trabalhos desenvolvidos por Peeters, Basten e Tinga (2018), Mutlu e Altuntas (2019), Liu et al. (2021) e Ansori et al. (2023) para o auxílio no desdobramento dos mecanismos de detecção de falhas.

Para Novôa et al. (2019) a FMEA é um método que busca identificar as falhas potenciais de componentes, sistemas, produtos ou processos e os efeitos gerados por essas falhas. Gera ações acertadas e na maioria das vezes de custo reduzido trazendo grandes benefícios para a organização, que pode ser aplicada em diferentes situações e contextos (Dias Júnior & Cavaignac, 2019; Pacheco, Ribeiro, & Cavaignac, 2019; Silva, Cavaignac, & Uchoa, 2020; Behnia et al., 2023; Ervural & Ayaz, 2023; Liu, Zhao, & Liu, 2023).



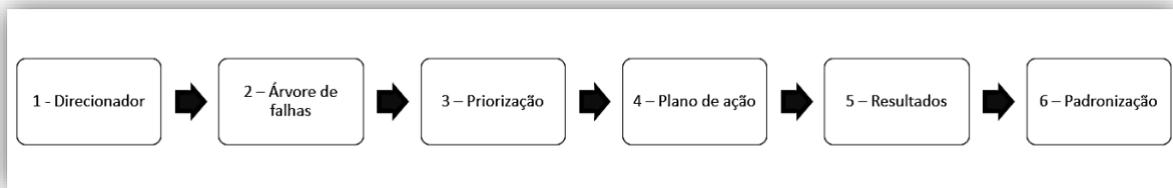
2. METODOLOGIA

A empresa onde o estudo foi realizado é uma parte integrante de uma multinacional fabricante de baterias automotivas, que inclui entre suas unidades fabris a área de injeção dos componentes plásticos das baterias, como caixas e tampas. Para a fabricação das tampas, são utilizados insertos metálicos que se tornam os polos das baterias. Esses insertos são produzidos em uma subárea da unidade plástica, composta por 35 colaboradores, e que opera em três turnos de trabalho. O estudo empregou a abordagem de observação sistemática, conforme descrita por Marconi e Lakatos (2022), a qual se valeu de instrumentos específicos para a coleta de dados em ambientes controlados, visando atender a objetivos predefinidos.

A subárea estudada possui processos produtivos diversos, incluindo a fundição por gravidade, fundição sob pressão, prensagem, usinagem e laminação. Para o desenvolvimento do trabalho, o foco foi no processo de fundição por gravidade, que é combinado com a fundição em molde permanente. O período de análise do estudo compreendeu o período de janeiro de 2022 a junho do mesmo ano.

O método proposto tem como denominação FTA-FMEA6 que consiste em seis passos para estabilização de processo (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma do método FTA-FMEA6



Fonte: Autores (2023).

No primeiro passo (Direcionador) é realizada a confecção do gráfico de Pareto para a identificação dos principais problemas nos processos produtivos, por meio dos principais problemas encontrados (Zahaikevitch et al., 2019). Já o segundo passo (Árvore de Falhas) é onde se realiza o mapeamento do processo, ligando o modo de falha a cada uma das suas causas, observando os 6M's (Máquina, Método, Meio Ambiente, Material, Mão de obra e Medição), nesta etapa é importante a colaboração de operadores e mantenedores para que nenhuma causa fique de fora. Nesta mesma etapa, também é feita a análise de causas correlacionadas e independentes conforme metodologia do FTA (Yazdi et al., 2023).

No terceiro passo foi elaborada uma matriz de priorização de ação usando como base a metodologia FMEA, conforme Quadro 1 e 2 a seguir, a combinação dos dois quadros, gera uma pontuação de Número de Prioridade de Ação (NPA) que direciona quais causas precisam ser priorizadas nas ações de melhorias. Esta abordagem parte do princípio de que, na maioria das vezes, as causas de instabilidade do processo permanecem ocultas e descontroladas. Ao mapear cada causa na etapa anterior e priorizá-las com base nos



controles, é possível isolar essas causas. O cálculo do NPA é feito através do produto entre a pontuação da Ocorrência (O) com a pontuação da Detecção (D) ($O \times D = NPA$).

Quadro 1. Classificação de ocorrência

O	Tipo de controle
1	Poka-yoke
2	Manutenção preventiva
3	Ficha técnica
4	Procedimento
5	Não existe

Fonte: Autores (2023).

Quadro 2. Classificação de detecção

D	Tipo de controle
1	Poka-yoke
2	Dispositivo com detecção automática e com sinalização sonora ou visual
3	Verificação no setup
4	Inspeção humana com uso de instrumentos por variável na estação
5	Inspeção humana por atributo na estação
6	Inspeção humana com uso de instrumentos por variável pós processamento
7	Inspeção humana por atributo pós processamento
8	Verificação na entrada do processo seguinte
9	Auditoria aleatória
10	Não existe

Fonte: Autores (2023).

No quarto passo, desenvolve-se um plano de ação para abordar as causas identificadas com maior valor de NPA. Essas ações podem envolver modificações nos processos, alterações na sequência de execução, revisão dos métodos utilizados, entre outras possibilidades.

No quinto passo, monitoram-se os resultados individuais das melhorias implementadas, bem como o impacto das ações na redução da variação do processo e nos indicadores da área. Nesta etapa, também é verificado se serão necessárias ações complementares para garantir a estabilidade do processo. Além disso, é fundamental avaliar até que ponto é viável prosseguir com as melhorias no processo, considerando a realidade de cada negócio. É importante analisar os impactos das ações em outros problemas, uma vez que existe interconexão entre eles.

O sexto e último passo assume uma importância crucial, pois a padronização das melhorias implantadas é essencial para assegurar a manutenibilidade dos resultados alcançados. Nesta etapa, procedimentos revisados e novos procedimentos devem ser oficializados, e os colaboradores envolvidos devem receber treinamento formal. Qualquer modificação nos equipamentos deve ser registrada em um banco de dados de lições aprendidas, para que novos equipamentos já incorporem as melhorias. Ademais, é necessário buscar outras padronizações possíveis, sempre considerando as particularidades de cada negócio.

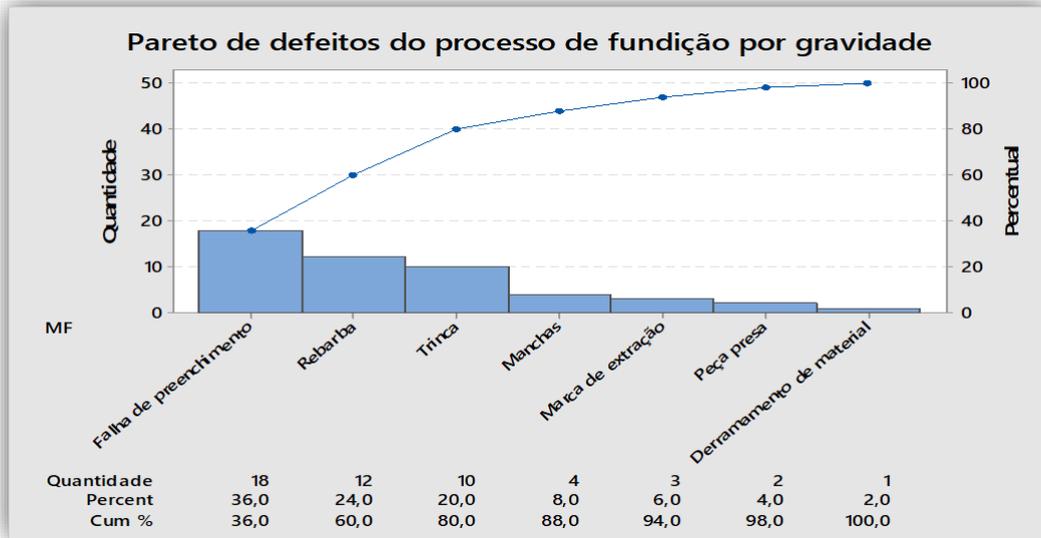
Para validar a metodologia proposta, foi selecionado um setor específico da unidade industrial, cujo processo de fundição por gravidade estava sujeito a um aumento significativo de problemas relacionados à manutenção. O objetivo da aplicação consistiu em estabilizar o referido processo, além de minimizar o índice de refugos e falhas.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais desafios identificados no primeiro passo, por meio do gráfico de Pareto (Figura 2), foram a insuficiência de preenchimento do molde – resultante de uma quantidade inadequada de material – e a ocorrência de trincas decorrentes do impacto no produto. Importante salientar que, caso um produto com trincas progrida ao longo do fluxo de produção, é possível ocorrer a migração de solução ácida por capilaridade, comprometendo, assim, a função primária do produto.

Figura 2. Gráfico de Pareto com as principais causas de falhas no processo

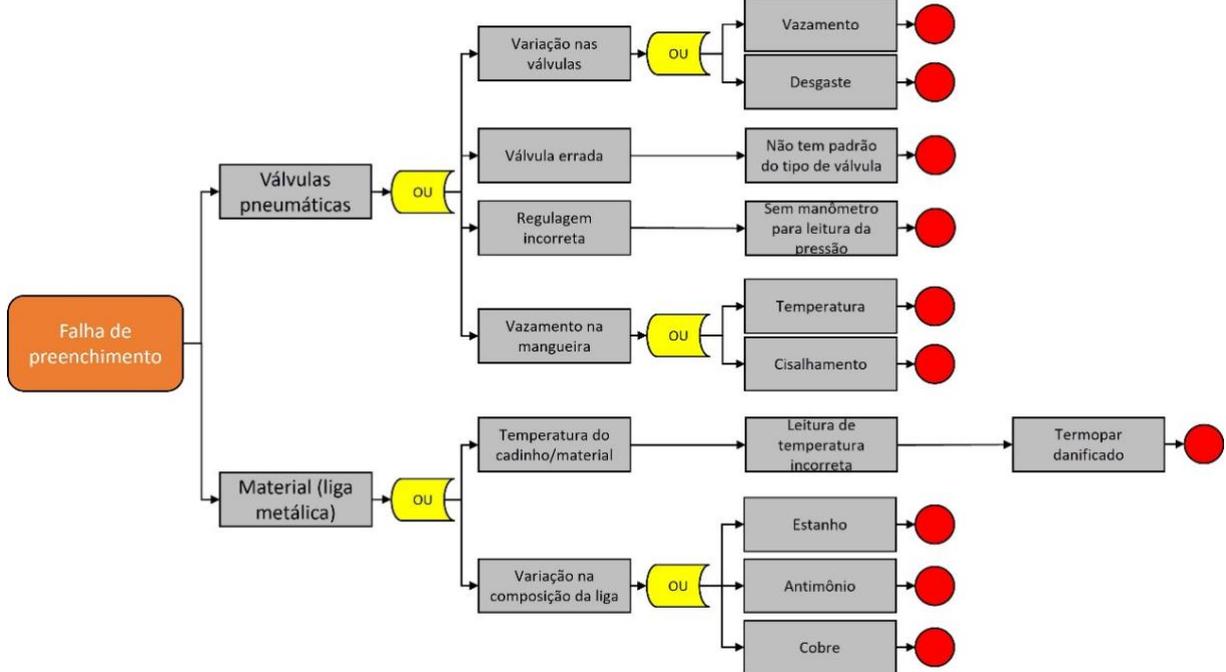


Fonte: Autores (2023).

Conforme observado na Figura 2, por meio da análise 80/20, verificou-se que as falhas de preenchimento, rebarba e trinca, consideradas no processo de fundição por gravidade, representaram cerca de 80% de todas as ocorrências de falhas. Diante disso, optou-se por prosseguir com o problema relacionado à falha do preenchimento, visto que foi identificado como o mais frequente entre os três priorizados. No Passo 2, então, foi elaborada a árvore de falhas, que pode ser visualizada nas Figuras 3 e 4.

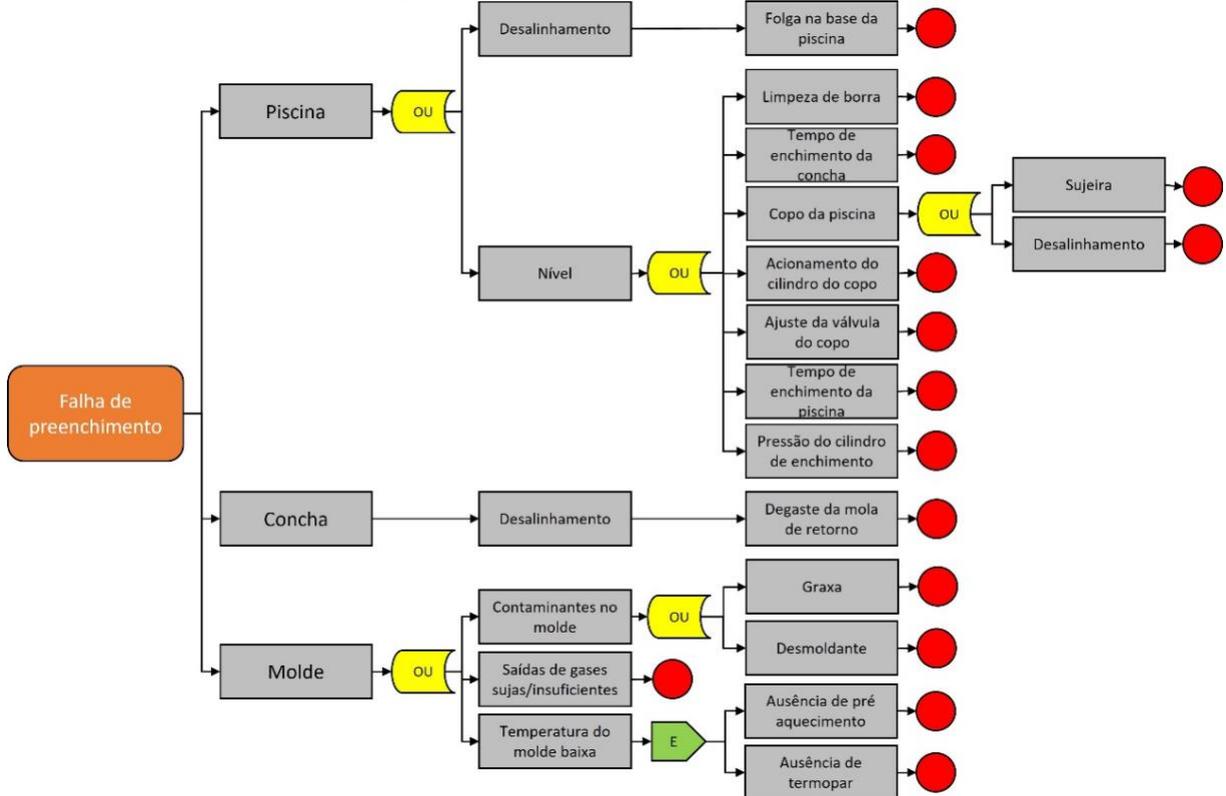


Figura 3. Primeira parte da árvore de falhas



Fonte: Autores (2023).

Figura 4. Segunda parte da árvore de falhas



Fonte: Autores (2023).



A falha de preenchimento é caracterizada pela inadequação do preenchimento completo da peça durante o processo de fundição por gravidade. Essa ocorrência é resultado de cinco principais conjuntos de causas identificados na análise da árvore de falhas.

O primeiro conjunto de causas está relacionado à piscina, responsável por dosar a quantidade de material fundido no molde. Esse conjunto engloba duas principais causas de falha: o desalinhamento e o nível da piscina. O desalinhamento causa um preenchimento desigual do molde, levando a falhas nas cavidades preenchidas por último. Já um nível baixo da piscina resulta em uma quantidade insuficiente de material fundido, ocasionando falhas em todas as cavidades.

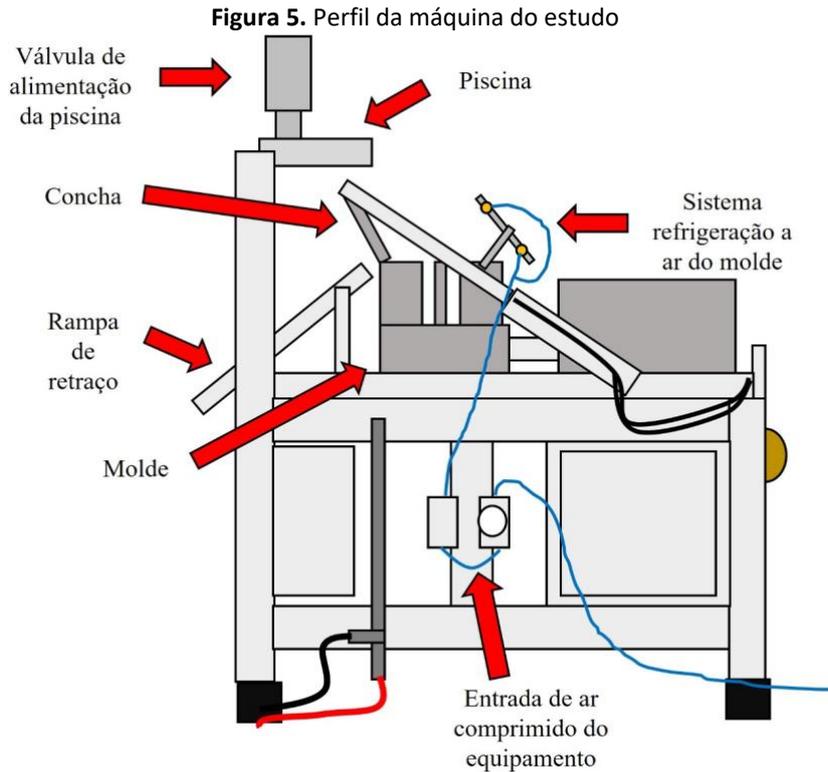
A concha, onde estão localizados os furos que direcionam o material para as cavidades do molde, também apresenta relevância nesse contexto. Se a concha estiver desalinhada, os furos ficarão em posições inadequadas, prejudicando a vazão do material fundido e causando falhas no preenchimento.

O molde, por sua vez, exerce influência sobre o problema em três formas distintas. Primeiramente, a presença de contaminantes no molde, como graxa, desmoldante ou pedaços de material solidificado, pode comprometer o processo. Em segundo lugar, saídas de gás sujas ou insuficientes impedem a correta saída do ar de dentro do molde, prejudicando o preenchimento adequado do material fundido nas cavidades. Por fim, a baixa temperatura do molde contribui para o resfriamento prematuro do material fundido, aumentando sua resistência ao fluir nas cavidades do molde.

As válvulas pneumáticas desempenham um papel fundamental no funcionamento geral do equipamento, afetando aspectos como o giro da piscina, a abertura da válvula de dosagem do material fundido e o resfriamento do molde. Se houver mau funcionamento ou erros na regulagem dessas válvulas, todo o processo pode ser comprometido.

Por fim, a escolha da liga metálica utilizada também influencia na ocorrência de falhas de preenchimento. Temperaturas inadequadas ou componentes químicos fora do range especificado podem afetar a fluidez do material durante o preenchimento das cavidades do molde, impactando negativamente o resultado final. A Figura 5 ilustra todos os componentes citados anteriormente:





Fonte: Autores (2023).

A identificação de 21 causas raízes responsáveis pelo problema de falha de preenchimento é de extrema importância para o próximo passo do processo, que consiste na priorização das ações corretivas a serem implementadas. Considerando a limitação dos recursos financeiros, torna-se imprescindível estabelecer uma ordem de prioridade para garantir a resolução mais eficiente do problema. Portanto, o Passo 3 do processo sugere uma definição de priorização com base na metodologia FMEA.

Dado que a FTA considera apenas um modo de falha e a severidade é constante, essa métrica foi desconsiderada nesse contexto. Em vez disso, optou-se por utilizar os critérios de ocorrência e detecção para calcular o NPA. A classificação das ações corretivas é estabelecida com base nos níveis de controle preventivo (ocorrência) e detectivo (detecção) (Quadro 3).



Quadro 3. Classificação dos mecanismos de falha para priorização de ação.

Nº	Causa e mecanismo de falha	Controle preventivo	O	Controle detectivo	D	NPA
1	Saída de ar sujas/insuficientes	Manutenção preventiva	2	Inspeção humana por atributo na estação	5	10
2	Temperatura do chumbo baixa por termopar quebrado	Manutenção preventiva	2	Não existe	10	20
3	Desalinhamento da concha por desgaste nas molas	Não existe	5	Não existe	10	50
4	Desalinhamento da piscina por folga na base da piscina	Não existe	5	Não existe	10	50
5	Temperatura do molde baixa	Não existe	5	Não existe	10	50
6	Nível da concha baixo por tempo de enchimento da concha baixo	Ficha técnica	3	Auditoria aleatória	9	27
7	Nível da concha baixo por limpeza da borra	Procedimento	4	Inspeção humana por atributo na estação	5	20
8	Nível da concha baixo por tempo de enchimento da piscina baixo	Ficha técnica	3	Não existe	10	30
9	Nível da concha baixo por pressão do cilindro de enchimento baixa	Não existe	5	Não existe	10	50
10	Nível da concha baixo por copo da piscina com sujeira	Manutenção preventiva	2	Não existe	10	20
11	Nível da concha baixo por desalinhamento do copo da piscina	Manutenção preventiva	2	Não existe	10	20
12	Nível da concha baixo por falha no acionamento do cilindro do copo	Manutenção preventiva	2	Não existe	10	20
13	Nível baixo da concha por desregulagem da válvula do copo	Manutenção preventiva	2	Não existe	10	20
14	Varição nas válvulas pneumáticas por vazamento	Manutenção preventiva	2	Não existe	10	20
15	Varição nas válvulas pneumáticas por desgaste	Manutenção preventiva	2	Não existe	10	20
16	Válvula pneumática errada	Não existe	5	Não existe	10	50
17	Válvula pneumática com regulagem incorreta	Não existe	5	Não existe	10	50
18	Vazamento de ar nas mangueiras	Não existe	5	Inspeção humana por atributo na estação	5	25
19	Molde contaminado com desmoldante	Não existe	5	Não existe	10	50
20	Molde contaminado com graxa	Não existe	5	Não existe	10	50
21	Varição no estanho, antimônio e cobre da liga de chumbo	Não existe	5	Inspeção humana com uso de instrumentos por variável na estação	4	20

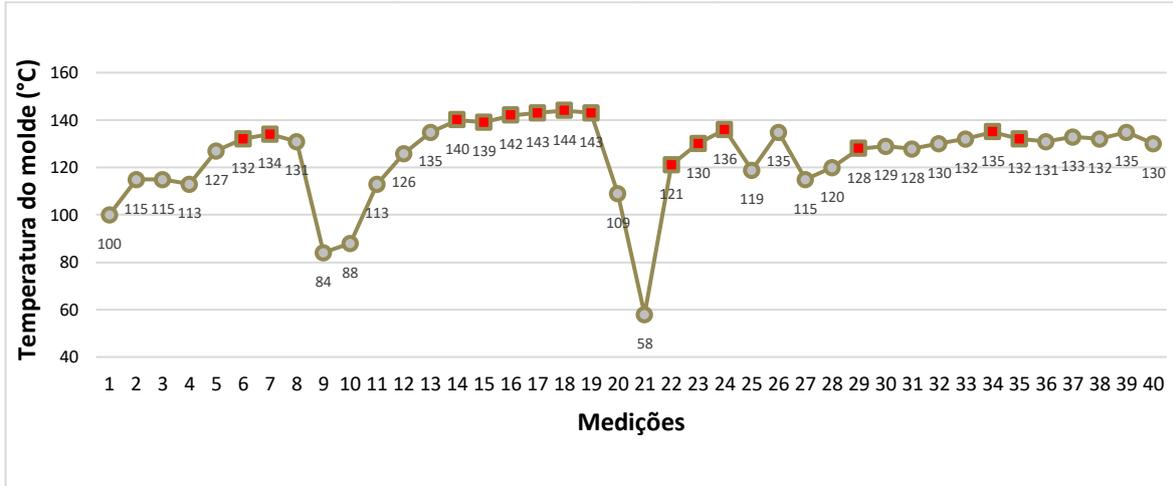
Fonte: Autores (2023).

Após a implementação das duas primeiras ações do plano, iniciou-se o monitoramento da temperatura do molde, com a pressão do ar de refrigeração definida em 1 bar, dando início ao Passo 5.

A Figura 6 indica as quarenta (40) primeiras medições, evidenciando a variação do processo ao longo do tempo, com um intervalo de 1 hora entre cada medição. Os pontos que estão na forma de um quadrado, indicam a ocorrência de trincas nas peças.



Figura 6. Primeira avaliação no processo.

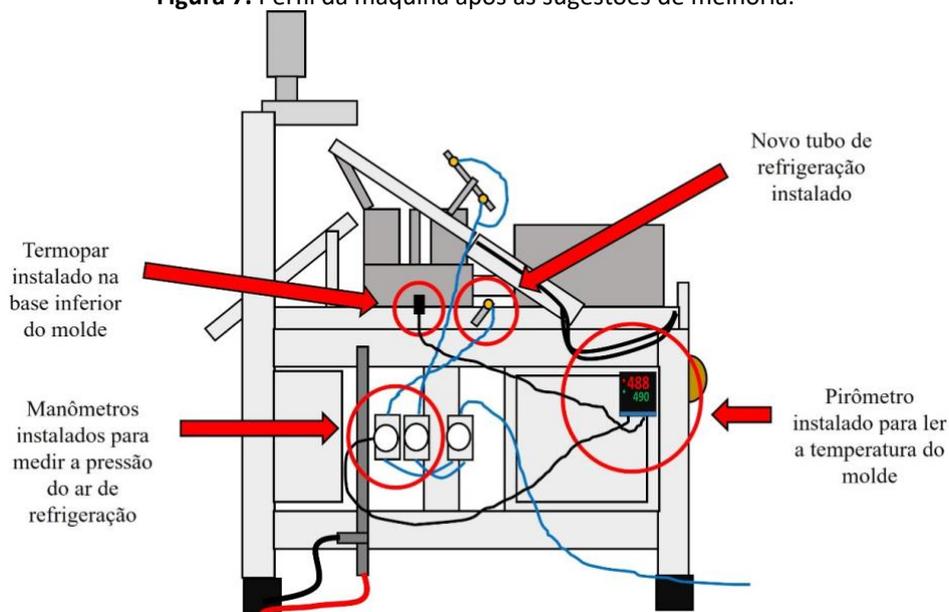


Fonte: Autores (2023)

Após a análise da Figura 6, foi possível observar que a temperatura média do molde durante a produção era de 134°C. Um ponto importante revelado é que valores superiores a 120°C, o número de ocorrências de trincas nas peças foi consideravelmente elevado, indicando a necessidade de melhorias no sistema de refrigeração. As temperaturas mais baixas registradas indicam que o equipamento estava parado em certos momentos, o que resultou na diminuição da temperatura do molde. Essa condição será resolvida por meio da terceira ação, que envolve a instalação de resistências no molde.

Uma das melhorias aplicadas foi o reforço de ar no molde, no entanto, ao deixar o ar soprando continuamente, observou-se que o molde estava resfriando excessivamente, o que aumentou as ocorrências de falhas. Para solucionar esse problema, o acionamento da válvula pneumática passou a ser controlado pelo pirômetro, onde uma temperatura alvo é definida. Se a temperatura do molde ultrapassar esse valor, o reforço de ar é acionado; quando fica abaixo da temperatura alvo, ele é desligado (Figura 7).

Figura 7. Perfil da máquina após as sugestões de melhoria.



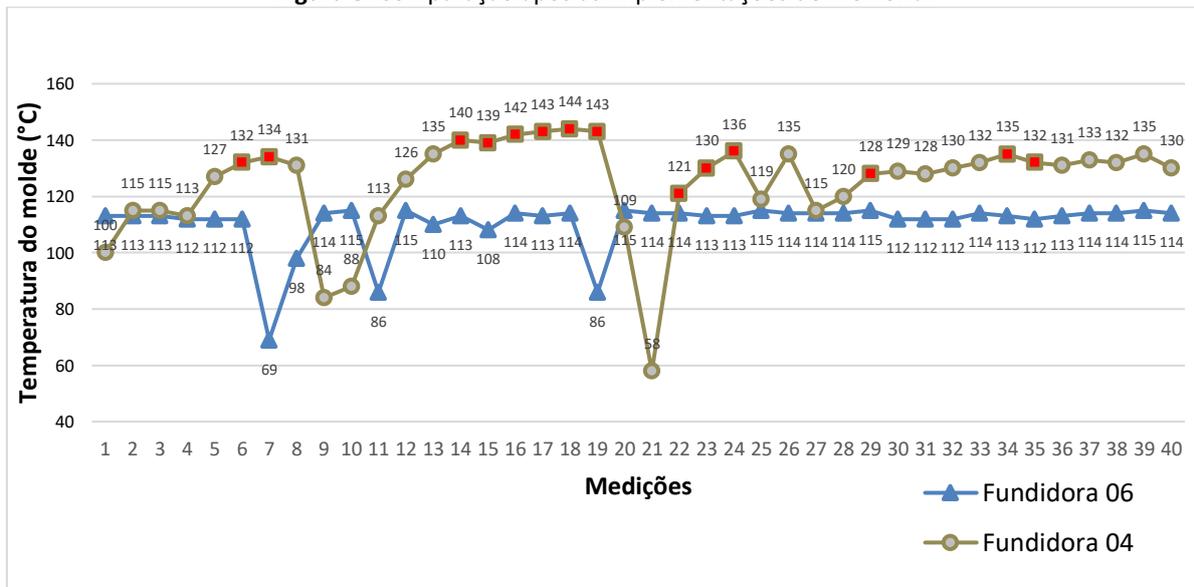
Fonte: Autores (2023).



Essa combinação de melhorias resultou em uma redução significativa na variação de temperatura e permitiu regular a temperatura dentro de uma faixa que não gera trincas ou falhas de preenchimento.

A Figura 8 demonstra o comparativo de variação entre duas fundidoras, uma com as melhorias implementadas e outra sem, mostrando os impactos positivos das ações corretivas no processo de fundição.

Figura 8. Comparação após as implementações de melhoria.



Fonte: Autores (2023).

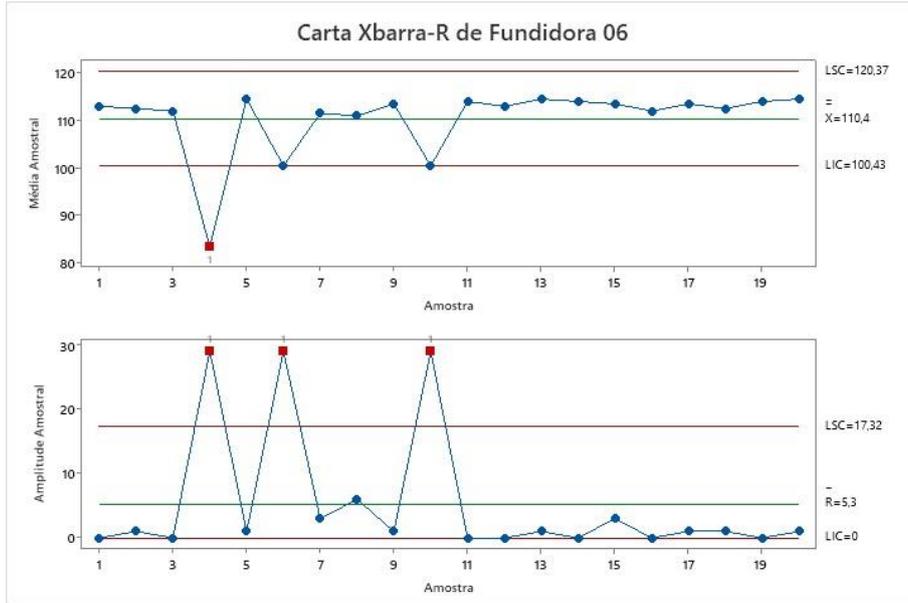
O gráfico apresentado na Figura 8 revela uma notável mudança na média de temperatura, que agora está em 115°C, além de uma redução significativa na variação em torno dessa média. É importante ressaltar que não foram registradas ocorrências de trincas nas peças após a implementação das melhorias.

Para proporcionar uma melhor comparação da estabilidade do processo, foram confeccionados dois gráficos de carta de controle da média (X) e da Amplitude (R). Estes gráficos são úteis para monitorar o processo ao longo do tempo, permitindo visualizar a estabilidade da média e da variação das temperaturas do molde (Figuras 9 e 10).

Além disso, também foi realizada uma análise de capacidade do processo com base na especificação de temperatura de 100°C ± 20°C. Essa análise foi realizada utilizando a ferramenta Minitab 2017, que é uma ferramenta de análise estatística utilizada na indústria para a melhoria de processos.

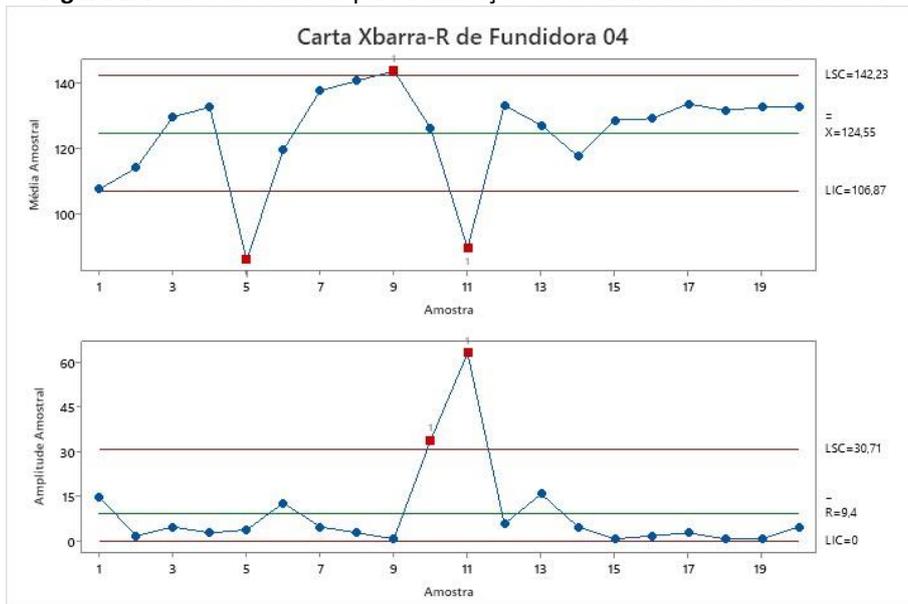


Figura 9. Carta de controle para verificação da estabilidade da fundidora 06.



Fonte: Autores (2023).

Figura 10. Carta de controle para verificação da estabilidade da fundidora 04.



Fonte: Autores (2023).

Conforme evidenciado nas Figuras 9 e 10, é possível observar que as temperaturas baixas, causadas pela ausência do pré-aquecimento, ainda estão levando o processo para fora de controle. No entanto, é perceptível a diferença entre os limites de controle nas duas fundidoras, o que confirma que a fundidora 06 apresenta um desvio padrão menor do que a fundidora 04.

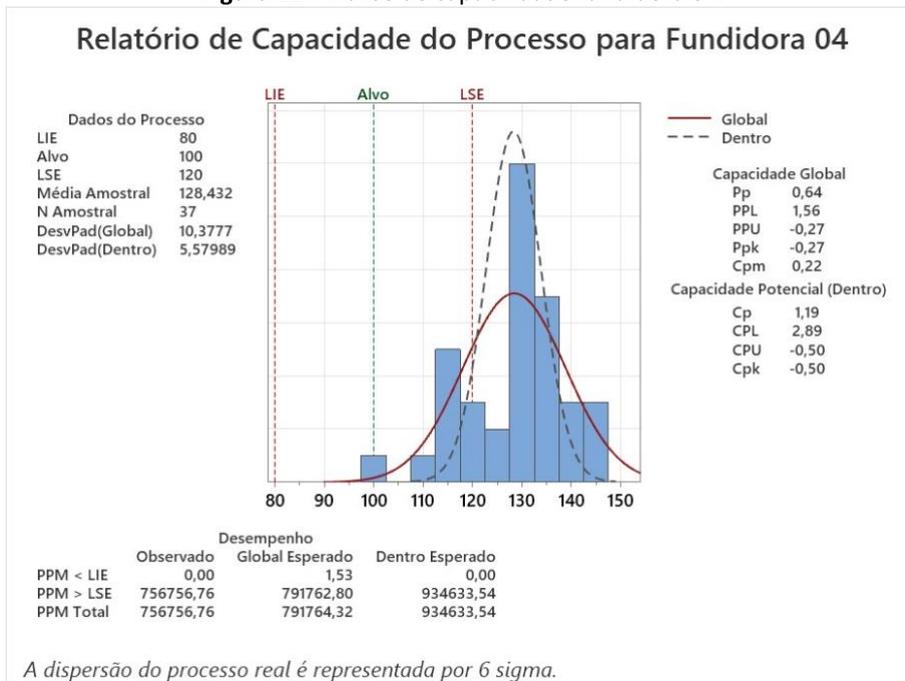
Essa diferença nos limites de controle indica que a fundidora 06 possui uma maior estabilidade e consistência em relação às temperaturas do molde, enquanto a fundidora 04 demonstra maior variabilidade nos resultados. A redução do desvio padrão na fundidora 06



pode ser atribuída às melhorias implementadas, como a instalação de resistências no molde e o controle do reforço de ar por meio do pirômetro.

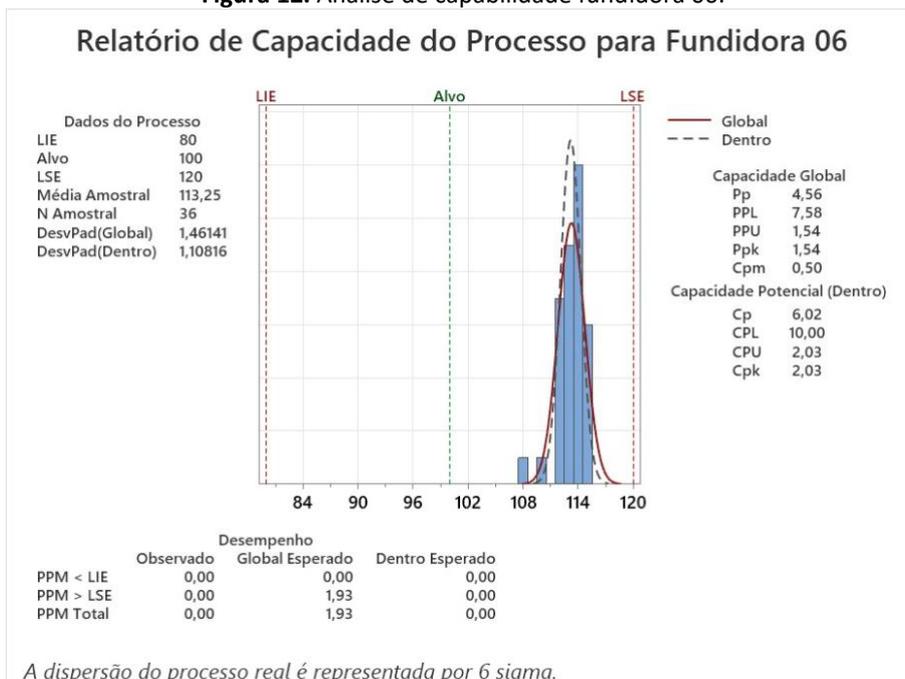
A diferença entre as fundidoras fica ainda mais visível nas Figuras 11 e 12, onde é possível analisar a capacidade de ambos os processos. Nesses gráficos, foram retiradas as temperaturas após o reinício do equipamento, focando apenas nas medições realizadas durante o funcionamento normal do processo.

Figura 11. Análise de capacidade fundidora 04.



Fonte: Autores (2023).

Figura 12. Análise de capacidade fundidora 06.



Fonte: Autores (2023).



A análise dos gráficos de capacidade revelam informações valiosas sobre o desempenho dos processos de fundição por gravidade nas fundidoras 04 e 06. Na fundidora 04, conforme evidenciado na Figura 11, o C_p foi de 1,19, indicando que a variação das medições está significativamente grande, o que reduz a capacidade potencial do processo. Além disso, o C_{pk} de -0,5 indica que muitas medições estão fora dos limites de especificação, o que é preocupante e demonstra a necessidade de melhorias urgentes para tornar o processo mais controlado e capaz de atender às especificações de temperatura.

Por outro lado, conforme observado na Figura 12, na fundidora 06 o C_p foi de 6,02, mostrando uma evolução significativa em comparação com a fundidora 04. Isso já indica uma maior capacidade potencial do processo. Além disso, ao ajustar a temperatura alvo no pirômetro para 100°C, é possível aproximar-se ainda mais da capacidade potencial projetada de 6,02. O C_{pk} de 2,03 também é promissor, pois indica que o processo está mais capaz de atender às especificações, com uma quantidade significativamente menor de produtos fora do limite estabelecido.

A literatura define que um processo é considerado capaz de atender às especificações quando o C_{pk} é maior que 1,33, o que representa um nível baixo de produtos fora do especificado. Nesse contexto, a fundidora 06 está mais próxima desse padrão, demonstrando que as melhorias implementadas tiveram um impacto positivo na redução da variação e no controle do processo (Silveira, 2012).

Em colaboração com estudos anteriores, a junção do FMEA e FTA, apresentam resultados satisfatórios durante o processo de melhoria conforme os trabalhos de Peeters, Basten e Tinga (2018), Mutlu e Altuntas (2019), Liu et al. (2021) e Ansori et al. (2023).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As melhorias implementadas em conjunto com os resultados obtidos na análise de capacidade, por meio da aplicação em um estudo de caso, demonstram que as ações corretivas adotadas tiveram um impacto positivo no processo de fundição. A estabilização da temperatura do molde e a redução das variações contribuíram para eliminar as trincas nas peças e garantir a qualidade dos produtos finais. Esses resultados refletem a eficácia da metodologia proposta diante da realidade de recursos limitados nas organizações, trazendo uma forma estruturada de priorizar onde será investido os recursos de pessoal e financeiro com uma certeza de atingimento de bons resultados. Observa-se que a média da Fundidora 06 se encontra descentralizada em relação aos limites de especificação. Como sugestão para trabalhos futuros, considera-se o alinhamento do processo dentro dos limites de especificação ou a revisão dos limites de especificação, a fim de centrar o processo na média. Foi possível confirmar também que a teoria das causas de variabilidade do processo são aquelas sem nenhum tipo de controle, e que a melhor forma de estabilizar o processo é implantar controles preventivos e/ou detectivos para essas causas, destacando a importância de um controle rigoroso do processo para obter resultados consistentes e satisfatórios na produção.



REFERÊNCIAS

- Ansori, I. et al. (2023). Enhancing Brake System Evaluation in Periodic Testing of Goods Transport Vehicles through FTA-FMEA Risk Analysis. *Automotive Experiences*, 6(2). <https://doi.org/10.31603/ae.8394>
- Behnia, F., Ahmadabadi, H. Z., Schuelke-Leech, B. A., & Mirhassani, M. (2023). Developing a Fuzzy Optimized Model for Selecting Maintenance Strategy in Paper Industry: An Integrated FGP-ANP-FMEA approach. *Expert Systems with Applications*, 120899.
- Calegari, G. & Ferreira, T. S. (2018). *Aumento da Rentabilidade da Linha de Bebidas de Uma Cooperativa Agroindustrial pela Execução de um Projeto Lean Seis Sigma*. Trabalhos de Conclusão de Curso do DEP, 13(1).
- Chen, K. T., Chen, H. Y. W., Bisantz, A., Shen, S., & Sahin, E. (2023). Where failures may occur in automated driving: a fault tree analysis approach. *Journal of cognitive engineering and decision making*, 17(2), 147-165. <https://doi.org/10.1177/15553434221116254>
- Dias Júnior, E. B. & Cavaignac, A. L. de O. (2019). Avaliação de riscos e priorização de falhas por meio do FMEA em serviços elétricos de baixa, média e alta tensão. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(3), 214-225.
- Ervural, B. & Ayaz, H. I. (2023). A fully data-driven FMEA framework for risk assessment on manufacturing processes using a hybrid approach. *Engineering Failure Analysis*, 152, 107525. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107525>
- Exler, R. B., & de Lima, C. J. B. (2017). Controle Estatístico de Processos (CEP): uma ferramenta para melhoria da qualidade. *Revista de Administração e Contabilidade da FAT*, 4(3), 78-92.
- Falconi, V. (1992). *TQC Controle da Qualidade Total no estilo japonês*. Rio de Janeiro: Bloch, 158. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120899>
- Liu, Z., Li, Y., Zhang, N., Liang, Z., & Li, F. (2021). Reliability analysis of CFRP-packaged FBG sensors using FMEA and FTA techniques. *Applied Sciences*, 11(22), 10859. <https://doi.org/10.3390/app112210859>
- Liu, Z., Zhao, Y. & Liu, P. (2023). An integrated FMEA framework considering expert reliability for classification and its application in aircraft power supply system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106319.
- Malheiro, M., Souza, M., Borges, M. F., dos Santos Nunes, L., & de Carvalho Gomes, L. (2019). Implantação da ferramenta da qualidade FMEA no processo de manutenção de empilhadeiras de 7 toneladas em uma empresa de agenciamento marítimos. *Revista Técnico-Científica do IFSC*, 1(8), 50-50.
- Marconi, M. D. A. & Lakatos, E. M. (2022). *Metodologia Científica* (8th ed.). Grupo GEN. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9786559770670>.
- Moura, C. (2000). *Análise de modo e efeitos de falha potencial (FMEA)*. Manual de Referência.
- Mutlu, N. G. & Altuntas, S. (2019). Hazard and risk analysis for ring spinning yarn production process by integrated FTA-FMEA approach. *Textile and Apparel*, 29(3), 208-218. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.482167>.
- Nizer, P., Rahmeier, P. H. N., de Oliveira Littiere, T., de Rosso, D. D. O., & Wiedenhof, A. G. Análise geométrica dos canais de ataque no processo de fundição por gravidade. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, 10(2).
- Öztürk, F., Sakalli, A. E., Gökmen, T. A. K., & Tarakçı, E. (2023). Tenerife Accident Analysis: a comparison of Fault Tree Analysis, Failure Mode and Effects Analysis and Causal Analysis based on System Theory. *Gazi University Journal of Science*, 36(2), 773-790. <https://doi.org/10.35378/gujs.1014604>
- Pacheco, Y. C. K. G., Ribeiro, R. K. P., & Cavaignac, A. L. de O. (2019). Utilização da análise de modos de falhas e efeitos (FMEA) como ferramenta de prevenção de acidentes em operações com usos de pontes rolantes. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(4), 10-24.
- Park, S. J., Kwak, Y. G., Song, S. G., & Kang, F. S. (2023). Comparison of reliability and economic feasibility for the three configurations of multiple battery charging systems. *IET Electrical Systems in Transportation*, 13(2), e12082. <https://doi.org/10.1049/els2.12082>.
- Peeters, J. F. W., Basten, R. J., & Tinga, T. (2018). Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner. *Reliability engineering & system safety*, 172, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.11.024>
- Revista Ferramental. *Fundição: o que é e como funciona?* (2021). Recuperado de <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/fundicao-o-que-e-e-como-funciona/>
- Santana, A. D. S. (2016). Identificação dos Principais Defeitos de Fundição Através da Aplicação de Ferramentas da Qualidade: Estudo de Caso em uma Fundição de Peças Metálicas. 2016. 96 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Produção) - Centro Universitário Católica de Vitória, Vitória, Espírito Santo.
- Santos, A. G. S., Jorge, G. P. do N., & Cavaignac, A. L. de O. (2019). FMEA como ferramenta de



identificação dos riscos ao trabalhador da construção civil. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(3), 19–34.

Silva, C. V. N., Cavaignac, A. L. de O., & Uchoa, J. G. L. (2020). Análise dos modos e efeitos de falhas na instalação de energia solar em telhados residenciais de Imperatriz/MA: uma abordagem da ferramenta FMEA. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 6(7), 45-57.

<https://doi.org/10.47456/bjpe.v6i7.32582>.

Silveira, C. B. (2012). Cp e Cpk—Índices de capacidade de um processo. *Citisystems, São Paulo*, nov.

Soriano, F. R., Oprime, P. C., & Lizarelli, F. L. (2020). Os fatores que devem ser considerados para uma efetiva implantação do controle estatístico de processo (CEP): uma revisão de literatura. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, 15(1), 71-71.

Taha, H. A., Yacout, S., & Shaban, Y. (2023). Online failure analysis and autonomous risk control scheme for electric buses. *Engineering Failure Analysis*, 107629.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107629>.

Yazdi, M., Mohammadpour, J., Li, H., Huang, H. Z., Zarei, E., Pirbalouti, R. G., & Adumene, S. (2023). Fault tree analysis improvements: a bibliometric analysis and literature review. *Quality and Reliability Engineering International*.

<https://doi.org/10.1002/qre.3271>.

Zahaikevitch, E. V., Gura, A., Fonseca, M. H., Bittencourt, J. V. M., & de Francisco, A. C. (2019). Contribuição das Ferramentas da Gestão da Qualidade para a Gestão do Conhecimento nas Empresas: Uma Revisão Bibliométrica na base de dados Scopus. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, 4(1).

