

ANÁLISE DE FALHAS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS DE UMA INDÚSTRIA DE TURBOCOMPRESSORES POR MEIO DA METODOLOGIA A3

Gabriel de Faria Vieira¹
Thiago Shoji Obi Tamachiro²

Resumo: *A redução de refugo é um aspecto importante para a sustentabilidade e competitividade das empresas. Neste contexto, a empresa Benerti, que é especializada nos processos de fundição e usinagem de componentes para turbocompressores de alta performance, enfrenta um alto índice de refugo no processo de usinagem da peça denominada de Carcaça Central. Esse problema está relacionado devido a falhas no processo anterior, durante a etapa de fundição, que é utilizado moldes de areia verde e liga de ferro cinzento. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é encontrar as causas raízes e reduzir as falhas de fundição nas peças brutas, visando diminuir o índice de refugo durante a operação de usinagem. Para alcançar esse objetivo, será utilizada a metodologia A3 que conta com várias ferramentas para identificação de causas raízes e implementação de plano de ação de soluções. A partir da aplicação de soluções, tais como, definição da quantidade de inoculante a ser utilizado na liga de ferro fundido, manutenção de equipamentos e treinamento do gerente de produção, foi possível reduzir a taxa de peças defeituosas de 50% para 12,5% e obter uma economia de R\$43.021,00 de custos de peças não-conformes.*

Palavras-chave: *Fundição. Metodologia A3. Usinagem. Análise de Falhas. Turbocompressor.*

1. INTRODUÇÃO

A redução de refugos e desperdícios é um tema crítico nas indústrias modernas, especialmente em setores onde a precisão e a eficiência são fundamentais. Minimizar a produção de resíduos não apenas resulta em economias significativas, mas também contribui para uma produção mais sustentável, reduzindo o impacto ambiental e otimizando a utilização de recursos. Em processos de fundição e usinagem, essa questão é ainda mais relevante, pois a qualidade das peças fabricadas é diretamente influenciada por cada etapa do processo produtivo (Marques *et al.*, 2016).

Neste contexto, a Benerti, que é uma empresa especializada em fundição e usinagem de componentes para turbo de alta *performance*, enfrenta um alto índice de refugo na usinagem da peça Carcaça Central, que é o "coração" do turbocompressor do caminhão.

O turbocompressor é um elemento que promove economia de combustível e alto desempenho no motor de veículos a combustão. A turbina, que faz parte do turbocompressor, funciona coletando os gases expelidos do pistão do motor, onde a pressão rotaciona o eixo central do conjunto, fazendo com

¹ Acadêmico do curso de Engenharia de Produção do Centro Universitário União das Américas – UniAmérica, Foz do Iguaçu, Paraná. E-mail: gabrielfariavieira800@gmail.com

² Docente Orientador do curso de Engenharia de Produção do Centro Universitário União das Américas – UniAmérica, Foz do Iguaçu, Paraná. E-mail: thiago.tamachiro@descomplica.com.br

que a compressora puxe o ar do radiador do veículo e jogue para o Intercooler, onde é resfriado o ar para ser jogado no pistão do motor.

Neste sistema, a Carcaça Central é a peça mais crítica, pois é a interface de montagem das outras duas peças (turbina e compressora), e faz o apoio do eixo de rotação que pode chegar a 1.900km/h. Devido a sua importância no turbocompressor, a peça não pode ter porosidades e defeitos que estejam fora do critério do cliente.

Os problemas de Porosidade estão relacionados a falhas no processo anterior, que ocorre durante a etapa de fundição, sendo um dos métodos mais antigos de fabricação de peças. Neste processo, são utilizados moldes de areia verde onde devem ser realizados a limpeza do molde antes da vazagem do ferro fundido, que é uma liga de composição química de ferro cinzento, onde é adicionado inoculante e adicionado cada elemento conforme especificado pelo cliente. A falha de porosidade pode ser causada por muitas variáveis, como por exemplo, umidade do molde ou do macho, falta de limpeza dos moldes, utilização incorreta do inoculante, velocidade de vazão do ferro fundido e intervenções do ambiente, como umidade do ar, entre outros.

Para identificar as causas das falhas na fundição, é necessário aplicar ferramentas da qualidade, como diagrama de Ishikawa, a matriz de priorização e os 5 porquês. Após a identificação das causas fundamentais, pode ser levantada as soluções e estabelecer um plano de ação. Com a melhora do processo, haverá uma redução significativa nas peças com falhas de fundição, que se tornam visíveis apenas após a usinagem, garantindo assim a redução de custos.

Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é reduzir as falhas de fundição nas peças brutas em 50%, assim visando diminuir o índice de refugo durante a operação de usinagem.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O descarte de peças Carcaça Central por conta de falhas de fundição foi o estopim mais considerável para o início das pesquisas em livros e artigos que tratam sobre o assunto, foi importante estabelecer uma metodologia assertiva e de fácil compreensão, devendo ter o histórico das falhas coletadas mostrando o estado atual da empresa em relação às falhas, para assim dar sequência com a pesquisa para o desenvolvimento, investigação, levantamento das possíveis causas raízes e assim estabelecendo ações para cercar os problemas estabelecidos.

O método de pesquisa utilizado foi a pesquisa-ação, onde se pode dizer que conforme Naiditch (2010) é uma forma de pesquisa interativa que visa compreender as causas de uma situação e produzir mudanças. O foco está em resolver algum problema encontrado por indivíduos ou por grupos, sejam eles instituições, escolas, ou organizações comunitárias. A pesquisa-ação se desenvolve na medida em que pesquisadores investigam um problema e sugerem possíveis soluções, visando melhorar sua prática profissional, as estratégias por eles utilizadas em sua forma de trabalho e ampliar o

conhecimento acerca de questões que afetam diretamente a produtividade ou a qualidade do trabalho desenvolvido por um grupo ou por uma instituição.

O processo de fundição conforme SIPOC (“Figura 1”), cujas siglas representam *Supplier* (Fornecedor), *Input* (Entradas), *Process* (Processos), *Output* (Saídas), *Customer* (Clientes), é o foco da pesquisa para podermos entender as variações que podem ocorrer de um lote para outro.



Figura 1. Análise SIPOC

Fonte: O autor, 2024.

Essas variações que propiciam falhas podem ser endógenas ou exógenas. Segundo Oliveira (2013), falhas exógenas na fundição de ferro fundido, são condições externas que podem provocar possíveis falhas no ferro fundido como contaminação da liga por impurezas externas, como oxigênio, enxofre ou nitrogênio. Também podem ocorrer problemas no molde como vedação incorreta, entrada inadequada de metal líquido ou fluxo insuficiente, e por fim variações de temperatura como, mudanças bruscas de temperatura durante o resfriamento causando tensões e trincas.

As falhas endógenas se referem a fatores internos que estão relacionados à composição do metal e ao processo de solidificação, influenciando diretamente a integridade da peça fundida, podendo ocorrer problemas como porosidade que é a formação de bolhas internas no metal, decorrente do aprisionamento de gases durante a solidificação, ocorrendo também a distribuição desigual de elementos na microestrutura resultando em variações nas propriedades mecânicas da peça e trincas internas (Oliveira, 2013).

Conforme apresentado por Campbell (2003) as ligas à base de ferro são difíceis pela quantidade de gases que podem reagir com o fundido, isso pode causar porosidade por erosão subsequente na solidificação do metal fundido. É utilizado para a vazamento do metal fundido no molde o Cadinho (é o recipiente onde fica armazenado o metal fundido, sendo manual este processo pode auxiliar no surgimento de falhas, conforme “Figura 2”, como porosidades nas Carcaças Centrais, mais precisamente no lado que é montada a compressora conforme a “Figura 3”, além do cadinho existem

outras possibilidades dentro do processo que podem prejudicar a qualidade da peça conforme fluxograma de processo “Figura 4”.



Figura 2. Metal líquido sendo vazado no molde

Fonte: Moro; Auras, 2007.



Figura 3. Carça Central com porosidade no lado de montagem da Compressora

Fonte: O autor, 2024.

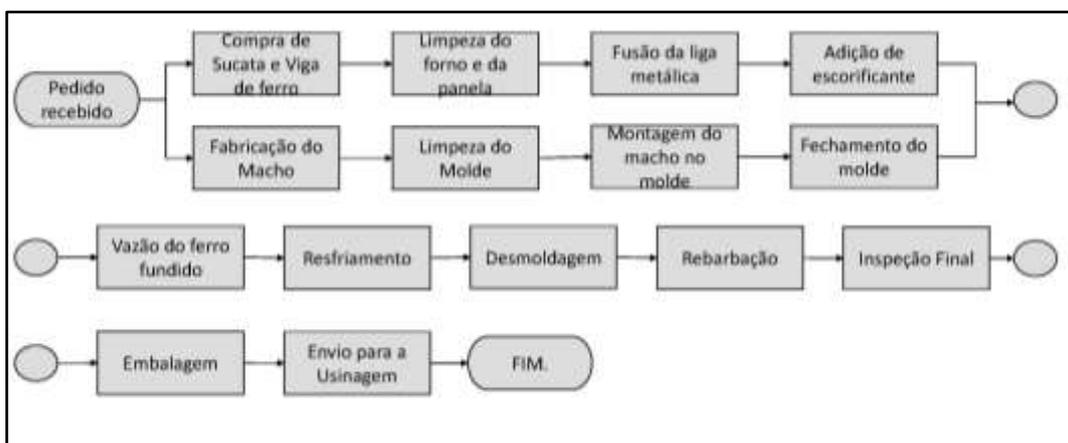


Figura 4. Fluxograma de processo da Fundição B2

Fonte: O autor, 2024.

Com isso, foram estabelecidas etapas a serem seguidas para o desenvolvimento do trabalho e análise das peças para podermos entender a real situação das não conformidades e qual é realmente a causa raiz das falhas para poderem ser tratadas devidamente como devem ser, utilizando o método A3 conforme “Figura 5”.

Data Inicial: _____			
1- Situação Atual: 1.1- Pareto das falhas: 1.2- Foto da falha com maior índice verificada no Pareto: 1.3- Meta: Descrever a meta com base na metodologia "SMART" 1.4- Parâmetro atuais do processo (Dados de máquinas, componentes, tempo, materiais, etc.) relevantes para o estudo:		2- Análise de Causa / Efeito (Ishikawa / 5 Porquês): 2.1- Ishikawa: (desenvolver a ferramenta na aba "2.1- Ishikawa"). 2.2- 5 Porquês: (desenvolver a ferramenta na aba "2.2- 5 Porquês"). 2.3- Elencar as causas classificadas como Causas Reais (Ver causas testadas e validadas no item 2.2- 5 Porquês):	
1.1-Pareto (Atual):	1.2- Foto da Falha:	Causa: _____	
		Causa: _____	
		Causa: _____	
1.3- Meta:		4- Situação Pós Ações: 4.1- Pareto das Falhas (pós ações) 4.1- Pareto (Dados levantados após ações implementadas):	
1.4- Parâmetros atuais do processo:			
3- Plano de Ação: Causa: _____ Ação: _____ Responsável: _____ Prazo: _____		4.2- Análise Crítica: _____ Data da análise: _____ R.: _____	
Causa: _____ Ação: _____ Responsável: _____ Prazo: _____		4.3- Ações foram eficazes? () SIM () Não 4.4- Necessita retroalimentar para nov () SIM () Não	
Causa: _____ Ação: _____ Responsável: _____ Prazo: _____		4.5- Padronização - Definir Ação, Responsável e Prazo para padronização do processo Ação: _____ Responsável: _____ Prazo: _____	
Causa: _____ Ação: _____		Ação: _____ Responsável: _____ Prazo: _____	

Figura 5. Metodologia A3

Fonte: O autor, 2024.

De acordo com Suarez (2019) a metodologia A3 é uma ferramenta utilizada para identificar problemas e propor soluções resumidas em apenas uma das faces de uma folha de papel tamanho A3. Ela combina elementos qualitativos e quantitativos para entender a situação atual, estabelecer metas, desenvolver contramedidas e implementar um plano de ação eficaz. Esta metodologia é derivada do Sistema Toyota de Produção e da metodologia Lean, sendo amplamente utilizada na indústria automotiva.

O primeiro passo do projeto é a seleção amostral de dois lotes de produção onde será usado e avaliado uma população de peças com aproximadamente 120 peças em cada lote “Figura 6”.



Figura 6. Amostragem de Peças fundidas

Fonte: O autor, 2024.

Após coleta dos resultados é criado o gráfico estatístico para representação do estado atual e iniciado a etapa do preenchimento do Ishikawa também conhecido como diagrama de espinha de peixe ou diagrama de causa e efeito, que é uma ferramenta gráfica que representa a relação entre as causas raízes de um problema e seus efeitos. É uma ferramenta simples e eficaz para melhoria de processos e gestão da qualidade conforme “Figura 7”.

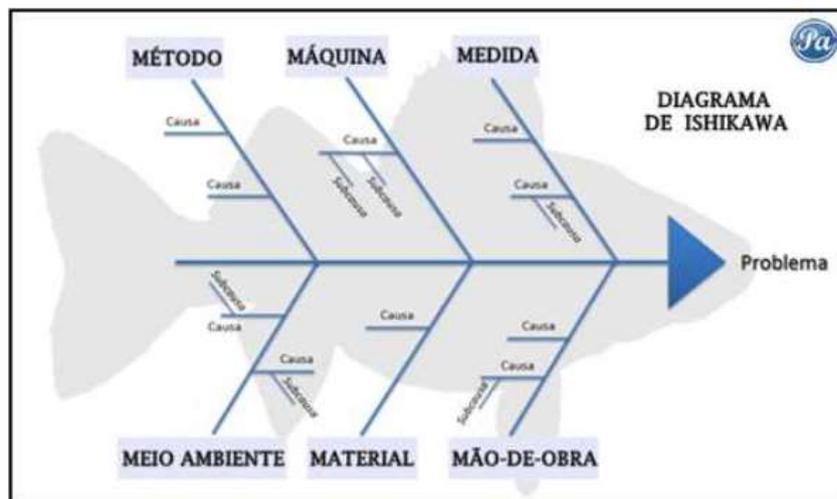


Figura 7. Diagrama de Ishikawa, espinha de peixe ou de causa e efeito

Fonte: Bezerra, 2014.

Já o próximo passo é a priorização das possíveis causas, utilizando a matriz GUT (“Figura 8”) pois é uma ferramenta utilizada para priorizar causas de um problema. Ela considera três características: Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T). A Gravidade refere-se ao impacto que

o problema pode causar se não for resolvido, Urgência indica o quão rapidamente o problema precisa ser resolvido e a Tendência avalia como o problema vai evoluir com o tempo se não for tratado. Cada problema é avaliado segundo esses critérios e recebe uma pontuação que pode variar de 1 a 5. A multiplicação dessas três variáveis irá determinar a prioridade de cada causa, permitindo que as equipes se concentrem nas causas mais críticas.

E assim para realizar os 5 porquês, onde é desdobrado todos os possíveis porquês para chegarmos na verdadeira causa raiz, encontrando a causa raiz é hora da elaboração dos planos de ações, nesta etapa é importante que todos os envolvidos no processo façam parte da escolha das ações a serem utilizadas conforme “Figura 9”.

Matriz GUT - Gravidade x Urgência x Tendência				
Problemas em potencial (O que precisa ser melhorado?)	Gravidade	Urgência	Tendência	Prioridade
Problema 1				
Problema 2				
Problema n				

Figura 8. Matriz GUT

Fonte: Damazio, 1998.

Análise de Causa Raiz								
Ocorrência (Por quê ocorreu o problema?)								
Nº	Problema	1º Por quê	2º Por quê	3º Por quê	4º Por quê	5º Por quê	Teste	É Causa Raiz? (S) (N)
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Figura 9. Ferramenta 5 Porquês

Fonte: Autor, 2024.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foi apresentado os resultados dos campos da metodologia A3 conforme foi estruturado na “Figura 5”.

3.1. Situação atual

Na primeira etapa, foi demonstrado o estado atual da empresa em relação às falhas nas peças investigadas. Sendo assim, foi adicionado um gráfico de barras, conforme “Figura 10”, que contém a quantidade de tipos de falhas por peça. O estado atual do refugo encontrado na usinagem do bruto enviado da B2 está com 50% de defeitos, com uma estatística de a cada 100 peças, 50 tem algum defeito de fundição. Por meio do Gráfico de barras, constatou que o tipo de falha mais frequente foi a “porosidade na face do compressor”, conforme já mostrado na “Figura 3”.

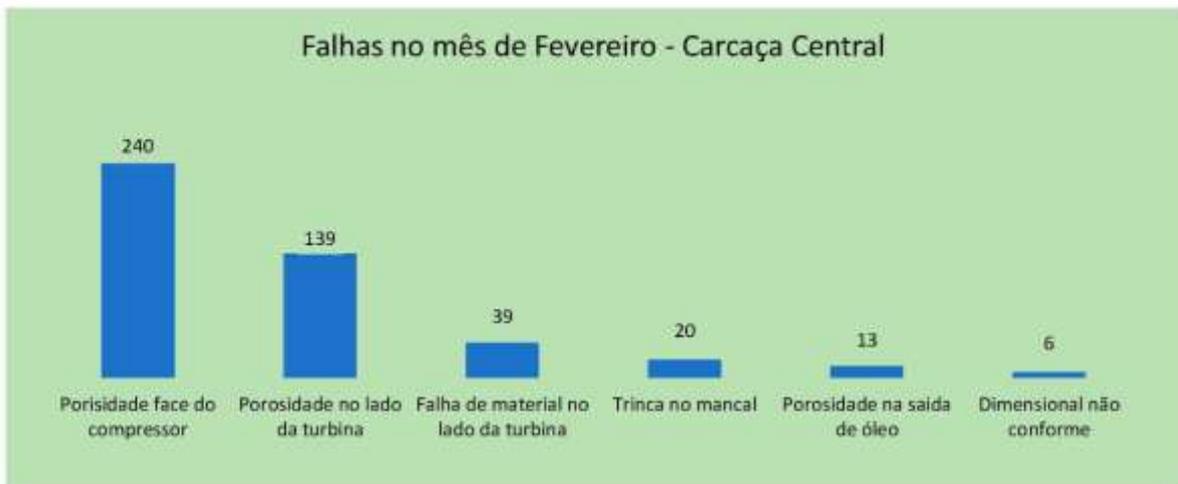


Figura 10. Gráfico de quantidade de falhas no mês de fevereiro

Fonte: Autor, 2024.

3.2. Análise de causa e efeito

Na segunda etapa, foi realizado um *Brainstorming* e preenchido o Diagrama de Ishikawa (“Figura 11”) com as possíveis causas do problema. Após o levantamento das causas, elas foram classificadas com notas de 0 a 3, onde a nota 0 significa que a causa é descartada, a nota 1, é pouco provável ser causa raiz, a nota 2, é provável ser causa raiz e nota 3, é muito provável ser causa raiz.



Figura 11. Diagrama de Ishikawa preenchido

Fonte: Autor, 2024.

As possíveis causas classificadas como 2 e 3 foram direcionadas para os 5 Porquês para ser realizado o desdobramento da causa e chegar em uma possível causa raiz. O resultado da aplicação da ferramenta, chegou nas seguintes causas raízes:

1° Velocidade de resfriamento: não foi realizado estudos sobre fatores que impactam o resfriamento da liga;

2° Não há padronização no método de mistura do ferro fundido: Não há instrução para responsável pela limpeza do equipamento;

3° Secador do ar comprimido não funciona: responsável pela manutenção não solicitou peças para o conserto do secador;

4° Ferramental fornecido pelo cliente está desgastado: gerente da Produção não verificou o formulário Ficha de Controle de Produção FOR-035.

Para cada possível causa, foi realizado o teste para comprovar se realmente é uma causa raiz ou não.

3.3. Plano de ação

Na etapa 3 ocorreu a elaboração do plano de ação (“Quadro 1”), para poder ser realizada a correção nas causas raízes, contendo o nome do responsável e o prazo da realização.

Quadro 1. Plano de Ação

Causa	Ação	Responsável	Prazo
1. Não foi realizado estudos sobre fatores que impactam o resfriamento da liga	1.a Definir quantidade de inoculante a ser utilizado na liga de 1 tonelada de ferro fundido	Joni	25/10/2024
2. Não há instrução para responsável pela limpeza do equipamento	2.a Realizar a manutenção do misturador de areia da Sopradora LB 40. 2.b Adicionar no posto de trabalho a instrução da sopradora LB40 e as verificações de limpeza das pás e porta de liberação de areia.	Marlon / Joni	31/10/2024
3. Responsável pela manutenção não solicitou peças para o conserto do secador	3.a Solicitar as peças para o conserto do secador de ar 3.b Reciclagem de Treinamento com o colaborador da manutenção. 3.c Alterar o procedimento de aquisição sobre a metodologia para solicitação de peça aguardando aprovação.	Joni / Lucas	25/10/2024
4. Gerente da Produção não verificou o formulário Ficha de Controle de Produção FOR-035	4.a Treinamento do Gerente de Produção 4.b Solicitar orçamento e conserto do ferramental.	Joni	25/10/2024

Fonte: Autor, 2024.

3.4. Situação pós ações

Nesta 4ª etapa, após a implementação das ações (“Quadro 2”), também foi realizado o registro das evidências (“Quadro 3”) e observado a eficácia das melhorias no processo que impactaram positivamente na diminuição de peças com porosidades na face da compressora.

Quadro 2. Ações implementadas

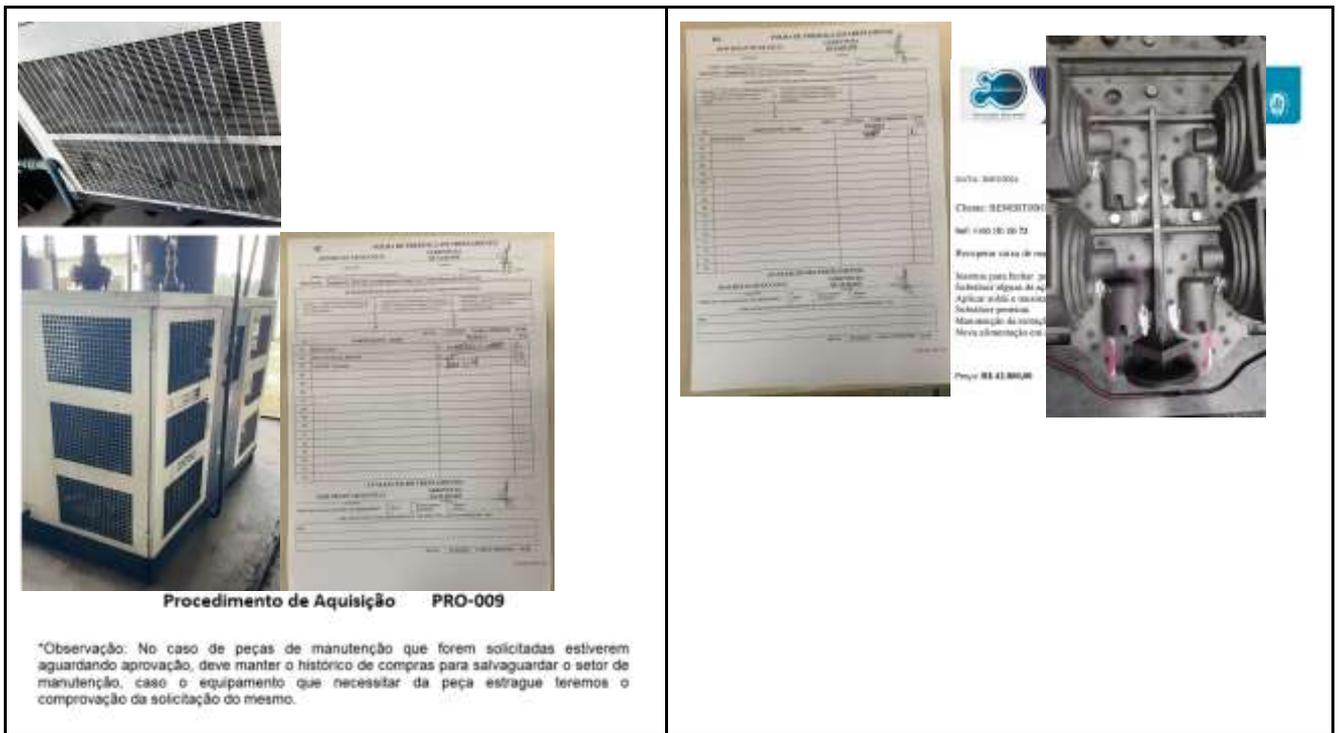
Causa	Ação realizada	Responsável	Data de realização
1. Não foi realizado estudos sobre fatores que impactam o resfriamento da liga	1.a Foi definida a utilização da quantidade de inoculante para 0,25% (0,15 na panela e 0,10 no molde).	Joni	14/10/2024
2. Não há instrução para responsável pela	2.a Realizada a manutenção do misturador de areia da Sopradora	Marlon / Joni	14/10/2024

limpeza do equipamento	LB 40. 2.b Adicionado no posto de trabalho a instrução da sopradora LB40 com a verificação de limpeza das pás e da porta de liberação de areia.		
3. Responsável pela manutenção não solicitou peças para o conserto do secador	3.a Realizado o conserto do secador de ar 3.b Reciclagem de Treinamento realizada. 3.c Alterado o procedimento de aquisição sobre a metodologia para solicitação de peça aguardando aprovação.	Joni / Lucas	25/10/2024
4. Gerente da Produção não verificou o formulário Ficha de Controle de Produção FOR-035	4.a Reciclagem de treinamento para o Gerente de Produção realizada 4.b Solicitado o orçamento e conserto do ferramental.	Joni	25/10/2024

Fonte: Autor, 2024.

Quadro 3. Registro de evidências das ações implementadas

Ação 01			Ação 02												
 IT 15 - PREPARAÇÃO DA LIGA <div style="float: right; font-size: small;"> IT - 15 REV-02 DATA: 10/10/2022 PÁG N. 01 </div> <table border="1" style="width: 100%; font-size: x-small;"> <tr> <td>Elaborado - Função - Data</td> <td>Revisado - Função - Data</td> <td>Aprovado - Função - Data</td> </tr> <tr> <td>Lucas M. Andreatta - Auxiliar Qualidade - 10/10/2022</td> <td>Gabriel Vieira - Téc. Qualidade - 25/10/2024</td> <td>Joni Renan - Gerente de Produção - 10/10/2022</td> </tr> </table>			Elaborado - Função - Data	Revisado - Função - Data	Aprovado - Função - Data	Lucas M. Andreatta - Auxiliar Qualidade - 10/10/2022	Gabriel Vieira - Téc. Qualidade - 25/10/2024	Joni Renan - Gerente de Produção - 10/10/2022	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 50%;">Antes</th> <th style="width: 50%;">Depois</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>			Antes	Depois		
Elaborado - Função - Data	Revisado - Função - Data	Aprovado - Função - Data													
Lucas M. Andreatta - Auxiliar Qualidade - 10/10/2022	Gabriel Vieira - Téc. Qualidade - 25/10/2024	Joni Renan - Gerente de Produção - 10/10/2022													
Antes	Depois														
															
	8	- Aditivos em geral (carburante, silício, manganês, cromo, etc).													
		- utilizar 0,15% de inoculante na mistura de ferro													
	10	- utilizar 0,10% de inoculante no molde durante													
				55	Após o final do turno o misturador foto ao lado deve ser limpo e verificada as pás e a porta de liberação de areia se os mesmos estão devidamente limpos										
Ação 03			Ação 04												



Fonte: Autor, 2024.

Cada uma das ações foram cruciais para o resultado, conseguindo ter uma redução de 50% de peças com defeito para apenas 12,5% (15 peças com defeito) conforme mostra o gráfico da “Figura 12”.

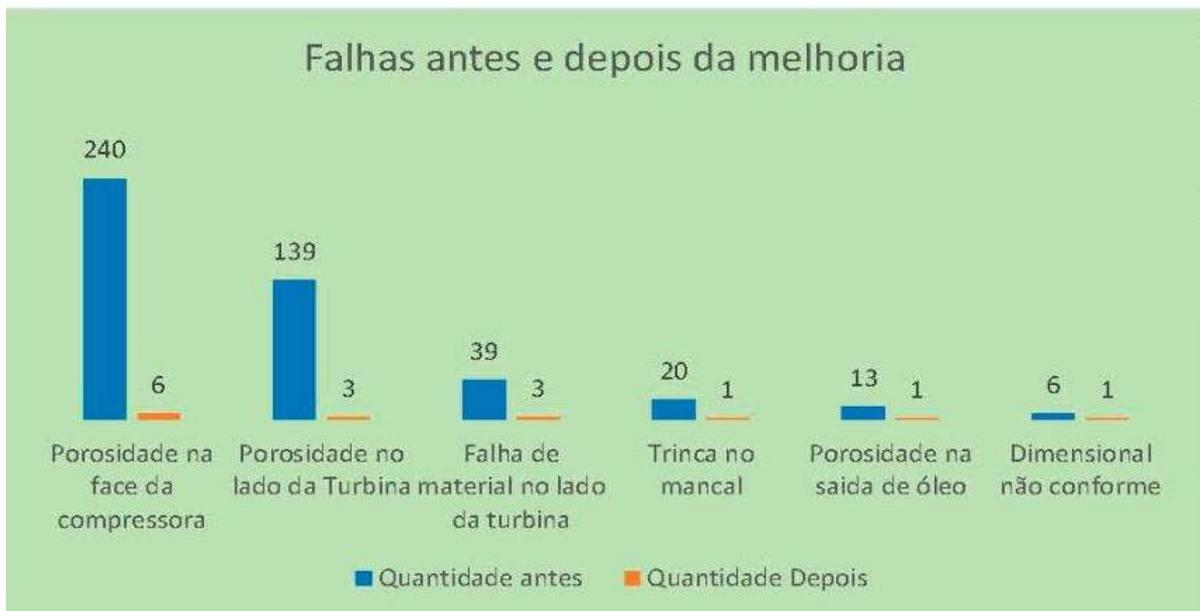


Figura 12. Quantidade de falhas (antes e depois da melhoria)

Fonte: Autor, 2024.

Para realizar o registro de todas as ações implementadas de forma sistêmica, foi realizado a retroalimentação dessas informações no FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* - Análise do Modo e Efeito de Falhas) da peça, além de ser incluído no formulário de lições aprendidas, no qual sempre que ocorre não conformidades ou novos desenvolvimentos, ele é utilizado para registrar as boas práticas dos processos.

Em termos de custos, após a melhoria no processo, foi obtido uma redução de R\$43.021,00 que é equivalente a 75,71% do valor de peças não conformes descartadas, conforme mostra a “Figura 13”.

	Produzidas	Falhas	Valor de peças descartadas
Antes	914	457	R\$ 56.823,38
depois	914	111	R\$ 13.801,74

Figura 13. Tabela de valor das peças não conformes

Fonte: Autor, 2024.

4. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi alcançado tendo uma redução significativa de 50% das peças produzidas estando com defeitos, para apenas 12,5% das peças, gerando um maior valor agregado ao produto.

A redução do número de peças com defeito contribuiu com o meio ambiente, por meio da redução de emissão de CO₂, da utilização de matérias-primas, tais como, ferro, Cromo, Silício, Manganês, Carbono, Cobre, Enxofre e Fósforo, além da redução de consumo de energia elétrica para aquecimento do Forno. Com estas melhorias, a empresa iniciou o processo de certificação do ESG (*Environmental, Social e Governance* - Meio Ambiente, Social e Governança) pelo SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial).

Para alcançar o resultado esperado, foi necessário estudar as possíveis causas que impactam na fundição de ferro fundido e feito a análise dos processos de fundição desde o momento da chegada de matéria-prima até o momento de desmoldagem das peças fundidas.

Mesmo com a redução dos índices de refugo, foi estipulada uma nova meta que é chegar nos 8%, pois são peças de alto valor agregado e para a empresa se manter competitiva no mercado é necessário a redução máxima de desperdícios. Sendo assim, para trabalhos futuros serão realizadas novas análises de material, composição química e movimentações do processo, para redução de peças com defeitos e consecutivamente abranger as ações para outros modelos de peças.

5. REFERÊNCIAS

CAMPBELL, J. **Casting**: the new metallurgy of cast metals. 2 ed. Burlington: Elsevier Science, 2003.

BEZERRA, F. **Diagrama de Ishikawa**: princípio da causa e efeito. Portal Administração, 2014. Disponível em: <https://www.portal-administracao.com/2014/08/diagrama-de-ishikawa-causa-e-efeito.html>. Acesso em: 27 jun. 2024.

SUAREZ, G. **A3**: A solução Toyota para melhoria. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://qualityway.wordpress.com/2023/10/03/a3-a-solucao-toyota-para-melhoria/>. Acesso em: 27 jun. 2024.

DAMAZIO, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos da Administração**. Porto Alegre: Artmed, 2001.

GAIKWAD, R. GAIKWAD, A. **Estudo de fundição e suas soluções**. Indira College of Engineering: Pune, 2016.

MORO, N; AURAS. A. P. **Processo de fabricação Fundição**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.

NAIDITCH, F. Pesquisa-ação. In: OLIVEIRA, D. A.; DUARTE, A. M. C.; VIEIRA, L. M. F. **Dicionário**: trabalho, profissão e condição docente. Belo Horizonte: UFMG/Faculdade de Educação, 2010.

MARQUES, S. M.; MENDONÇA, M. F.; INFANTE, C. D. C. **IGDCREADS**: O Impacto do gerenciamento de desperdícios nos custos e no resultado das empresas: aplicação de uma dinâmica de simulação. In: XIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2016, Resende. Anais..., Resende, 2016. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos16/14824133.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.

OLIVEIRA, F. B. **Fundição**. Belém - PA: Instituto federal de educação, ciência e tecnologia, 2013.