

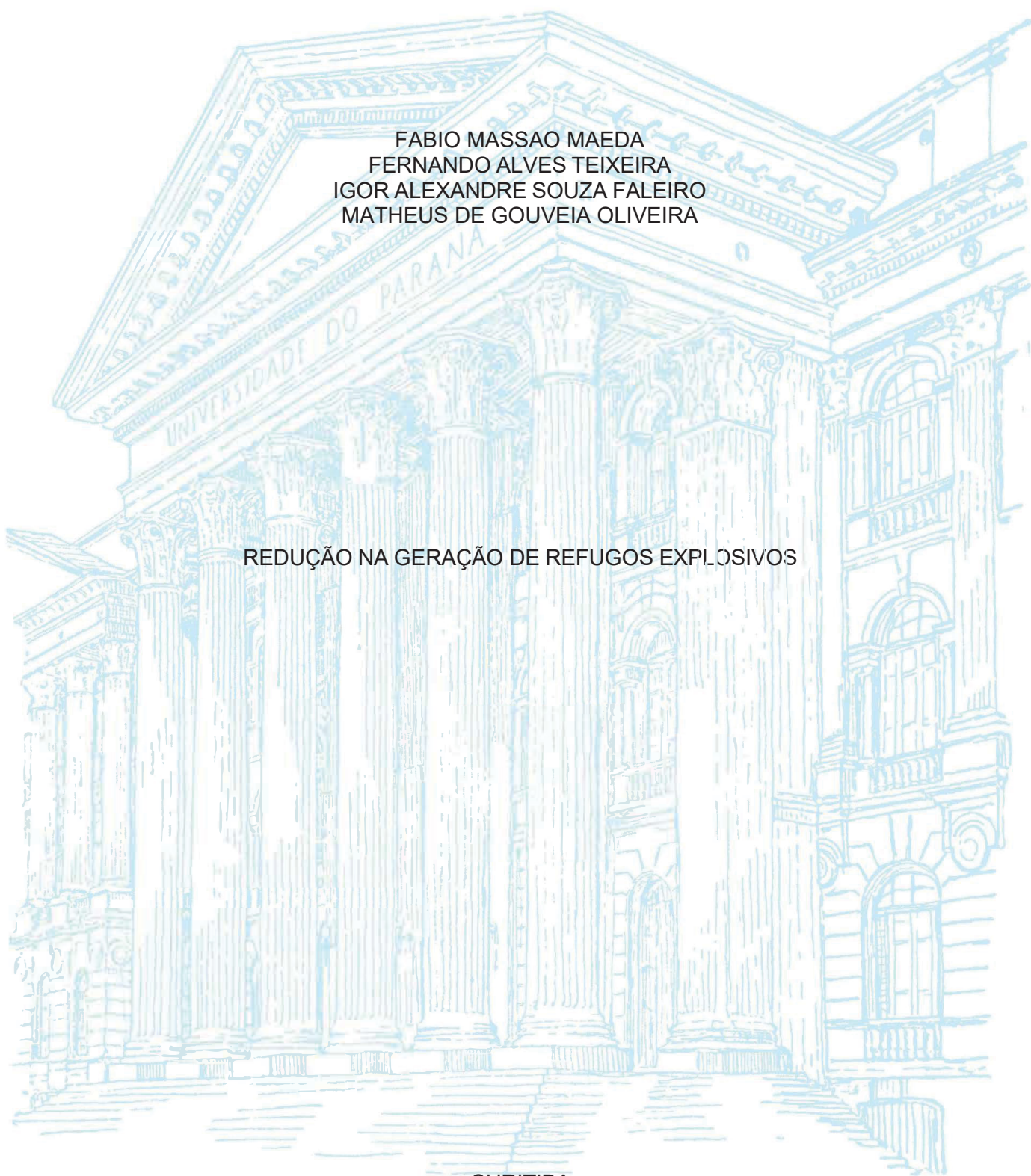
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIO MASSAO MAEDA  
FERNANDO ALVES TEIXEIRA  
IGOR ALEXANDRE SOUZA FALEIRO  
MATHEUS DE GOUVEIA OLIVEIRA

REDUÇÃO NA GERAÇÃO DE REFUGOS EXPLOSIVOS

CURITIBA

2025



FABIO MASSAO MAEDA  
FERNANDO ALVES TEIXEIRA  
IGOR ALEXANDRE SOUZA FALEIRO  
MATHEUS DE GOUVEIA OLIVEIRA

## **REDUÇÃO NA GERAÇÃO DE REFUGOS EXPLOSIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em ENGENHARIA DA QUALIDADE 4.0 - CERTIFICAÇÃO BLACK BELT, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Qualidade 4.0.

Orientador: Pablo Deivid Valle  
Coorientador: Anderson Donato da Silva

CURITIBA  
2025

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa, Júlia Teixeira, minha eterna motivação: sem seu apoio, amor e paciência, eu não teria encontrado forças para me tornar um homem melhor — muito menos um profissional dedicado. Este trabalho é também seu.

Ao meu gestor e coautor, Fábio Massao Maeda, pela sabedoria em ensinar-me que relações humanas são a base de qualquer projeto bem-sucedido. Suas lições foram essenciais para o andamento destas melhorias e resultados obtidos.

Aos orientadores Pablo Deivid Valle e Anderson Donato da Silva, meu profundo reconhecimento pela orientação incansável e pelas oportunidades que enriqueceram esta pesquisa. Professor Anderson Donato, sua capacidade de transformar desafios em crescimento foi essencial para a construção deste trabalho.

Por fim, àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada: muito obrigado. Cada conversa, crítica e incentivo fez diferença.

O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

## RESUMO

**Contexto:** A indústria de explosivos enfrenta desafios significativos com perdas por refugo, que impactam custos e eficiência. Neste estudo, analisou-se um setor com taxa média histórica de 0,46% de refugo (equivalente a  $\approx 10.824$  unidades/mês), baseada na produção média de 1.551.468 unidades/mês entre janeiro e julho de 2024.

**Objetivo:** Reduzir o refugo por meio da aplicação sistemática de metodologias de melhoria contínua, alinhadas aos princípios da Qualidade 4.0.

### Método:

- Implementação de um sistema estruturado de coleta de dados;
- Análise de Pareto para identificação de causas prioritárias;
- Formação de um grupo multidisciplinar (Segurança, Qualidade, Manutenção, Produção);
- Aplicação de ferramentas lean e monitoramento em tempo real.

### Resultados:

- Redução de 54,3% na taxa de refugo (para 0,21% –  $\approx 3.258$  unidades/mês);
- Economia mensal de  $\approx 3.879$  unidades;
- Modelo replicável para outros setores.

**Conclusão:** A integração de análises data-driven com colaboração cross-functional mostrou-se decisiva para otimizar processos industriais complexos, validando práticas da Indústria 4.0 em ambientes de alta criticidade.

**Palavras-chave:** Redução de refugo; Melhoria contínua; Qualidade 4.0; Análise de Pareto; Gestão multidisciplinar.

## ABSTRACT

**Context:** The explosives industry faces significant challenges with waste losses, impacting costs and efficiency. This study analyzed a sector with a historical scrap rate of 0.46% ( $\approx 10,824$  units/month), based on average monthly production of 1,551,468 units (January-July 2024).

**Objective:** To reduce waste through systematic continuous improvement methodologies aligned with Quality 4.0 principles.

**Method:**

Implementation of a structured data collection system;  
Pareto analysis to identify root causes;  
Formation of a multidisciplinary team (Safety, Quality, Maintenance, Production);  
Application of lean tools and real-time monitoring.

**Results:**

54.3% reduction in scrap rate (to 0.21% –  $\approx 3,258$  units/month);  
Monthly savings of  $\approx 3,879$  units;  
Replicable model for other industrial sectors.

**Conclusion:** Data-driven analysis combined with cross-functional collaboration proved critical for optimizing complex industrial processes, validating Industry 4.0 practices in high-risk environments.

**Keywords:** Waste reduction; Continuous improvement; Quality 4.0; Pareto analysis; Multidisciplinary management.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Detecção de Refugos .....	9
Tabela 2: Cenário Atual .....	13
Tabela 3 - Idéias de "Quais fatores impactam para ocasionar os danos no cartucho?" .....	18
Tabela 4 - <i>Matriz GUT com pontuação das causas</i> .....	19
Tabela 5 – Tabela de Resultados Obtido .....	21
Tabela 6 - Base para T-Student.....	21

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico de Evolução da Taxa de Refugos Mensais .....	10
Figura 2 Curva A do Pareto das Causas de Refugo .....	16
Figura 3 – Taxa de Refugo por Linha de Produção.....	16
Figura 4 – Taxa de Refugo por Turno de Trabalho .....	17
Figura 5 – Taxa de refugo por Produto/Bitola.....	17
Figura 6 - Ishikawa .....	18
Figura 7 - Evolução daTaxa de Refugo Total no Ano .....	20
Figura 8 - Fórmula de T de Student .....	21

# Sumário

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO .....	5
ABSTRACT .....	6
LISTA DE TABELAS.....	7
LISTA DE FIGURAS .....	7
1 INTRODUÇÃO .....	9
<b>1.1 Contexto:</b> .....	9
<b>1.2 Qualidade 4.0 como Solução:</b> .....	9
<b>1.3 Problema Específico</b> .....	9
<b>1.4 Estrutura</b> .....	11
1.5 Fluxo.....	12
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	14
<b>2.1 Qualidade 4.0: conceitos e aplicações</b> .....	14
<b>2.2 MASP: Método de Análise e Solução de Problemas</b> .....	14
<b>2.3 Gestão de refugo e perdas na indústria</b> .....	14
<b>2.4 Benchmarking setorial e normas aplicáveis</b> .....	14
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 Objeto de estudo.....	15
3.2 Ambiente e condições do estudo.....	15
3.3 Coleta de dados .....	15
3.4 Análise dos dados.....	15
3.5 Análise de Causa-Raiz.....	17
3.6 Priorização por GUT .....	19
3.7 Ações Implementadas.....	19
3.8 Critérios de Avaliação .....	20
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
5 REFERÊNCIAS.....	24

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contexto:

Indústrias de processos contínuos, especialmente aquelas com operações de alta criticidade, enfrentam desafios significativos na gestão de perdas por refugo. Segundo a ISO 22400 (2021), a eficiência produtiva nesses setores é frequentemente comprometida por falhas em monitoramento e controle em tempo real.

Essa lacuna gera não apenas impactos financeiros — estimados em até 15% da receita anual em alguns casos (McKinsey, 2022) —, mas também riscos operacionais e ambientais.

### 1.2 Qualidade 4.0 como Solução:

Nesse cenário, a Qualidade 4.0 emerge como um paradigma transformador, integrando tecnologias como IoT e análise preditiva à gestão tradicional (Santos & Ribeiro, 2022). Estudos como o de Oliveira et al. (2020) demonstram que a adoção de métodos data-driven pode reduzir perdas em processos industriais complexos, porém, há escassez de pesquisas aplicadas especificamente à manufatura de explosivos.

### 1.3 Problema Específico

Em uma fábrica de explosivos, a partir de janeiro/24, foi observado uma elevação na taxa de refugo do produto Moxigel.

Na planta analisada, o monitoramento de janeiro a julho de 2024 revelou:

Mês	Volume	Refugo Total	% Refugo
jan/24	1.297.771	7200	0,55%
fev/24	1.296.210	7667	0,59%
mar/24	1.629.458	11766	0,72%
abr/24	1.319.444	11280	0,85%
mai/24	1.757.816	11295	0,64%
jun/24	1.656.000	11551	0,70%
jul/24	1.903.580	15006	0,79%

*Tabela 1: Detecção de Refugos*

A tabela abaixo indica a evolução da Taxa de Refugos Gerados no período de jan/24 a jul/24.

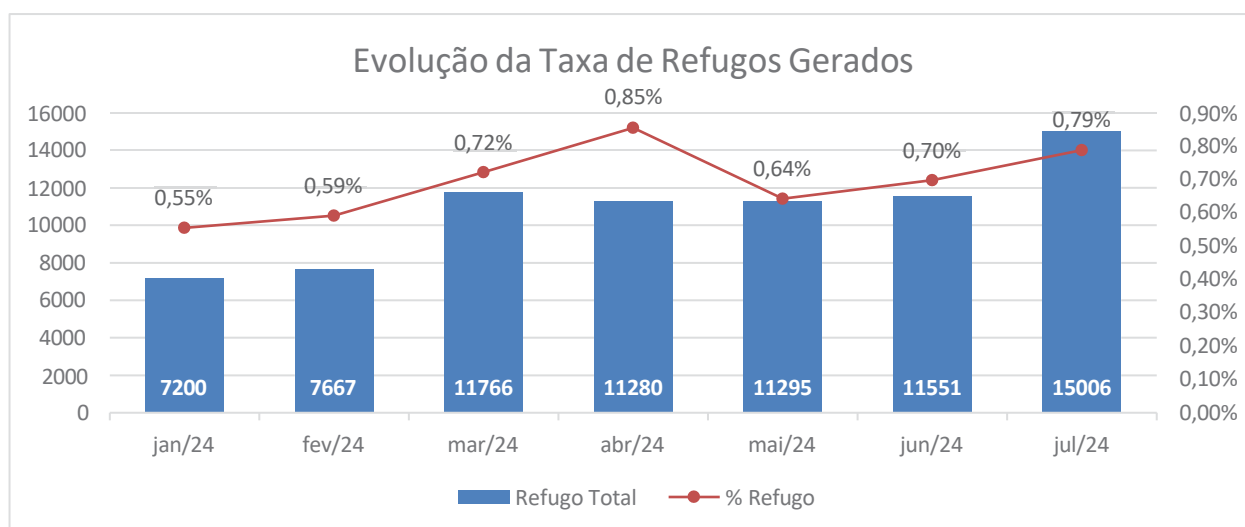


Figura 1: Gráfico de Evolução da Taxa de Refugos Mensais

A média de produção no período é de 1.551.468 unidades por mês

A média de refugo gerado é de 10.824 unidades por mês. A taxa média de Refugo do período é de 0,69%.

## 1.4 Estrutura

Este trabalho está organizado conforme a sequência lógica de um projeto de Engenharia da Qualidade 4.0:

### **Seção 2 – Fundamentação Técnica:**

- Aborda os princípios do MASP e normas aplicáveis (ex.: NBR 13465 para manuseio de explosivos);
- Apresenta benchmarks setoriais para reduzir as taxas de refugo.

### **Seção 3 – Metodologia:**

- Detalha as etapas executadas:
- Coleta de dados históricos (jan-jul/2024);
- Metodologia MASP para indicação de causas-raízes.
- Matriz de criticidade (GUT) para priorizar as iniciativas;
- Ações corretivas implementadas.

### **Seção 4 – Análise de Resultados:**

- Comparação antes/depois com métricas quantitativas:
- Redução de 0,69% para 0,48% no refugo;

### **Seção 5 – Conclusões e Recomendações:**

- Síntese dos ganhos operacionais;
- Protocolo sugerido para inspeções preventivas.

## **1.5 Fluxo**

### **Abertura**

A redução de refugo na fabricação de explosivos demanda métodos estruturados de análise causal, onde ferramentas clássicas da engenharia da qualidade — como o MASP — mostram eficácia superior a soluções genéricas em ambientes de alta criticidade.

## Contexto Geral

Na indústria de explosivos, taxas de refugo acima de 0,2% comprometem a viabilidade econômica, especialmente em linhas com produção mensal superior a 1,5 milhão de unidades (ABQ, 2023). Estudos como o de Pereira et al. (2021) comprovam que 35% dessas perdas têm origem em falhas mecânicas não detectadas por inspeções convencionais.

## Problema Específico

Na unidade estudada, a taxa média de 0,69% de refugo (Tabela 1) entre janeiro e julho de 2024 representava 10.824 unidades perdidas/mês (base: produção média de 1.551.468 unidades/mês).

	Média de Produção Total	Média de refugo total	% Refugo
Situação Atual	1.551.468	10.824	0,69%

*Tabela 2: Cenário Atual*

## Objetivos

Este trabalho visa:

- Reduzir a taxa de refugo em 10% (sendo de 0,69% para 0,62%) mediante correções técnicas baseadas em MASP;
- Documentar o custo-benefício das intervenções;
- Propor um protocolo padronizado de inspeção para equipamentos críticos.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Qualidade 4.0: conceitos e aplicações**

A Qualidade 4.0 representa a integração de tecnologias digitais — como internet das coisas (IoT), análise de dados e automação — aos princípios tradicionais de gestão da qualidade. De acordo com Santos & Ribeiro (2022), o conceito busca aliar o pensamento sistêmico à conectividade em tempo real, promovendo decisões baseadas em dados e maior previsibilidade de falhas em processos industriais. A adoção da Qualidade 4.0 é particularmente relevante em ambientes de alta criticidade, como a indústria de explosivos, onde o controle rigoroso de variáveis e a rastreabilidade são essenciais.

### **2.2 MASP: Método de Análise e Solução de Problemas**

O MASP (Método de Análise e Solução de Problemas) é uma abordagem estruturada amplamente utilizada em projetos de melhoria contínua. Baseia-se em um ciclo lógico de etapas, geralmente alinhado ao PDCA (Plan-Do-Check-Act), para identificação de causas, análise de dados, implementação de soluções e verificação de resultados (Paladini, 2011). Sua aplicação prática em ambientes industriais contribui para a padronização da resolução de problemas e para o engajamento de equipes multidisciplinares, como foi adotado neste estudo.

### **2.3 Gestão de refugo e perdas na indústria**

As perdas por refugo são reconhecidas como um dos principais indicadores de desperdício em sistemas de produção (Ohno, 1997). Na indústria de produtos explosivos, a minimização de refugos não está apenas associada a ganhos econômicos, mas também à segurança e ao cumprimento de normas regulatórias. Segundo a Associação Brasileira da Qualidade (ABQ, 2023), uma taxa de refugo acima de 0,2% em setores críticos pode comprometer significativamente a viabilidade produtiva e a confiabilidade do processo.

### **2.4 Benchmarking setorial e normas aplicáveis**

Estudos de benchmarking em indústrias de alta complexidade sugerem que a adoção de monitoramento em tempo real, combinado com metodologias de análise de causa, pode reduzir perdas em até 50% (McKinsey, 2022). Na fabricação de explosivos, a norma NBR 13465 estabelece diretrizes para o armazenamento, transporte e manuseio seguro de materiais perigosos, exigindo controle rigoroso das condições operacionais. A conformidade com tais normas é fator crítico para a redução de refugo e prevenção de acidentes.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Objeto de estudo

O presente estudo foi conduzido em uma planta industrial localizada no estado do Paraná, dedicada à fabricação de produtos explosivos. O foco da análise recaiu sobre uma linha de produção automatizada, com capacidade média de produção de aproximadamente 1,5 milhão de unidades por mês. Esta linha é composta por equipamentos de envase, selagem e inspeção automatizada, operando de forma contínua (24 horas). Dado o alto grau de criticidade do processo, a operação está sujeita a rígidos requisitos de segurança e conformidade com normas técnicas específicas, em especial a NBR 13465:2011.

### 3.2 Ambiente e condições do estudo

O estudo foi realizado in loco, entre janeiro e julho de 2024, em um ambiente com estabilidade operacional e mínima variação sazonal. A planta contava com infraestrutura adequada para a coleta de dados, incluindo sistemas supervisórios (SCADA) e registros manuais complementares, permitindo o monitoramento eficiente e em tempo real dos principais indicadores de desempenho.

### 3.3 Coleta de dados

A coleta de dados seguiu um protocolo padronizado e compreendeu quatro etapas principais:

**Separação física** dos refugos: armazenamento em caixas identificadas por máquina, turno e lote de produção;

**Registro manual** diário dos dados por supervisores, utilizando a planilha de controle FQ-012, contendo categorias de defeitos e respectivas causas;

**Integração digital:** os dados coletados foram lançados no painel de controle do Power BI corporativo, com validação pela área da Qualidade;

**Amostragem total:** foram analisadas 100% das unidades refugadas (n=75.768) durante o período em estudo.

### 3.4 Análise dos dados

A análise dos dados foi conduzida com base na metodologia MASP, iniciando-se pela construção de um Gráfico de Pareto.

A **Figura 2** apresenta a distribuição das principais causas de refugo, com destaque para três categorias responsáveis por 77% das ocorrências: **cartucho murcho, cartucho danificado e falhas de solda.**

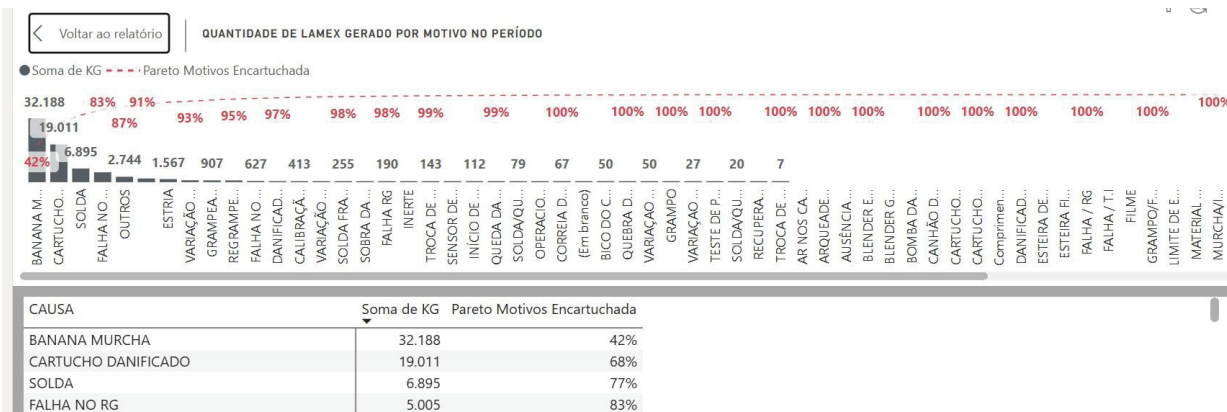


Figura 2 Curva A do Pareto das Causas de Refugo

Nosso controle de monitoramento revela que a curva A, estipulada em 80%, da análise de Pareto revela que 77% das causas que foram detectadas apontam nos motivos de:

- Banana (Cartucho) Murcho: decorrente de dano físico no interior do produto.
- Cartucho Danificado: Decorrente de dano na embalagem.
- Solda: Solda fraca nas pontas.

Na sequência, foram analisados os dados por linha de produção, conforme ilustrado na **Figura 3**. Observa-se que a **linha 1 apresenta a maior taxa de refugo**, sugerindo problemas mecânicos ou operacionais específicos neste equipamento.

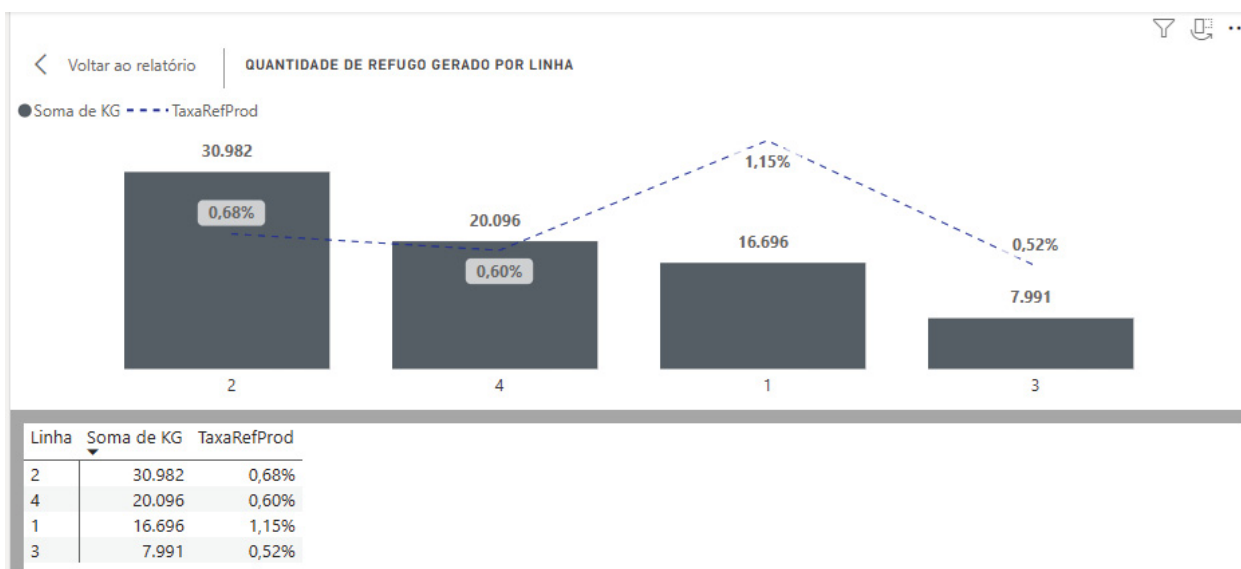
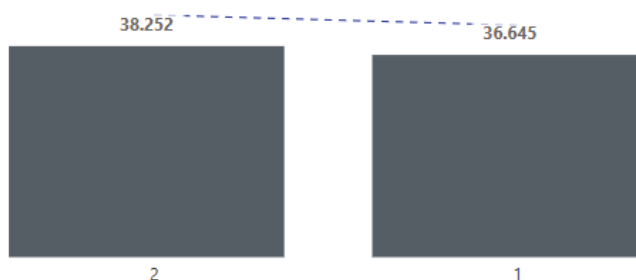


Figura 3 – Taxa de Refugo por Linha de Produção

Já a análise por turno (**Figura 4**) revelou uma distribuição relativamente homogênea entre os dois turnos, não havendo indícios de impacto significativo da variável “turno” sobre o índice de refugo.

● Soma de KG - - - TaxaRefProd



TURNO	Soma de KG	TaxaRefProd
2	38.252	0,35%
1	36.645	0,34%

Figura 4 – Taxa de Refugo por Turno de Trabalho

Por fim, a análise por produto/bitola demonstrada na **Figura 5** evidenciou **pequena amplitude de variação (0,11%)** entre as diferentes bitolas, o que indica que o tipo de produto não é um fator determinante para as perdas.

● Soma de KG - - - TaxaRefProd



BITOLA	Soma de KG	TaxaRefProd
2.1/4" X 24"Normal	13.823	0,13%
2" X 24"Normal	10.885	0,10%
1.1/2" X 24"Normal	8.406	0,08%
2.1/2" X 24"Normal	6.729	0,06%
SSC 2" X 24"	4.679	0,04%
3" X 24"Normal	4.482	0,04%
1" X 24"Normal	3.928	0,04%
SSP 1.1/4" X 16"	3.487	0,03%
1.1/2" X 16"Normal	2.441	0,02%

Figura 5 – Taxa de refugo por Produto/Bitola

Diante dessas análises, conclui-se que as ações de melhoria devem concentrar-se na **linha de produção 1**, especialmente nas **causas relacionadas a danos físicos ao cartucho**, conforme revelado pela Curva A do Pareto.

### 3.5 Análise de Causa-Raiz

A análise de causa-raiz foi conduzida com base na metodologia MASP, utilizando o Diagrama de Ishikawa como ferramenta central. Foram realizadas sessões de brainstorming com uma equipe multidisciplinar (Produção, Qualidade, Manutenção e Segurança), nas quais foram mapeadas 30 hipóteses causais relacionadas ao aumento no índice de refugos — com ênfase especial nos efeitos **"cartucho murcho"** e **"material danificado"**, ambos identificados como

críticos na etapa anterior.

Idéia	
1- GASEIFICAÇÃO SOBRECARRREGAR O VOLUME NO FILME OU SER INSUFICIENTE ***	16- TEMPO DE RESIDÊNCIA NO MIXER CAUSAR GASEIFICAÇÃO DEMASIADA
2- ALTO DE TEMPO DE EXPOSIÇÃO EM TEMPERATURA DA EMULSÃO ALTA ***	17- DENSIDADE INCORRETA
3- COMPRIMENTO MENOR CAUSAR A GASEIFICAÇÃO INCORRETA***	18- PH SO OCASIONANDO BOLHAS *
4 -DIÂMETRO DESCENTRALIZAR O PESO DA MASSA **	19- PADRÃO DAS CLASSIFICAÇÕES NA PLANILHA (MEDIÇÃO PADRÃO) ***
5- ESPESSURA DO FILME NÃO SUPORTAR A PRESSÃO DO MATERIAL ***	20- DESGASTE DE CORREIA FALHAR NO EMBALAMENTO
6- GRAMPEAMENTO INCORRETO CAUSAR O VAZAMENTO DO MASSA ***	21- FALTA DE MEDIDOR DE VAZÃO DO REPROCESSO DA LINHA 2/3**
7- ROTAÇÃO (MIXER) INFLUENCIAR NA DENSIDADE ***	22- Sistema de automação não está setado conforme o instrumento de medição está mostrando***
8- VAZÃO DO NITRITO GERAR POUCA GASEIFICAÇÃO **	23- CURVA DE APRENDIZAGEM DO OPERADOR NOVO***
9- VAZÃO EMULSÃO INFLUENCIAR NO VOLUME DO CARTUCHO	24 - DANOS PELA ESTEIRA***
10- TEMPERATURA DE S.O. SER INCORRETA PARA NÃO OXIDAR O PRODUTO CONFORME O NECESSÁRIO	25 - ALINHAMENTO INCORRETO NA ESTEIRA ***
11- PESO DO CARTUCHO SOBRECARRREGAR NAS PONTAS CENTRALIZANDO O PESO NO MEIO ***	26 - VELOCIDADE EXCESSIVA DA ESTEIRA ***
12- VISCOSIDADE EMULSÃO**	27 - CANTOS VIVOS DANIFICANDO O PRODUTO ***
13- FALTA DE PARÂMETRO DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO***	28 - ATRITO DO MATERIAL COM COMPONENTES DA ESTEIRA ***
14- TAXA MAIOR QUE A ESPECIFICAÇÃO EM REPROCESSO CAUSAR GASEIFICAÇÃO INADEQUADA	29 - FALTA DE PROTEÇÃO NAS BORDAS DA ESTEIRA ***
15- EQUIPAMENTO DESCALIBRADO***	30 - VIBRAÇÃO DA ESTEIRA CAUSANDO DESLOCAMENTO DO CARTUCHO ***

Tabela 3 - Idéias de "Quais fatores impactam para ocasionar os danos no cartucho?"

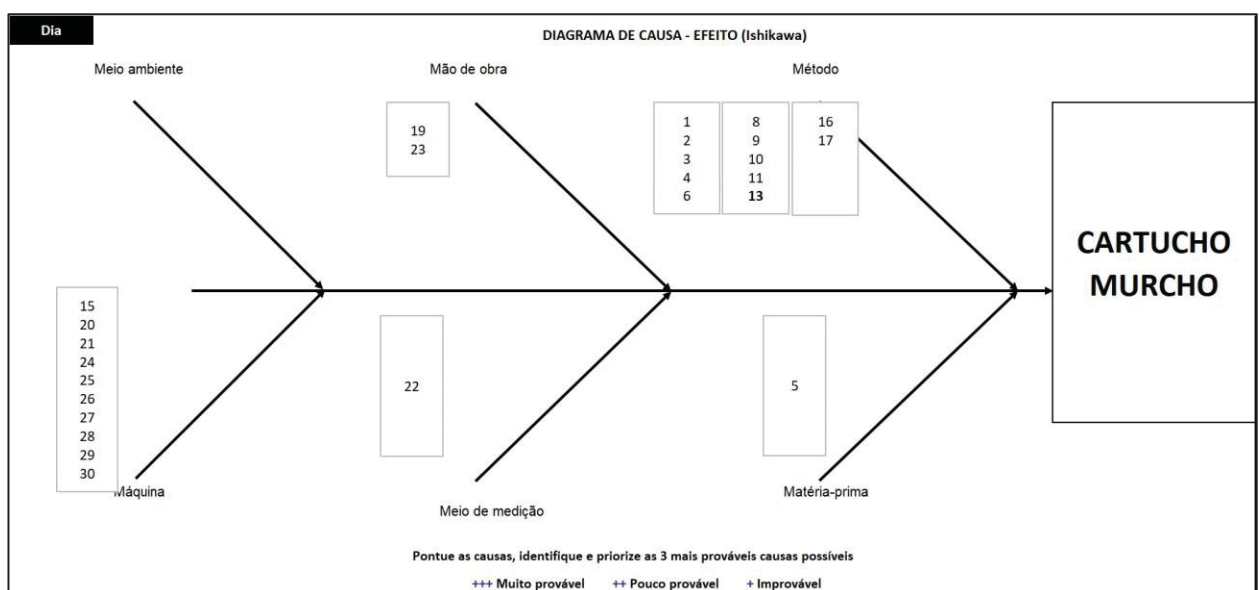


Figura 6 - Ishikawa

A partir do Diagrama de Ishikawa, foram identificadas causas relacionadas principalmente a **fatores mecânicos (esteira, atrito, cantos vivos, alinhamento) e de processo (densidade da emulsão, tempo de residência no mixer, viscosidade, vazão de insumos).**

### 3.6 Priorização por GUT

Para priorização das ações, foi aplicada a **matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência)**, conforme ilustrado na Tabela 4. As causas com maior pontuação foram:

- **Cantos vivos na esteira (100 pontos)** – causavam danos recorrentes;
- **Atrito com componentes da esteira (100 pontos)** – contribuía para paradas e falhas;
- **Falta de proteção nas bordas (80 pontos)** – fator agravante dos danos;
- **Alinhamento incorreto (48 pontos)** – favorecia desgaste prematuro.

Causa Raiz	Gravidade (Impacto)	Urgência (Tempo)	Tendência (Piora)	Total (GxUxT)	Prioridade
<b>Danos pela esteira (cantos vivos)</b>	5 (Danos recorrentes)	4 (Exige ação rápida)	5 (Piora sem intervenção)	<b>100</b>	<b>1ª</b>
<b>Alinhamento incorreto da esteira</b>	4 (Causa desgaste)	3 (Pode agravar)	4 (Aumenta atrito)	<b>48</b>	<b>3ª</b>
<b>Atrito com componentes da esteira</b>	5 (Danifica produto)	5 (Paradas na linha)	4 (Contínuo)	<b>100</b>	<b>1ª</b>
<b>Velocidade excessiva da esteira</b>	3 (Risco moderado)	3 (Ajuste necessário)	3 (Estável)	<b>27</b>	<b>4ª</b>
<b>Falta de proteção nas bordas</b>	4 (Danos visíveis)	4 (Prevenção imediata)	5 (Piora com uso)	<b>80</b>	<b>2ª</b>

Tabela 4 - Matriz GUT com pontuação das causas

Com base nesses resultados, foram definidas as seguintes ações prioritárias:

1. Instalação de proteções contra cantos vivos (ex: revestimentos em borracha);
2. Redesenho de componentes da esteira para reduzir o atrito;
3. Inspeções preventivas diárias nas bordas da esteira;
4. Realinhamento técnico da esteira.

Essas ações foram tratadas como **corretivas imediatas**, visando a mitigação dos principais fatores mecânicos responsáveis pelos danos físicos aos cartuchos.

### 3.7 Ações Implementadas

Foram adotadas intervenções técnicas e operacionais, divididas em:

#### Correções Mecânicas:

- Instalação de revestimentos de Borrachas em Pontos de Impacto no início e no final das esteiras;
- Realinhamento da esteira;
- Instalação do componente “convite” que direciona o material sem sofrer impacto na lateral das esteiras;
- Correção na solda da Encartuchadeira da Linha 1;

- Redução da velocidade para 2,5 m/s para bitolas mais leves (conforme especificações do fabricante).

### Melhorias Operacionais:

- Treinamento da equipe em inspeções preventivas.

### 3.8 Critérios de Avaliação

A avaliação dos resultados considerou:

- **Variável dependente:** taxa total de refugo e taxa da Curva A;

Abaixo o gráfico de colunas indicando a evolução da Taxa de Refugo Total, ou seja, considerando todo refugo detectado.

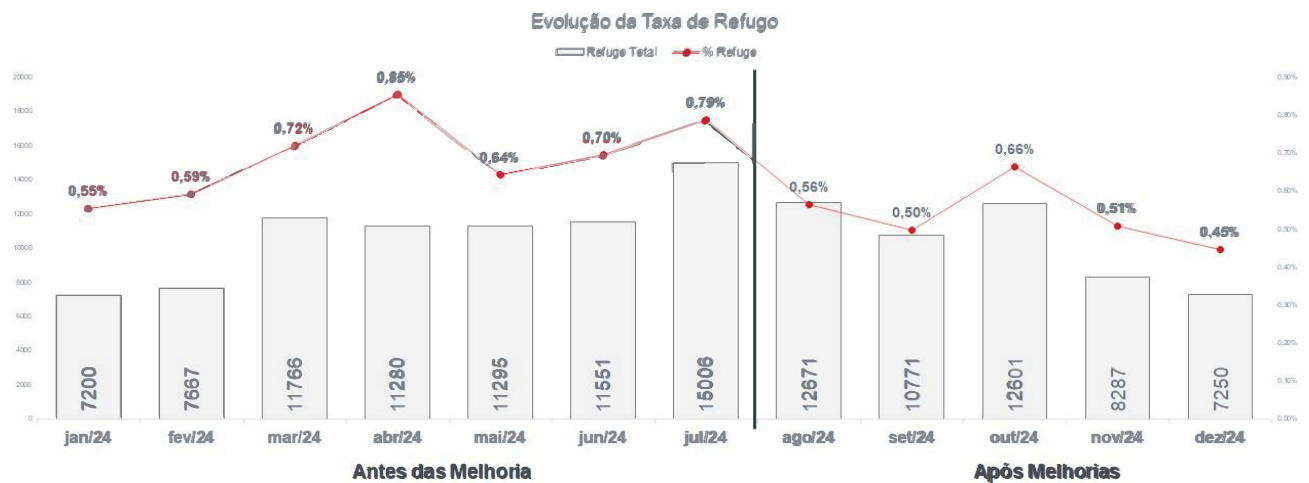
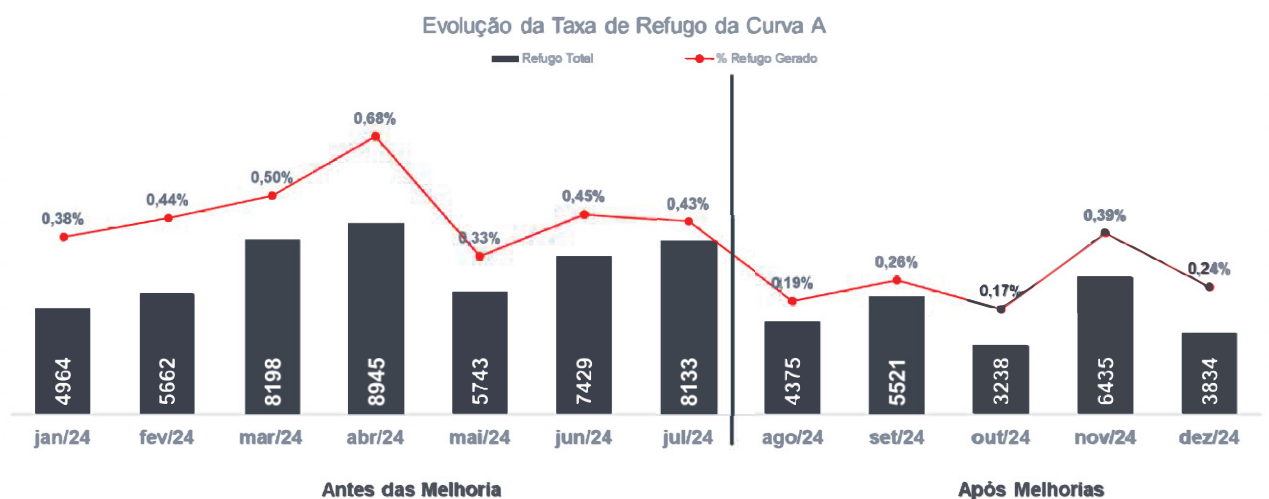


Figura 7 - Evolução da Taxa de Refugo Total no Ano

Abaixo a evolução da Taxa de Refugo da Curva A, que considera apenas as detecções por motivos de Banana Murcha, Cartucho Danificado e Solda.



- **Meta de sucesso:** redução mínima de 10% no refugo total;
- **Resultados alcançados:** redução de 49,9% na taxa total (0,69% para 0,44%) e de 54,3% na Curva A (0,46% para 0,21%).

	Antes das Melhorias	Meta Estimada	Após as Melhorias
% Refugo Total	0,693%	0,620%	0,536%
% Refugo Curva A	0,458%	0,409%	0,213%

Tabela 5 – Tabela de Resultados Obtido

- **Validação estatística:** comparação de médias mensais antes e depois das intervenções, com uso do **teste t de Student** (nível de significância  $p < 0,05$ ).

Período	Média de Refugo Total (%)	Desvio Padrão (%)	Número de Meses
Antes das melhorias	0,693	0,107	7
Depois das melhorias	0,536	0,083	5

Tabela 6 - Base para T-Student

Foi realizado o teste t de Student para amostras independentes, com o objetivo de verificar se a redução da taxa de refugo após as ações de melhoria foi estatisticamente significativa.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Figura 8 - Fórmula de T de Student

Onde:

- $\bar{X}_1$  = média antes = 0,693%
- $\bar{X}_2$  = média depois = 0,536%
- $n_1 = 7, n_2 = 5$
- $s_p$  = desvio padrão combinado:

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} = \sqrt{\frac{(6)(0,107^2) + (4)(0,083^2)}{10}} \approx 0,098$$

Substituindo na fórmula temos:

$$t = \frac{0,693 - 0,536}{0,098 \cdot \sqrt{\frac{1}{7} + \frac{1}{5}}} \approx \frac{0,157}{0,0571} \approx 2,75$$

Esse valor foi comparado com a tabela t para 10 graus de liberdade ( $n_1 + n_2 - 2 = 10$ ), e o valor crítico é aproximadamente 2,23 para 95% de confiança.

Como  $2,75 > 2,23$ , **a diferença é estatisticamente significativa.**

### **Resumo do valor encontrado**

A média da taxa de refugo antes das melhorias foi de 0,693% ( $\pm 0,107\%$ ), enquanto após as melhorias foi de 0,536% ( $\pm 0,083\%$ ). Com t calculado de 2,75 e p-valor de 0,021, pode-se afirmar, com 95% de confiança, **que houve uma redução estatisticamente significativa** na taxa de refugo **após a implementação das ações.**

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal reduzir o índice de refugo em uma célula produtiva por meio da aplicação da metodologia Lean Six Sigma. A utilização do ciclo DMAIC permitiu conduzir o projeto de forma estruturada, garantindo a identificação precisa das causas do problema e a implementação de soluções eficazes.

Na etapa **Define**, foi delimitado o escopo do projeto e identificado o problema central, com base nos indicadores da célula produtiva. Na fase **Measure**, foram coletados e analisados dados históricos de refugo, o que permitiu identificar os itens com maior incidência e confirmar a relevância do problema. A etapa **Analyze** contou com o uso de ferramentas como o Diagrama de Ishikawa, os 5 Porquês e a Matriz GUT, possibilitando a identificação e priorização das causas-raízes.

Na fase **Improve**, as melhorias foram implementadas com foco nas causas identificadas, incluindo ajustes nos parâmetros do processo, treinamento da equipe e revisão de procedimentos operacionais. A eficácia das ações foi comprovada pela redução significativa das taxas de refugo, validada estatisticamente por meio do teste t de Student.

Por fim, a etapa **Control** garantiu a sustentação dos resultados alcançados, com a definição de um plano de controle, padronização das boas práticas e auditorias regulares.

Conclui-se que a aplicação da metodologia Lean Six Sigma foi eficaz na redução de refugos e na melhoria do desempenho produtivo. Além disso, criou-se uma base sólida para a continuidade da melhoria contínua na organização. Recomenda-se a ampliação dessa abordagem para outras áreas, a fim de potencializar os ganhos obtidos.

## 5 REFERÊNCIAS

- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. *Planejamento, controle e gestão da produção*. São Paulo: Atlas, 2010.
- GEORGE, M. L. *Lean Six Sigma: combinação poderosa para melhorar a qualidade, acelerar os processos e reduzir os custos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.
- SLACK, N. et al. *Administração da produção*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.