



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOÃO ANTÔNIO LIMA PACHECO

**APRIMORAMENTO DOS MÉTODOS DE AFERIÇÃO E REDUÇÃO DAS PERDAS  
METÁLICAS NA ACIARIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA EM PERNAMBUCO**

Recife  
2025

JOÃO ANTÔNIO LIMA PACEHCO

**APRIMORAMENTO DOS MÉTODOS DE AFERIÇÃO E REDUÇÃO DAS PERDAS METÁLICAS NA ACIARIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA EM PERNAMBUCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador (a): Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araujo

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Pacheco, João Antônio Lima.

Aprimoramento dos métodos de aferição e redução das perdas metálicas na aciaria de uma usina siderúrgica em pernambuco / João Antônio Lima Pacheco. - Recife, 2025.

46 p. : il., tab.

Orientador(a): Edval Gonçalves de Araujo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Materiais - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Perda Metálica. 2. Aciaria. 3. MASP. 4. Siderurgia. I. Araujo, Edval Gonçalves de. (Orientação). II. Título.

670 CDD (22.ed.)

JOÃO ANTÔNIO LIMA PACHECO

APRIMORAMENTO DOS MÉTODOS DE AFERIÇÃO E REDUÇÃO DAS PERDAS  
METÁLICAS NA ACIARIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA EM PERNAMBUCO

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 14 de agosto de 2025

**BANCA EXAMINADORA**

*Dedico este trabalho à minha família e amigos, que sempre me acompanharam, orientaram e me acolheram durante minha formação como pessoa. Dedico também, a todos aqueles que, com seus conhecimentos, pavimentaram as estradas pelas quais pude correr com meus pensamentos ao criar esta obra.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Ana Paula, que em toda minha vida foi minha inspiração para chegar onde cheguei e que sempre me guiou e me acolheu em minhas escolhas.

Ao meu pai, João Neto, que com seus valores e conselhos me mostrou o caminho para me tornar uma pessoa melhor.

Aos meus irmãos, Matheus e Pollyanna, por serem minha companhia e alegria até mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu avô, João Filho, que, por me ensinar a ver o mundo através da poesia, me fez enxergar a arte que me fez enxergar o mundo e a ciência de uma forma ainda mais bela.

Às minhas avós, Marlene e Terezinha, que com seu amor e cuidados aqueceram a minha vida e cuidaram de mim.

A toda a minha família e amigos que me acompanharam e incentivaram para que toda essa jornada se tornasse mais agradável.

À minha namorada, Maria Luiza, que com seu amor e carinho me deu segurança, conforto e confiança para que chegasse onde cheguei.

À professora Magda Vieira, que me mostrou a beleza da engenharia de materiais e me convenceu de que essa era a escolha certa para a minha vida.

Ao professor Edval Araujo, que, com seu entusiasmo pela ciência, acreditou em meu potencial e me orientou nos meus estudos da siderurgia.

Aos meus mentores, Anderson Araújo, Rafael Alberto e Daniel Brasil, que me acompanharam e me guiaram durante a construção deste trabalho.

Por fim, a todos os meus companheiros da siderurgia que me ajudaram nos momentos mais difíceis da construção deste trabalho, tudo isso só foi possível graças a vocês!

## RESUMO

Este trabalho descreve a metodologia e os resultados da implementação de melhorias nos processos de quantificação da quantidade de metal perdido e de práticas operacionais na Aciaria de uma usina siderúrgica, visando o aumento da confiabilidade dos dados e a redução de perdas metálicas. Inicialmente, foi realizado um estudo dos métodos de aferição de perdas metálicas para que os indicadores pudessem ser coletados de forma mais rápida e com maior confiabilidade. Em seguida, a metodologia MASP (Método de Análise e Solução de Problemas) foi utilizada para estudar e reduzir as perdas metálicas, sendo aplicadas ferramentas da qualidade como Diagramas de Ishikawa, análise dos “5 Porquês” e diagramas de Pareto durante o processo. As perdas metálicas foram quantificadas em diversos pontos do processo, como o Forno Elétrico a Arco (FEA), Forno Panela (FP) e Lingotamento Contínuo (LC). Para a quantificação das perdas, foram utilizados métodos como a segregação de materiais em uma planta de beneficiamento de escórias, boleamento e oxicorte, além de pesagens diretas dos materiais perdidos na forma de tarugos. O diagnóstico inicial revelou a baixa confiabilidade dos indicadores de controle de perdas, o que direcionou o projeto para o desenvolvimento de um método de quantificação mais preciso, sendo levantados históricos utilizando trabalhos anteriores e elaborado um perfil das perdas da Aciaria. Por fim, foi possível obter melhorias significativas no método de quantificação e acompanhamento das perdas metálicas por etapa do processo que, associadas a melhores práticas operacionais e reajustes no processo, resultaram em uma redução de 23% nas perdas metálicas ao decorrer do projeto.

**Palavras-chaves:** Perda Metálica; Aciaria; MASP; Siderurgia.

## ABSTRACT

This work describes the methodology and results of implementing improvements in the processes for quantifying the amount of metal loss and in operational practices in the meltshop of a steel plant, aiming to increase data reliability and reduce metallic losses. Initially, a study of the methods for measuring metal losses was carried out so that indicators could be collected more quickly and with greater reliability. Next, the MASP methodology (Method of Analysis and Problem Solving) was used to study and reduce metallic losses, applying quality tools such as Ishikawa Diagrams, the “5 Whys” analysis, and Pareto diagrams during the process. Metallic losses were quantified at several points in the process, such as the Electric Arc Furnace (EAF), Ladle Furnace (LF), and Continuous Casting (CC). For loss quantification, methods such as segregation of materials in a slag beneficiation plant, balling and oxy-cutting, as well as direct weighing of materials lost in the form of billets, were used. The initial diagnosis revealed the low reliability of the loss control indicators, which guided the project toward the development of a more accurate quantification method, with historical data being collected from previous works and a profile of the meltshop losses being established. Finally, it was possible to achieve significant improvements in the method of quantifying and monitoring metallic losses at each stage of the process which, combined with better operational practices and process adjustments, resulted in a 23% reduction in metallic losses throughout the project.

**Keywords:** Metallic Loss; Meltshop; MASP; Steelmaking.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Forno Elétrico a Arco (FEA) .....	4
Figura 2 – Exemplo de Forno Panela (FP) .....	6
Figura 3 – Exemplo de Lingotamento Contínuo (LC) .....	7
Figura 4 – Esquema de um Lingotamento Contínuo .....	8
Figura 5 – Relação entre o MASP e o ciclo PDCA .....	9
Figura 6 – Exemplo de diagrama de Ishikawa .....	10
Figura 7 – Fluxo do processo da Aciaria e pontos de coletas de perdas metálicas associadas para cada etapa .....	13
Figura 8 – Processo de retirada de escória no FEA.....	14
Figura 9 – Descarte de aço líquido .....	15
Figura 10 – Material proveniente da retirada de escória do distribuidor .....	16
Figura 11 – Tarugos defeituosos segregados para descarte.....	17
Figura 12 – Planta de beneficiamento de escórias .....	18
Figura 13 – Processo de boleamento .....	19
Figura 14 – Processo de oxicorte de sucatas.....	19
Figura 15 – Ensaio de deslocamento de água para aferição da densidade de uma amostra.....	20
Figura 16 – Presença de materiais inadequados ao processamento nas escórias de FEA (a) e FP (b).....	24
Figura 17 – Alto volume de escória acumulado na área da planta de beneficiamento de escórias.....	25
Figura 18 – Diagrama de Ishikawa para a baixa confiabilidade dos dados de perdas metálicas da Aciaria.....	25
Figura 19 – Diagrama de Ishikawa para a alta perda metálica pela Baia 2.....	32
Figura 20 – Diagrama de Ishikawa para a alta perda metálica após o molde no LC.....	32
Figura 21 – Principais perdas de metal sólido após o molde no LC: (A) Desponte; (B) Emenda; (C) Final de lingotamento.....	35

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Exemplo de gráfico de Pareto .....	11
Gráfico 2 – Histórico de perdas metálicas médias da Aciaria até 2023.....	29
Gráfico 3 – Perfil de perdas metálicas da Aciaria em 2023.....	29
Gráfico 4 – Percentual de perdas metálicas não identificadas no LC em 2024...	30
Gráfico 5 – Perfil de perdas do Lingotamento Contínuo em 2024.....	30
Gráfico 6 – Principais paradas com potencial perda de aço líquido envolvendo painéis.....	33
Gráfico 7 – Perfil de perdas no Lingotamento Contínuo em junho de 2024.....	33
Gráfico 8 – Redução do tempo de interrupção do processo da Aciaria em 2024...	37
Gráfico 9 – Evolução das perdas metálicas pela Baia 2 em 2024.....	38
Gráfico 10 – Perdas após o molde no lingotamento em 2024.....	38
Gráfico 11 – Evolução das perdas metálicas da Aciaria durante o projeto.....	39
Gráfico 12 – Comparativo do perfil de perdas da Aciaria entre 2023 e 2024.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Identificação das causas raízes da dificuldade de quantificação das perdas metálicas.....	26
Tabela 2 –	Elaboração do plano de ação da etapa de melhoria no processo de quantificação das perdas metálicas da Aciaria.....	27
Tabela 3 –	Identificação das causas raízes da alta perda metálica da Aciaria....	34
Tabela 4 –	Elaboração do plano de ação para redução da perda metálica da Aciaria.....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
FEA	Forno Elétrico a Arco
FP	Forno Panela
GQT	Gestão de Qualidade Total
IC	Indicador de Controle
LC	Lingotamento contínuo
MASP	Método para Análise e Solução de Problemas

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	OBJETIVOS .....	2
1.1.1.	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>2</b>
1.1.2.	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1.	O QUE SÃO OS AÇOS E QUAL É A SUA IMPORTÂNCIA PARA A SOCIEDADE?.....	3
2.2.	PERDAS METÁLICAS NA ACIARIA .....	8
2.3.	MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS (MASP).....	9
<b>2.3.1</b>	<b>Ferramentas da Qualidade .....</b>	<b>10</b>
2.3.1.1	<i>Diagramas de Ishikawa .....</i>	<i>10</i>
2.3.1.2	<i>Gráficos de Pareto .....</i>	<i>11</i>
2.3.1.3	<i>5W2H .....</i>	<i>12</i>
<b>3.</b>	<b>MÉTODOLOGIA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.</b>	<b>Aprimoramento do método de quantificação das perdas metálicas da aciaria.....</b>	<b>13</b>
3.1.1.	<b>Perda metálica pelo barrado do fea (baia 1) .....</b>	<b>14</b>
3.1.2.	<b>Perda metálica por sobras de aço nas painéis (baia 2) .....</b>	<b>14</b>
3.1.3.	<b>Perda metálica por sobras de aço no distribuidor (baia 3) .....</b>	<b>15</b>
3.1.4.	<b>Perda metálica na retirada de escória do distribuidor (baia 5) .....</b>	<b>15</b>
3.1.5.	<b>Perda metálica pelo desponte no lingotamento contínuo (caixa de desponte) .....</b>	<b>16</b>
3.1.6.	<b>Perda metálica de tarugos não conformes (baia de descarte do pátio de tarugos) .....</b>	<b>16</b>
3.1.7.	<b>Quantificação das perdas de aço líquido (bais 1, 2, 3 e 5) .....</b>	<b>17</b>
3.1.7.1.	<i>Quantificação do teor de ferro metálico na srec .....</i>	<i>20</i>
3.1.8.	<b>Quantificação das perdas de aço sólido (caixa de desponte e baia de tarugos descartados do lc) .....</b>	<b>21</b>
3.2.	REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA DA ACIARIA .....	21
3.2.1.	<b>Identificação do problema .....</b>	<b>21</b>

3.2.2.	Observação do problema .....	22
3.2.3.	Análise do problema .....	22
3.2.4.	Elaboração do plano de ação .....	22
3.2.5.	Ações .....	22
3.2.6.	Verificação dos resultados .....	22
3.2.7.	Padronização .....	23
3.2.8.	Conclusão do projeto .....	23
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	24
4.1.	BAIXA CONFIABILIDADE DOS INDICADORES DE CONTROLE .....	24
4.1.1.	Identificação do problema .....	24
4.1.2.	Observação do problema .....	24
4.1.3.	Análise do problema .....	25
4.1.4.	Elaboração do plano de ação .....	27
4.1.5.	Ações .....	28
4.1.6.	Verificação dos resultados .....	28
4.1.7.	Padronização .....	31
4.1.8.	Conclusão da etapa .....	31
4.2.	REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA DA ACIARIA .....	31
4.2.1.	Identificação e observação do problema .....	31
4.2.2.	Análise do problema .....	31
4.2.3.	Elaboração do plano de ação .....	35
4.2.4.	Ações .....	36
4.2.5.	Verificação dos resultados .....	38
4.2.6.	Padronização das atividades .....	40
4.2.7.	Conclusão da etapa .....	41
5.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	42
6.	<b>PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	43
7.	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	44

## 1 INTRODUÇÃO

A viabilidade econômica de um processo está diretamente ligada ao seu rendimento, uma vez que uma operação, ainda que correta do ponto de vista das características do produto, pode ser comprometida do ponto de vista econômico (ALMEIDA, 2017). Define-se como rendimento a razão entre a quantidade de produtos gerados pelo processo e a quantidade de matérias primas utilizadas. A redução de desperdícios e ineficiências de um processo é fundamental para a otimização dos seus resultados, uma vez que essas fontes de perdas causam um impacto direto na viabilidade econômica da produção.

As usinas produtoras de aço, denominadas siderúrgicas, podem ser classificadas em duas principais categorias: usinas integradas, que realizam todo o processo produtivo, a partir do ferro primário vindo da redução do minério de ferro, e as usinas semi-integradas, que iniciam o seu processo com o ferro secundário, ou seja, ferro proveniente de sucatas e materiais já processados. É possível subdividir as usinas siderúrgica em áreas responsáveis por cada etapa do processo, sendo as principais a Redução, que extrai o ferro dos minérios em altos-fornos para produzir o ferro gusa, uma matéria prima para a produção do aço; a Aciaria, responsável pela conversão das matérias primas em aço; a Laminação e Trefilaria, responsáveis pela conformação do aço em produtos acabados (CALLISTER Jr, 2020; MOURÃO, 2007; STAHLEISEN, 2017).

Em uma usina siderúrgica, as perdas no processo podem ser classificadas de acordo com a natureza do material perdido, sendo denominadas perdas metálicas provenientes de materiais descartados na forma de metal e as demais como perdas não-metálicas. Uma das maneiras de estudar as perdas de um processo de Aciaria é através da realização de balanços de massas, que são estudos das entradas e saídas de material do processo, sejam eles englobando toda a Aciaria ou em um ponto específico da produção. Os estudos de Nascimento (2009) indicaram que a realização de Balanços de Massas em nível industrial é uma ferramenta consistente para a identificação e quantificação das fontes de perda do Rendimento Metálico da Aciaria.

O descarte de materiais metálicos pode ocorrer em diversas etapas do processo, como transporte, fusão e moldagem, sendo fundamental a minimização dessas ineficiências através de práticas de gestão de resíduos, controle de qualidade e manutenções preventivas (ALMEIDA, 2017).

A Gestão de Qualidade Total (GQT) tem como base o foco no cliente, trabalho em equipe envolvendo a organização como um todo e tomada de decisões a partir de dados obtidos, além de almejar a melhoria contínua. Nesse modelo de gestão é importante que haja grande engajamento dos gestores e de toda equipe, buscando melhores resultados através de métodos eficazes e do uso das ferramentas da qualidade. Dentre as ferramentas da qualidade mais comuns, encontram-se as cartas de controle, gráficos de Pareto e os diagramas Ishikawa (FELL, 2021).

O Método para Análise e Solução de Problemas (MASP) é um processo dinâmico e flexível que oferece um roteiro para a priorização de um problema, sua divisão em partes que possam ser analisáveis e verificações das situações que necessitam de atenção (BASTOS JÚNIOR, 2016). As aplicações dessa metodologia se estendem a diversos ramos como pequenas empresas, processos industriais e serviços do cotidiano como saneamento e energia (FERNANDES, 2012; FREITAS, 2009; PIENCHNIKI, 2011). O presente trabalho visa estudar os métodos de aferição do processo no intuito de reduzir as perdas metálicas da Aciaria através da metodologia MASP.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo aumentar o rendimento da Aciaria de uma usina siderúrgica em Pernambuco, por meio da redução das perdas metálicas do processo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Aprimorar os métodos de quantificação das perdas metálicas da Aciaria;
- Quantificar as perdas metálicas, identificando os pontos mais críticos para a eficiência do processo;
- Aplicar o Método de Análise e Solução de Problemas (MASP) para identificar causas raízes e implementar melhorias operacionais;
- Reduzir as perdas metálicas por meio de práticas operacionais mais eficientes e ajustes no processo;
- Garantir a continuidade dos resultados obtidos, por meio da elaboração de documentos e treinamentos destinados aos colaboradores envolvidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O QUE SÃO OS AÇOS E QUAL É A SUA IMPORTÂNCIA PARA A SOCIEDADE?

A história dos metais é fundamental para o desenvolvimento da sociedade, desde o uso inicial do bronze até a descoberta do ferro. Atualmente, os metais são essenciais em diversas indústrias, impulsionando o desenvolvimento econômico global. Os aços são ligas de ferro e carbono e têm uma história rica e uma presença vital na sociedade, sendo amplamente utilizado em várias aplicações desde a Revolução Industrial (GHOSH, CHATTERJEE, 2008).

As composições dos aços geralmente variam entre 0,002% e 2,00% em peso de carbono, além da adição dos mais diversos elementos de liga que conferem as suas propriedades como resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão e desgaste. Os aços carbono são compostos principalmente por ferro, carbono, silício, manganês, cromo, enxofre e fósforo, contendo outros elementos apenas em quantidades residuais. Os aços podem ser classificados quanto ao Grau (composição química), Tipo (processo produtivo) e Classe (aplicação). Existem vários sistemas de designação para os aços, como o SAE (*Society of Automotive Engineers*), AISI (*American Iron and Steel Institute*), ASTM (*American Society of Testing and Materials*) e a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (MOURÃO, 2007).

As indústrias siderúrgicas são responsáveis pela produção e processamento do aço. Utilizando matérias primas como minério de ferro, carvão e sucata de metal, essas indústrias realizam um processo que envolve fusão, refino e moldagem para transformar esses materiais em aço. O aço é amplamente utilizado na construção civil, fabricação de máquinas, transporte e infraestrutura, entre outras aplicações, o que torna as indústrias siderúrgicas uma parte indispensável da economia global (CALLISTER JR, RETHWISCH, 2020).

As indústrias siderúrgicas integradas são aquelas em que todo o processo de produção de aço, desde a extração de matérias-primas até a fabricação do produto final, é realizado em uma única instalação industrial. Esse tipo de processo inclui a operação de altos-fornos para a produção de ferro-gusa a partir do minério de ferro, bem como a operação de instalações de refino, como fornos de oxigênio básico (FOB) ou fornos elétricos a arco (FEA), para produzir aço. Essas indústrias geralmente têm

controle total sobre o processo de produção do aço, o que lhes permite otimizar a qualidade e o custo do produto final (SILVA, 2024).

Por outro lado, as indústrias siderúrgicas semi-integradas, também conhecidas como *Mini Mills*, são aquelas em que parte do processo de produção de aço é terceirizado ou realizado em instalações separadas. Isso pode incluir a compra de aço semiacabado, sucatas ferrosas ou lingotes de outras fontes para processamento adicional em suas instalações. Embora não tenham controle total sobre a produção de matérias-primas, as siderúrgicas semi-integradas ainda têm uma certa autonomia no processo de fabricação do aço, podendo adaptar sua produção às demandas do mercado (ARAÚJO, 1997).

O processamento de sucatas de aço em *Mini Mills* vem se mostrando uma opção cada vez mais popular na siderurgia, uma vez que o aço pode ser infinitamente reciclado. Para esse processo, é comum a utilização de Fornos Elétricos a Arco (FEA) (Figura 1), devido ao seu baixo custo e baixa demanda de energia térmica quando comparados às outras rotas de produção de aços (DEGNER, 2007; LOPEZ, 2022).

Figura 1 – Exemplo de Forno Elétrico a Arco (FEA)



Fonte: Adaptado de Stahleisen, 2007

Nos Fornos Elétricos a Arco, há a transformação de energia elétrica em energia térmica. A corrente elétrica alternada passa por transformadores, responsáveis por reduzir as tensões elétricas no sistema, e, em seguida, é levada aos eletrodos de

grafita ou carvão amorfo através terminais e cabos flexíveis de cobre (ARAÚJO, 1997).

A produção de aços via FEA pode ser dividida em 6 principais etapas:

- Carregamento, onde são adicionadas as matérias primas para a produção do aço no FEA;
- Fusão, onde as matérias primas são fundidas através dos arcos elétricos e reações químicas do processo;
- Refino Primário, onde é feito o processo de descarbonetação e a formação da escória espumante;
- Ajuste da composição química;
- Ajuste da temperatura de vazamento;
- Desoxidação.

O entendimento dessas etapas é crítico para o controle da qualidade e rendimento do processo produtivo (BALDAM, 2012).

Já o refino secundário consiste, em vários processos unitários, sendo os mais comuns a desoxidação, a dessulfuração (remoção de enxofre), a desgaseificação (remoção de hidrogênio e, eventualmente, nitrogênio), assim como a descarbonetação para aços com teores de carbono baixos ou ultrabaixos. Naturalmente, as necessidades para diferentes etapas dependem do tipo de aço e de suas exigências. Além disso, o ajuste de composição e o controle de temperatura, podem ser considerados processos unitários. Para realizar diferentes processos, são necessárias várias operações e equipamentos, como rinsagem, agitação indutiva, tratamento com escória, instalações de vácuo, aquecimento com eletrodos ou via combustão, dispositivos para injeção de ligas (HOLAPPA, 2014). Uma das estações mais frequentes em siderúrgicas semi-integradas para o processo de refino secundário é o Forno Panela (FP) (Figura 2).

Figura 2 – Exemplo de Forno Panela (FP)



Fonte: Yushun, 2025.

Após o processo de refino secundário no FP, o aço líquido em uma panela é transferido para a máquina de Lingotamento Contínuo (LC) (Figura 3). Quando a operação de lingotamento é iniciada, a válvula na parte inferior da panela é aberta e o aço flui com uma vazão controlada para o distribuidor e do distribuidor para um ou vários moldes, como apresentado na Figura 4. Os moldes de lingotamento geralmente são feitos de ligas de cobre e são refrigerados a água.

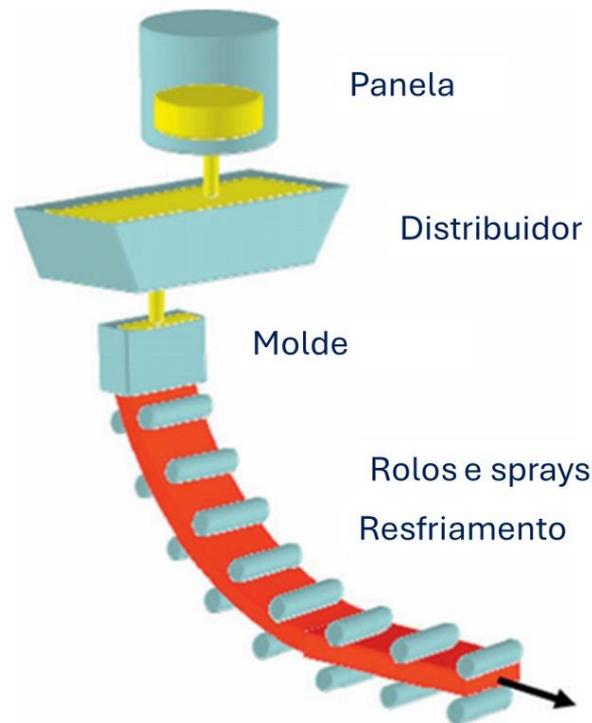
Figura 3 – Exemplo de Lingotamento Contínuo (LC)



Fonte: Fine Metal, 2025

A primeira etapa da solidificação, chamada de refrigeração primária, ocorre enquanto o metal líquido ainda se encontra dentro do molde. A espessura da casca solidificada aumenta progressivamente enquanto o tarugo é extraído. Na saída do molde, a espessura da parede sólida do tarugo deve ser suficiente para suportar a pressão ferrostática gerada pelo aço líquido. Abaixo do molde, a casca é resfriada por pulverização de água, essa etapa é chamada de resfriamento secundário. Na extremidade da máquina, o tarugo é cortado e transferido para uma baia de armazenamento ou para um laminador (LOUHENKILPI, 2014). Um esquema simplificado do processo de Lingotamento contínuo é demonstrado pela Figura 4.

Figura 4 – Esquema de um Lingotamento Contínuo



Fonte: Adaptado de Louhenkilpi, 2024

## 2.2 PERDAS METÁLICAS NA ACIARIA

O rendimento metálico em um processo metalúrgico é uma das principais medidas da eficiência com que as matérias-primas são transformadas em metal puro ou ligas metálicas desejadas (Equação 1). Fatores como pureza das matérias-primas, a eficiência das etapas de extração e refino, perdas durante o processamento e a capacidade de reciclagem de subprodutos afetam significativamente o rendimento. Um rendimento metálico alto é desejável para maximizar a eficiência e a rentabilidade do processo metalúrgico, enquanto um rendimento baixo pode indicar a necessidade de ajustes, uma vez que um processo pode ser economicamente inviável ainda que seja correto do ponto de vista produtivo (CARVALHO et al., 2017).

$$R(\%) = \frac{\text{Produção } (t)}{\text{Sucatas}(t) + \text{Ligas } (t)} \quad (1)$$

As perdas metálicas em um processo siderúrgico podem ocorrer em várias etapas, incluindo transporte de matérias-primas, fusão, refino, transporte interno, moldagem, reciclagem de subprodutos e armazenamento/manuseio. É importante gerenciar e minimizar essas perdas para maximizar a eficiência e a rentabilidade da aciaria. Isso pode ser feito através da implementação de práticas de gestão de resíduos, controle de qualidade e manutenção preventiva.

### 2.3 MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS (MASP)

Dentro das diversas práticas para a melhoria de processos é possível destacar o Método de Análise e Solução de Problemas (MASP), que é uma abordagem sistemática para identificar, analisar e resolver questões ou desafios em diversas áreas, como negócios, engenharia, ciências, etc. Este método geralmente segue uma série de etapas paralelas ao ciclo PDCA, que é um método iterativo de gestão da qualidade em que se planeja uma ação (Plan), executa-se (Do), verifica-se os resultados (Check) e, se necessário, ajusta-se o plano (Act), visando a melhoria contínua (Figura 5) (CAMPOS, 2014).

Figura 5 – Relação entre o MASP e o ciclo PDCA



Fonte: Attron, 2021

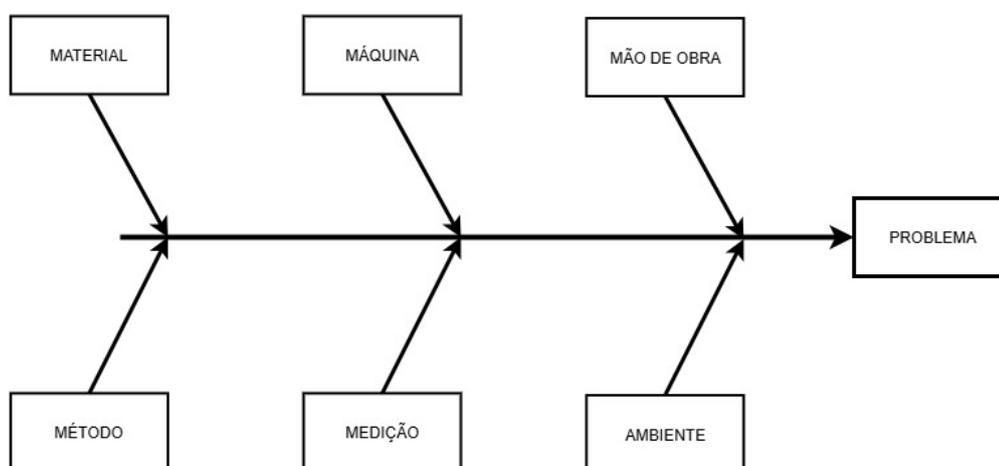
### 2.3.1. Ferramentas da Qualidade

Durante a aplicação do MASP, é fundamental o uso de ferramentas para garantir a eficácia da metodologia. As ferramentas da qualidade constituem um conjunto de métodos amplamente empregados na gestão de processos, visando a identificação, análise e controle de variáveis que impactam a eficiência e a conformidade dos produtos ou serviços (SOUZA, 2020). Dentre as mais utilizadas destacam-se o Diagrama de Ishikawa, o Diagrama de Pareto, o Fluxograma, o Gráfico de Dispersão e o Controle Estatístico de Processos (CEP). A aplicação dessas ferramentas possibilita a coleta e interpretação estruturada de dados, a identificação das causas-raiz de problemas e a definição de estratégias de melhoria contínua, contribuindo para a tomada de decisão baseada em evidências e para a elevação dos padrões de qualidade organizacional (INÁCIO, 2023).

#### 2.3.1.1 Diagramas de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito ou espinha de peixe (Figura 6), é uma ferramenta da qualidade utilizada para identificar e organizar, de forma estruturada, as possíveis causas de um problema específico. Seu objetivo é auxiliar na análise das origens de falhas ou desvios em processos, classificando as causas em categorias como métodos, materiais, mão de obra, máquinas, meio ambiente e medidas. Essa sistematização facilita a visualização dos fatores que influenciam o problema, permitindo à equipe de melhoria priorizar ações corretivas mais eficazes e direcionadas (HERMOGENES, 2020).

Figura 6 – Exemplo de diagrama de Ishikawa

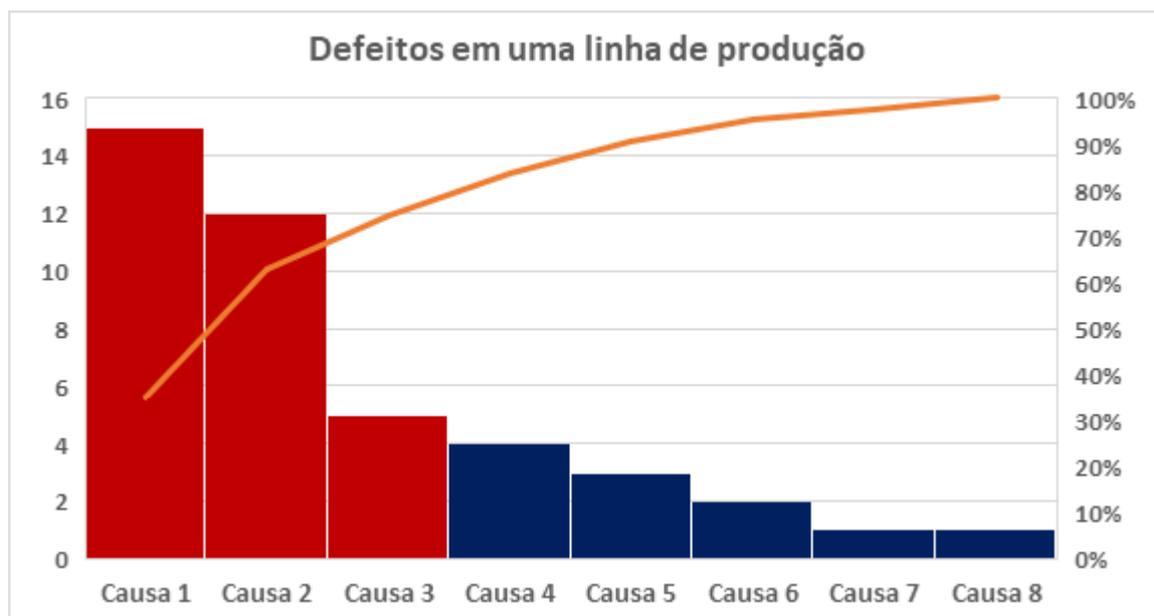


Fonte: O Autor, 2025

### 2.3.1.2 Gráficos de Pareto

O diagrama de Pareto (Gráfico 1) é uma das ferramentas clássicas da qualidade utilizada para priorizar problemas, permitindo identificar e visualizar, de forma quantitativa, as causas mais significativas de falhas ou desperdícios em processos. Fundamentado no princípio 80/20, proposto por Vilfredo Pareto, este recurso gráfico possibilita a concentração de esforços nas causas que mais impactam os resultados, aumentando a eficácia das ações de melhoria. Ao organizar dados em ordem decrescente de frequência ou impacto, o diagrama auxilia gestores e equipes na tomada de decisão baseada em evidências, tornando-se essencial para programas de qualidade e melhoria contínua (SILVA, 2022).

Gráfico 1 – Exemplo de gráfico de Pareto



Fonte: O Autor, 2025

### 2.3.1.3 Análise dos “5 porquês”

A análise dos 5 porquês é uma ferramenta de investigação de causa-raiz que busca identificar a origem de um problema por meio de sucessivas perguntas “por quê?”, normalmente aplicadas em cinco níveis de profundidade. Trata-se de uma metodologia simples, porém eficaz, que estimula o raciocínio crítico e evita soluções superficiais, direcionando equipes à identificação de causas fundamentais em vez de meros sintomas. Amplamente utilizada em conjunto com outras ferramentas da qualidade, como o diagrama de Ishikawa e o ciclo PDCA, a técnica dos 5 porquês se

destaca por sua aplicabilidade em diferentes contextos organizacionais, contribuindo para a melhoria contínua e a prevenção de falhas recorrentes (ARAÚJO, 2023).

#### 2.3.1.4 5W2H

O 5W2H é uma ferramenta de gestão e planejamento que organiza informações sobre ações e projetos por meio de sete perguntas-chave: What (O quê), Why (Por quê), Where (Onde), When (Quando), Who (Quem), How (Como) e How much (Quanto). Sua aplicação permite detalhar responsabilidades, prazos, recursos e objetivos, oferecendo clareza e facilitando o acompanhamento de processos de melhoria contínua. No contexto da qualidade, o 5W2H auxilia equipes a estruturar planos de ação de forma objetiva e mensurável, integrando-se com outras ferramentas, como o Diagrama de Ishikawa e o ciclo PDCA, para garantir a eficácia das intervenções e a redução de falhas (COSTA, 2022).

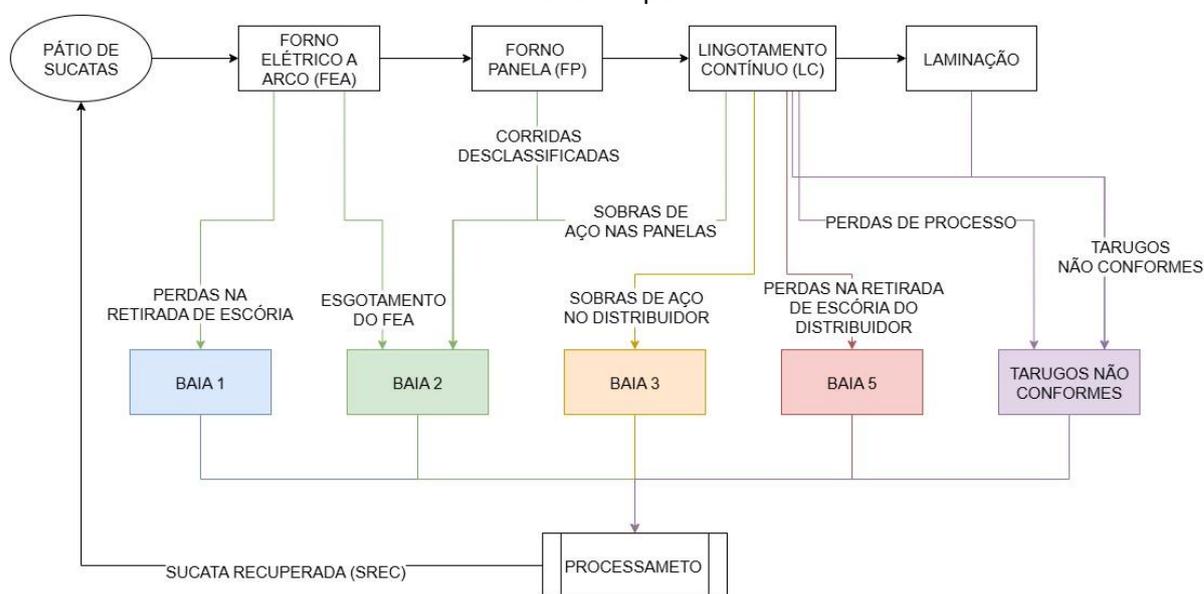
### 3 METODOLOGIA

Para que os indicadores de perda metálica pudessem ser coletados de forma mais eficiente e com maior confiabilidade, foi aplicado o MASP para a melhoria dos métodos de aferição da quantidade de metal descartado em cada etapa do processo. Em seguida, com dados mais confiáveis, a metodologia MASP foi utilizada novamente para estudar e reduzir as perdas metálicas na Aciaria.

#### 3.1 APRIMORAMENTO DO MÉTODO DE QUANTIFICAÇÃO DAS PERDAS METÁLICAS DA ACIARIA

Dentro da usina estudada, foi mapeado o fluxo do processo da Aciaria, bem como seus respectivos pontos de descarte de aço (Figura 7). Cada ponto de perda metálica recebe materiais de naturezas diferentes, o que torna necessária a utilização de métodos distintos de quantificação do indicador de controle.

Figura 7 – Fluxo do processo da Aciaria e pontos de coletas de perdas metálicas associadas para cada etapa



Fonte: O Autor, 2025

### 3.1.1 Perda metálica pelo barrado do FEA (Baia 1)

Durante o processo de retirada de escória no FEA (Figura 8), este subproduto é removido pela porta de trabalho do forno, passando pelo barrado e, em seguida, caindo no Túnel de Escória, também conhecido como Baia 1 na usina estudada. Nesta etapa, é comum que uma pequena quantidade de aço líquido seja removida juntamente com a escória. Para quantificar a quantidade de metal perdido pelo barrado do FEA, é necessário que o material seja processado a fim de segregar a fração metálica da escória.

Figura 8 – Processo de retirada de escória no FEA



Fonte: KT-GRANT, 2025

### 3.1.2 Perda metálica por sobras de aço nas panelas (Baia 2)

A Baia 2 recebe quaisquer sobras de aço em panelas durante o processo. Esses descartes englobam uma série de eventos, como a sobra de aço após o lingotamento, descarte de lotes não conformes de aço líquido e esgotamentos do FEA. Nesses casos, a panela é basculhada sobre a Baia 2 com o auxílio de pontes rolantes, derramando todo o material da panela no processo (Figura 9).

Figura 9 – Descarte de aço líquido



Fonte: O Autor, 2023

Embora o material descartado nessa baia contenha uma quantidade de escória muito menor do que a da Baia 1, ainda se faz necessário o processamento desse material para se obter dados mais exatos.

### **3.1.3 Perda metálica por sobras de aço no distribuidor (Baia 3)**

A Baia 3 é o local de descarte do aço contido no distribuidor em caso de necessidade. Esse material geralmente é acompanhado de resíduos de refratários e precisa passar por processamento via boleamento para remover a camada de tijolos e massa refratária e, posteriormente, pelo oxicorte para a redução das suas dimensões antes de retornar para a Aciaria como sucata e ser quantificado como perda metálica.

### **3.1.4 Perda metálica na retirada de escória do distribuidor (Baia 5)**

O material descartado na retirada de escória dos distribuidores é descartado em uma caixa reforçada (Figura 10). Esse material, que contém uma mistura de aço e escória, é então levado para o processo de boleamento antes de ser quantificado como perda metálica.

Figura 10 – Material proveniente da retirada de escória do distribuidor



Fonte: O Autor, 2023

### **3.1.5 Perda metálica pelo desponte no Lingotamento Contínuo (Caixa de desponte)**

Durante a partida do processo de lingotamento contínuo, devido a defeitos de forma ou por conta da peça utilizada para a remoção do primeiro tarugo do molde, uma fração do primeiro tarugo lingotado em cada veio é imprópria para a laminação. Desse modo, é realizado um corte manual com uma lança de oxi-acetileno dessa fração de tarugo, que é descartada na caixa de desponte. O peso desse material cortado é calculado multiplicando a densidade linear do tarugo pelo comprimento cortado e indicado pelo operador no sistema de registro do lote.

### **3.1.6 Perda metálica de tarugos não conformes (Baia de descarte do pátio de tarugos)**

Tarugos com defeitos, como empenamento, rechupe, romboidade e quaisquer outras características que sejam prejudiciais ao processo de laminação, são descartados na baia de descarte do pátio de tarugos (Figura 11). Após o descarte,

eles são levados para serem cortados para que suas dimensões sejam adequadas para as especificações do FEA.

Figura 11 – Tarugos defeituosos segregados para descarte



Fonte: O Autor, 2024

### 3.1.7 Quantificação das perdas de aço líquido (Baías 1, 2, 3 e 5)

Uma vez que as perdas de aço líquido acabam se misturando com a escória gerada no processo, torna-se necessário um processo de segregação desses materiais antes da quantificação das perdas metálicas do processo, já que a perda pela escória é uma perda tratada separadamente e não está incluída no escopo deste projeto. Para realizar o processamento do material, utilizam-se métodos como uma planta de beneficiamento de escória, boleamento e oxicorte.

As escórias geradas pelo FEA e FP são processadas em uma planta de beneficiamento de escórias (Figura 12), que consiste em um processo que utiliza de peneiras vibratórias, britadores e tambores magnéticos para desagregar e segregar a escória da parte metálica.

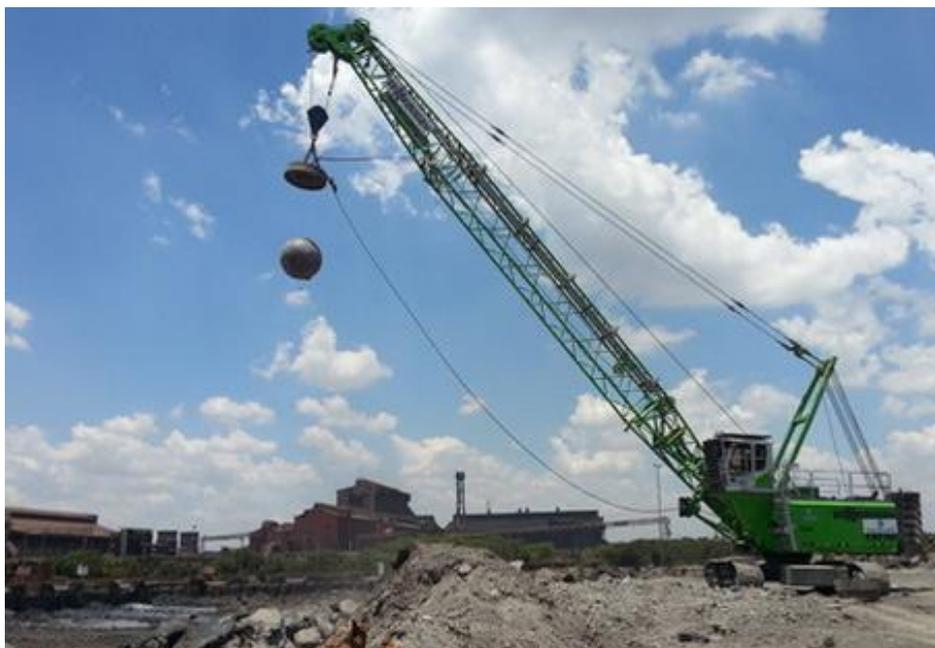
Figura 12– Planta de beneficiamento de escórias



Fonte: Atoll, 2025

Materiais com maiores dimensões, que não podem ser processados pela planta de beneficiamento, passam por um processo de redução de suas dimensões através do boleamento (Figura 13), que consiste em atingir o material com uma esfera metálica erguida por um guindaste. Esse processo é eficaz não só para a redução das dimensões, mas também para desagregar a escória do material metálico.

Figura 13 – Processo de boleamento



Fonte: Belval, 2024

Já materiais mais puros, como tarugos ou peças de aço com dimensões maiores do que as permitidas pelas especificações do FEA, são cortados via oxicorte utilizando lanças de oxigênio ou oxiacetileno, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Processo de oxicorte de sucatas



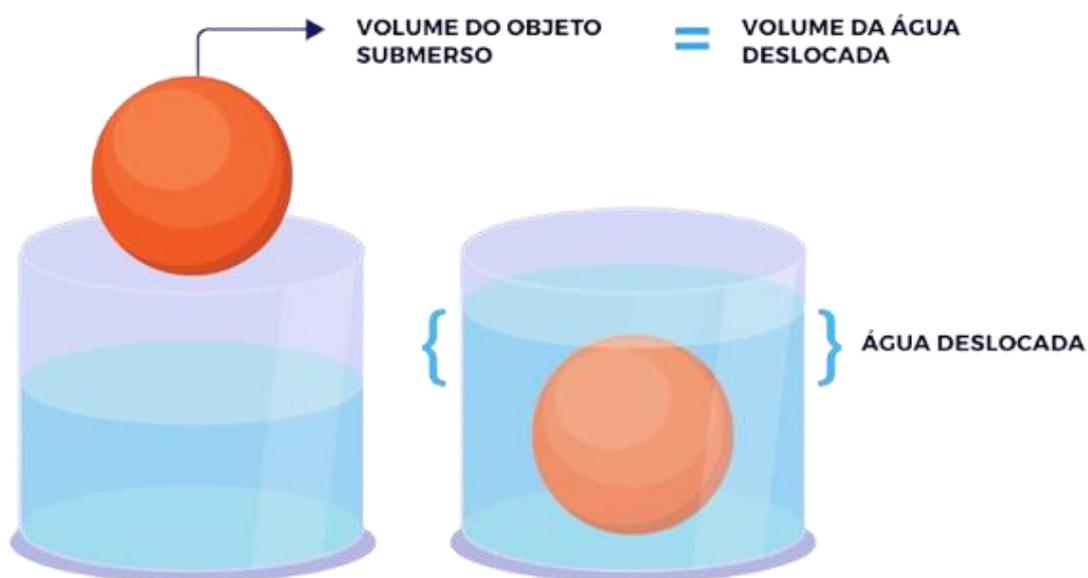
Fonte: GOMES SAS, 2025

O produto gerado pelos processos de segregação na planta de beneficiamento de escórias e por boleamento é chamado de Sucata Recuperada (SREC) e, para melhor avaliar a sua pureza, utiliza-se um ensaio de deslocamento de água para verificar o teor de ferro metálico contido no material. Os dados de pesagem desses materiais são informados ao Pátio de Sucatas, uma vez que esse material retorna como matéria prima para o processo.

### 3.1.7.1 Quantificação do teor de ferro metálico na SREC

O teor de ferro metálico (%Fe) das sucatas recuperadas é aferido por meio de análises de amostras de cada lote. Para cada lote gerado pelos processos de recuperação metálica é retirada uma amostra de aproximadamente 60 kg de material. Em seguida, a densidade da amostra é calculada dividindo sua massa pelo seu volume, que é medido utilizando um ensaio de deslocamento de água como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Ensaio de deslocamento de água para aferição da densidade de uma amostra



Fonte: Adaptada GCFGlobal, 2025

Uma vez aferida a densidade da amostra, o %Fe é calculado através da Equação 2, descrita por Vaz (2011):

$$\%Fe = \frac{\frac{1}{\rho_T} - \frac{1}{\rho_{Esc}}}{\frac{1}{\rho_{Aço}} - \frac{1}{\rho_{Esc}}} \quad (2)$$

Onde  $\rho_T$  é a densidade da amostra,  $\rho_{Aço}$  a densidade do aço e  $\rho_{Esc}$  a densidade da escória.

### 3.1.8 Quantificação das perdas de aço sólido (Caixa de Desponte e Baia de tarugos descartados do LC)

Quaisquer perdas de aço sólido são quantificadas através de pesagens diretas, passando apenas por um processo de redução de suas dimensões, através de oxicorte e/ou boleamento, caso seja necessário para melhor atender as necessidades do forno. Os dados de pesagem desses materiais são informados ao Pátio de Sucatas, uma vez que esse material retorna como matéria prima para o processo.

## 3.2 REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA DA ACIARIA

### 3.2.1. Identificação do problema

Na etapa de identificação do problema são levantados pontos como a relevância do projeto, o cenário em que o projeto se passa, qual indicador de controle será utilizado para acompanhar o desempenho do projeto, histórico do problema abordado. Ao fim dessa etapa, é necessário que já estejam definidos os ganhos e perdas relacionados ao projeto e o cronograma de atividades.

O indicador de controle escolhido para acompanhar o desempenho do projeto é descrito pela Equação 3. Para essa etapa, foram utilizados diagramas de Pareto e estratificações para analisar o perfil de perdas da Aciaria e propor ações mais assertivas.

$$Perda\ metálica\ (kg/t) = \frac{Metal\ perdido\ (kg)}{Produção\ (t)} \quad (3)$$

### **3.2.2. Observação do problema**

Para que a observação do problema gere informações mais confiáveis, foram utilizadas ferramentas como registros fotográficos, imagens de câmeras de monitoramento, folhas de verificação e gestão de itens de verificação em quadros posicionados nas cabines de operação.

### **3.2.3. Análise do problema**

Para a análise do problema, foram utilizadas ferramentas como o diagrama de Ishikawa e a análise dos 5 porquês para identificar as causas raízes que permitiram sanar os problemas e forma mais eficiente e duradoura, além de diagramas de Pareto que permitiram simplificar o escopo do projeto para uma melhor agilidade.

### **3.2.4. Elaboração do plano de ação**

O plano de ação foi elaborado utilizando a ferramenta 5W2H, que permite que diversas ações sejam elaboradas e gerenciadas de forma clara e sucinta. Foi proposto também um cronograma para a implementação das ações.

### **3.2.5. Ações**

As ações foram realizadas seguindo o cronograma proposto na etapa de elaboração do plano de ação.

### **3.2.6. Verificação dos resultados**

A verificação dos resultados foi feita através do acompanhamento do indicador de perdas metálicas da Aciaria e através de observações *in loco*. A quantidade de metal perdido foi obtida através da pesagem dos materiais processados e do registro das perdas realizado pelos operadores de cada etapa do processo.

### **3.2.7. Padronização**

As atividades importantes para o controle das perdas metálicas foram padronizadas no sistema interno da empresa, sendo incluídas etapas em atividades preexistentes e a criação de novos padrões na rotina do processo.

### **3.2.8. Conclusão do projeto**

Na etapa de conclusão, o desempenho do projeto é avaliado e são discutidos os aprendizados obtidos ao longo das atividades. Também são discutidas oportunidades de melhorias futuras e problemas remanescentes.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. BAIXA CONFIABILIDADE DOS INDICADORES DE CONTROLE

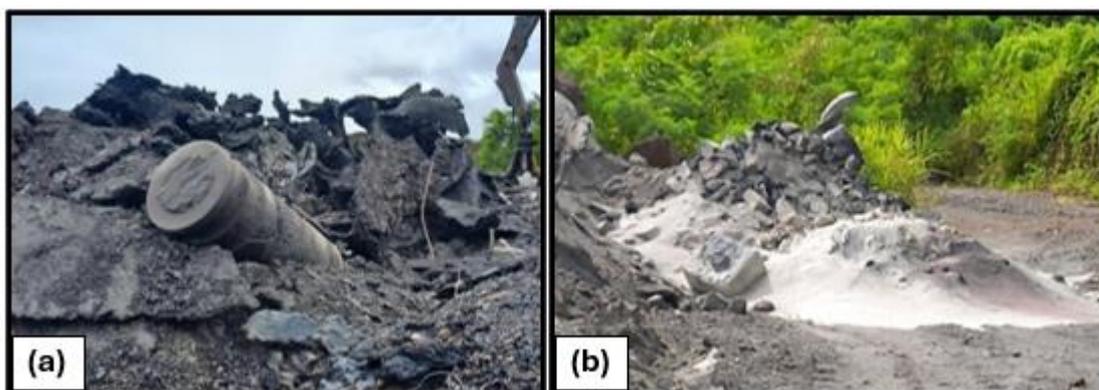
#### 4.1.1. Identificação do problema

Após uma tentativa de avaliar o histórico da perda metálica na Aciaria, ficou constatado que o indicador de controle não refletia bem a realidade do processo, apontando valores muito acima do plausível para o que era observado. Deste modo, para que as tratativas das perdas metálicas fossem confiáveis, definiu-se que o projeto seria dividido em duas etapas: Melhoria no processo de quantificação das perdas metálicas e, posteriormente, a redução das perdas metálicas da Aciaria.

#### 4.1.2. Observação do problema

Ao serem realizadas observações nas áreas de armazenamento das escórias, cujo processamento fornece os dados das perdas metálicas, foi possível evidenciar uma série de materiais que não são processados pela planta ou boleamento (Figura 16), como cilindros de laminação, pallets, tijolos refratários etc, o que gera danos ao processo e gera dados que não condizem com a realidade das perdas.

Figura 16 – Presença de materiais inadequados ao processamento nas escórias de FEA (a) e FP (b)



Fonte: O Autor, 2023

Além disso, foi constatado que a planta de beneficiamento de escórias vinha com um grande problema de interrupções de processo por conta de falhas mecânicas, o que fazia com que a escória fosse acumulada ao longo do tempo (Figura 17). Dessa

forma, por conta da falta de espaço, era impossível distinguir os materiais gerados no período atual dos materiais acumulados ao longo do tempo no processamento.

Figura 17 – Alto volume de escória acumulado na área da planta de beneficiamento de escórias

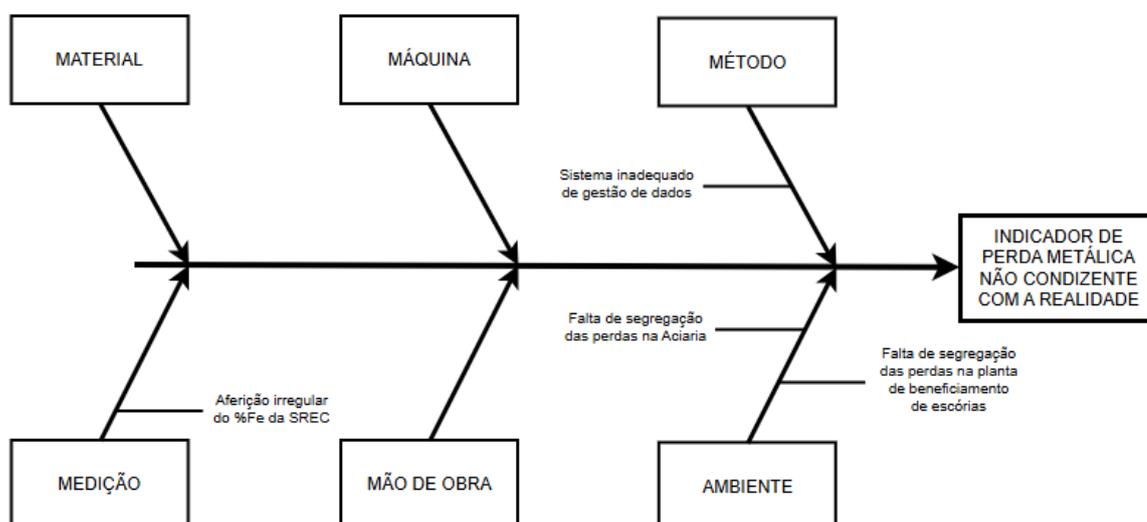


Fonte: O Autor, 2023

#### 4.1.3. Análise do problema

Foi elaborado um digrama de Ishikawa para identificar as principais causas associadas à dificuldade de quantificação da perda metálica da Aciaria (Figura 18).

Figura 18 – Diagrama de Ishikawa para a baixa confiabilidade dos dados de perdas metálicas da Aciaria



Fonte: O Autor, 2024

Após a identificação das principais causas, a ferramenta dos 5 porquês foi utilizada para destrinchá-las em suas respectivas causas raízes (Tabela 1).

Tabela 1 – Identificação das causas raízes da dificuldade de quantificação das perdas metálicas

CAUSA	PORQUÊ 1	PORQUÊ 2	PORQUÊ 3	PORQUÊ 4	PORQUÊ 5
Falta de segregação das perdas na planta de beneficiamento de escórias	Falta de espaço para armazenar os materiais que chegam da Aciaria	Acúmulo de material passivo na área da planta de beneficiamento de escória	Baixa capacidade de processamento da planta de beneficiamento de escória	Interrupções frequentes do processo	
Falta de segregação das perdas na Aciaria	Retirada de escória do distribuidor, sobra de aço no distribuidor e sobra de aço na panela são descartados na mesma baía na Aciaria	Falta de logística de segregação e pesagem desses materiais	Não existe uma zona específica para esses materiais na área da Harsco		
Aferição irregular do %Fe da SREC	Sistemática de de aceitação dos carregamentos é muito permissiva	Aferições de %Fe feitas sem a supervisão de um representante do Pátio de Sucatas	Operação do Pátio de Sucatas não é treinada no processo de aferição do %Fe		
	Planilha de aferição do %Fe é mal explicada	Fluxo de cálculos não é explicado na planilha			
		Dados desatualizados	Falta de verificação dos dados da Planilha		
Sistemática inadequada de gestão de dados	Falta de alinhamento entre o recebimento de sucatas de retorno interno e aferição das perdas metálicas	SREC proveniente de material passivo e corrente sendo entregues em um mesmo carregamento	Plano de processamento não contempla a geração de dados de perdas metálicas	Falta de alinhamento dos interesses das perdas metálicas e produção de matérias primas	
		Retorno interno de tarugos é computado misturado com a sucata oxicortada	Não existe um código no sistema para o apontamento de sucata de tarugos de retorno interno		
		Carregamentos sendo entregues sem a aferição do %Fe			

Fonte: O Autor, 2024

#### 4.1.4. Elaboração do plano de ação

Uma vez identificadas as causas raízes do problema, um plano de ação foi elaborado com o auxílio da ferramenta 5W2H, descrita parcialmente na Tabela 2 para manter a proteção de dados industriais.

Tabela 2 – Elaboração do plano de ação da etapa de melhoria no processo de quantificação das perdas metálicas da Aciaria.

PROBLEMA	O QUÊ?	COMO?
<b>Interrupções frequentes do processo</b>	Realizar uma reforma da planta de beneficiamento de escórias	Realizar a desmontagem das peças antigas e instalação dos novos componentes da planta de beneficiamento
<b>Falta de alinhamento dos interesses das perdas metálicas e produção de matérias primas</b>	Montar um plano de processamento que atenda as demandas das duas partes	Reuniões de alinhamento de interesse e desempenho
<b>Não existe uma zona específica para esses materiais na planta de beneficiamento de escórias</b>	Separar e identificar baias na planta de beneficiamento de escórias	Liberar espaço na área, segregar as baias com barreiras físicas e identificação
<b>Operação do Pátio de Sucatas não é treinada no processo de aferição do %Fe</b>	Realizar o treinamento para o ensaio de metalização	Atualizando o padrão de metalização de carregamentos de SREC
<b>Falta de verificação dos dados da Planilha de metalização</b>	Elaborar ensaios de verificação dos dados utilizados na planilha	Realizando ensaios de densidade dos materiais e verificando os valores das constantes do cálculo
<b>Não existe um código no sistema para o apontamento de sucata de tarugos de retorno interno</b>	Cadastrar um novo código de sucatas para o retorno interno de tarugos	Entrando em contato com a equipe de cadastro de materiais
<b>Carregamentos sendo entregues sem a aferição do %Fe</b>	Definir uma frequência específica dos ensaios de metalização da SREC	Definindo a necessidade da aferição para a liberação do carregamento no padrão de metalização e classificação de sucatas

Fonte: O Autor, 2024

#### **4.1.5. Ações**

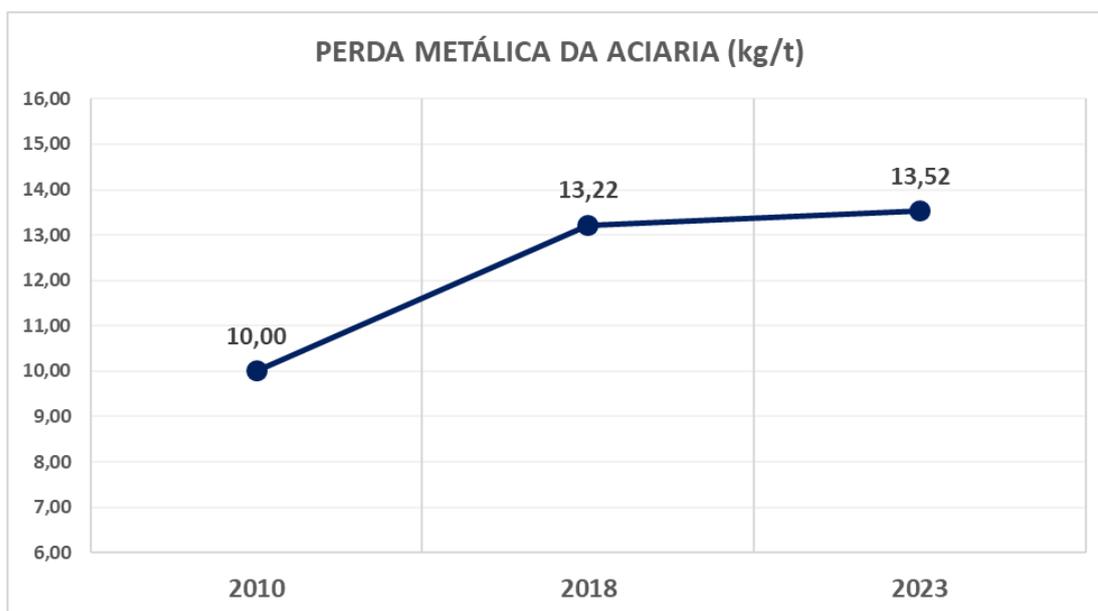
Devido à reforma na planta de beneficiamento de escórias, não foi possível realizar a segregação das baias com barreiras físicas, recorrendo à segregação sistemática dos materiais sob supervisão frequente da equipe responsável pelo projeto. Para que o projeto continuasse, decidiu-se que a etapa de redução das perdas metálicas seria iniciada utilizando quantificações controladas nos pontos de perdas.

Para a identificação das perdas de metal após o molde no lingotamento contínuo, houve uma atualização dos procedimentos operacionais para acomodar o apontamento das perdas com identificação das suas respectivas causas no momento de identificação do lote produzido. Essa prática gera relatórios que correlacionam as causas das perdas com a massa de metal perdido na forma de tarugos.

#### **4.1.6. Verificação dos resultados**

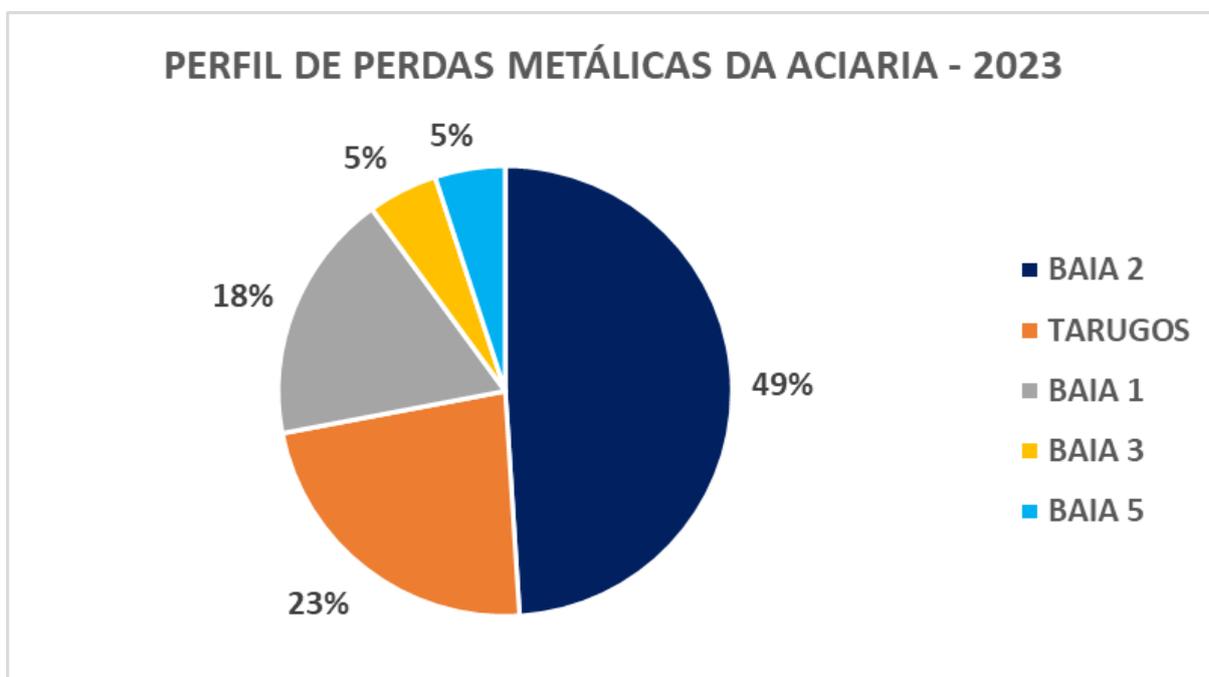
Após a reforma da planta, um plano de processamento semanal foi criado baseado na sua capacidade e cronograma de processamento, liberando uma área suficiente para armazenar o material recém chegado sem o risco de contaminação dos dados com materiais dos meses anteriores. Por questões de proteção de dados industriais, foi adotado um valor fictício para a perda metálica no ano de 2010, já os demais dados foram calculados proporcionalmente tomando este valor inicial como base. Com isso, foi possível definir um valor para o indicador de controle das perdas metálicas e compará-lo aos valores históricos (Gráfico 2) e elaborar um novo perfil de perdas metálicas médias para a Aciaria em 2023 através de análises pontuais e controladas em cada um dos pontos de perda (Gráfico 3).

Gráfico 2 – Histórico de perdas metálicas médias da Aciaria até 2023



Fonte: O Autor, 2023

Gráfico 3 – Perfil de perdas metálicas da Aciaria em 2023

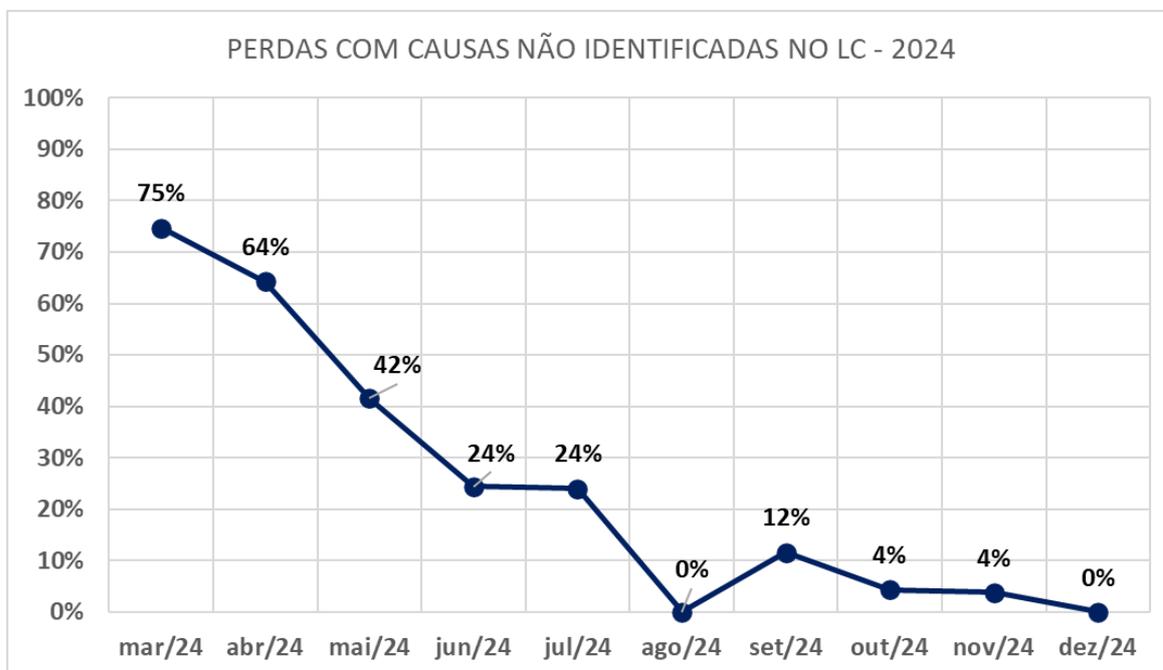


Fonte: O Autor, 2023

O estabelecimento da prática de segregação e identificação das perdas metálicas após o molde se mostrou eficaz no LC, eliminando quase completamente a quantidade de perdas não identificadas na forma de tarugos após a sua instalação em junho de 2024, como demonstrado no Gráfico 4. Com isso, também passou a ser

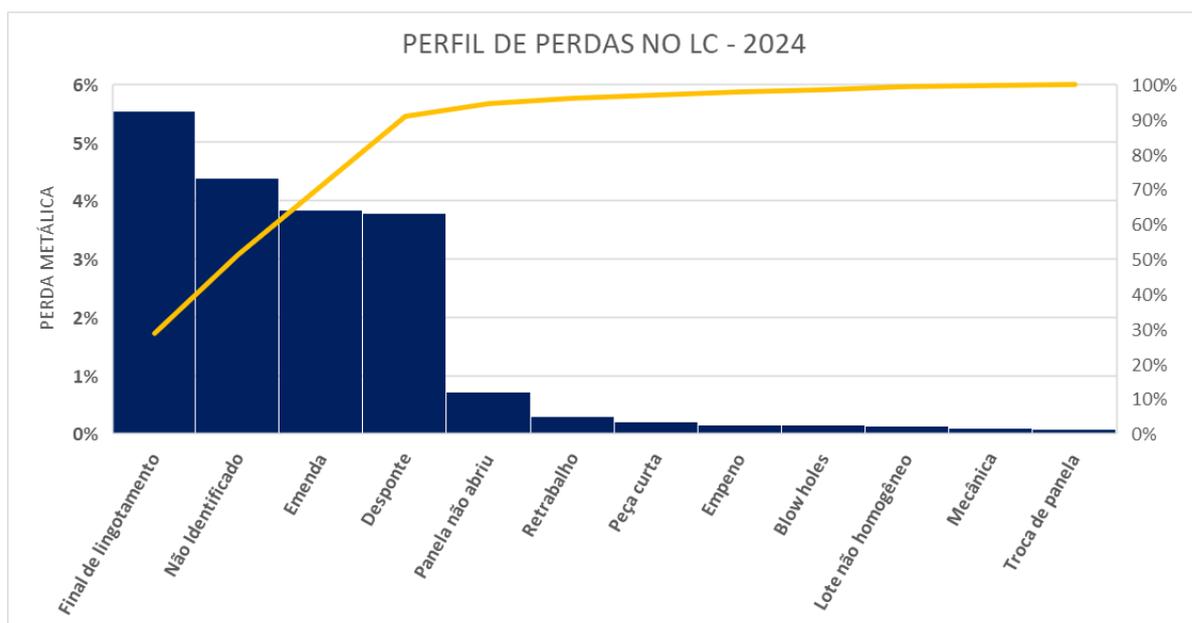
possível acompanhar o perfil de perdas do Lingotamento Contínuo de forma isolada (Gráfico 5).

Gráfico 4 – Percentual de perdas metálicas não identificadas no LC em 2024



Fonte: O Autor, 2024

Gráfico 5 – Perfil de perdas do Lingotamento Contínuo em 2024



Fonte: O Autor, 2025

#### **4.1.7. Padronização**

Padrões operacionais foram criados/atualizados para garantir que as ações mantivessem seus resultados ao longo do tempo. As principais atividades padronizadas foram:

- Aferição do %Fe em sucatas recuperadas internas e externas
- Registro das perdas de metal sólido por lote no LC
- Recebimento e classificação das sucatas recuperadas

#### **4.1.8. Conclusão da etapa**

Ao fim da etapa da melhoria da quantificação das perdas metálicas da Aciaria, ainda que o plano de ação não tenha sido concluído por completo, foi possível iniciar o acompanhamento das perdas metálicas de forma controlada. Para se obter dados históricos de perdas metálicas da Aciaria, foram estudados projetos antigos de 2010 e 2018, já os dados de 2023 foram obtidos através de análises de amostras controladas para se obter as perdas metálicas médias para cada ponto de perda na Aciaria, obtendo-se assim o perfil de perdas metálicas da Aciaria em 2023 apresentado no Gráfico 3.

### **4.2. REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA DA ACIARIA**

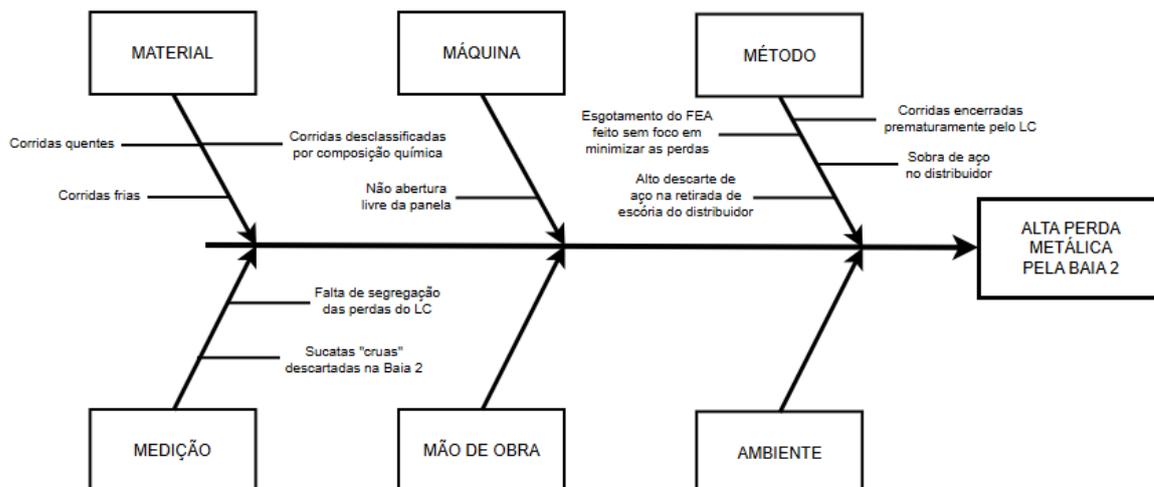
#### **4.2.1. Identificação e observação do problema**

Após a formulação do novo perfil de perdas da Aciaria, foi possível evidenciar que a maior parte das perdas eram provenientes de descarte na Baia 2 e na forma de tarugos após o molde no LC, sendo estes pontos escolhidos como foco das melhorias para este trabalho.

#### **4.2.2. Análise do problema**

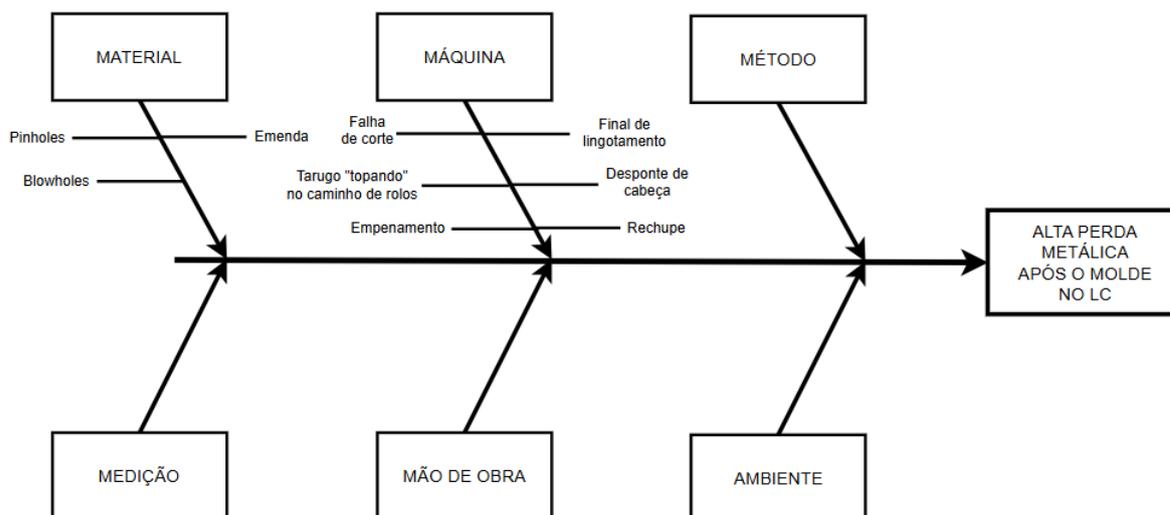
Utilizando uma análise de causa e efeito para a alta perda metálica pela Baia 2 (Figura 19) e após o molde no LC (Figura 20), foram definidas as principais causas potenciais para estes problemas.

Figura 19 - Diagrama de Ishikawa para a alta perda metálica pela Baia 2



Fonte: O Autor, 2024

Figura 20 - Diagrama de Ishikawa para a alta perda metálica após o molde no LC

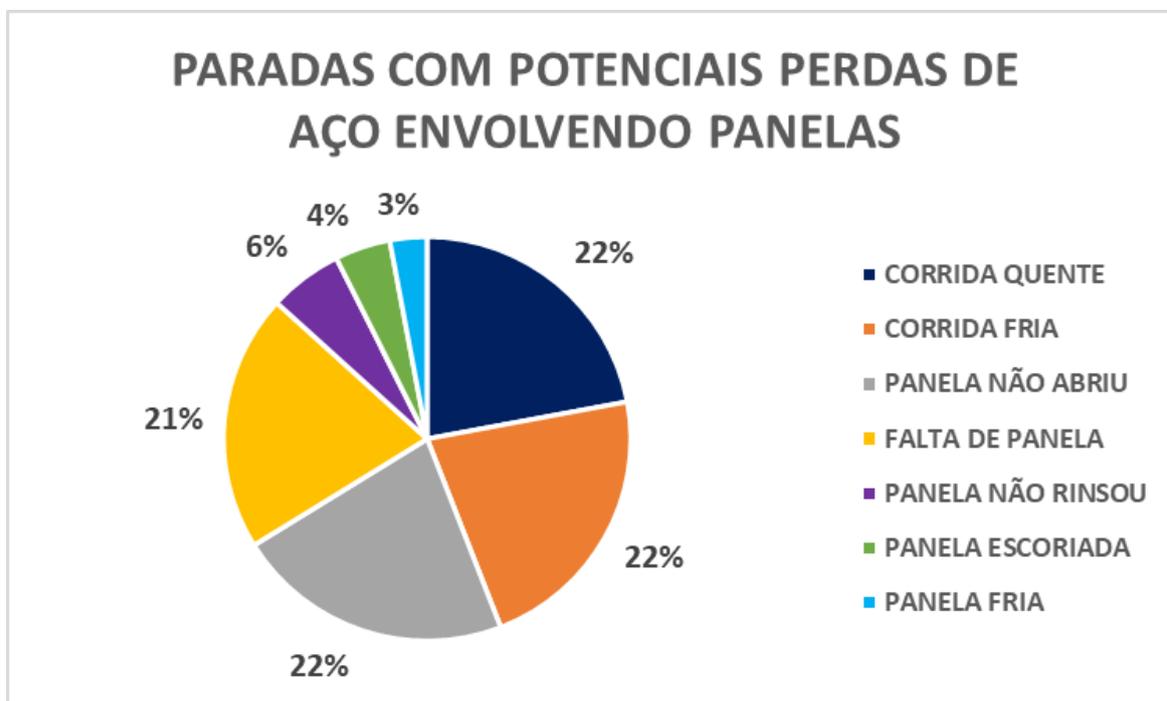


Fonte: O Autor, 2024

Em seguida, além de observações da rotina feitas pela operação e equipe do projeto, foram realizadas algumas análises mais criteriosas para definir as principais causas para os valores elevados de perdas para estes pontos, como demonstrado nos Gráficos 6 e 7, indicando que as principais causas para o alto descarte na Baia 2 eram relacionadas à temperatura do aço e problemas com painéis e perdas por desponte, emenda e final de lingotamento no LC (Figura 21). Definidas as principais causas para os problemas, uma análise dos cinco porquês foi realizada para a

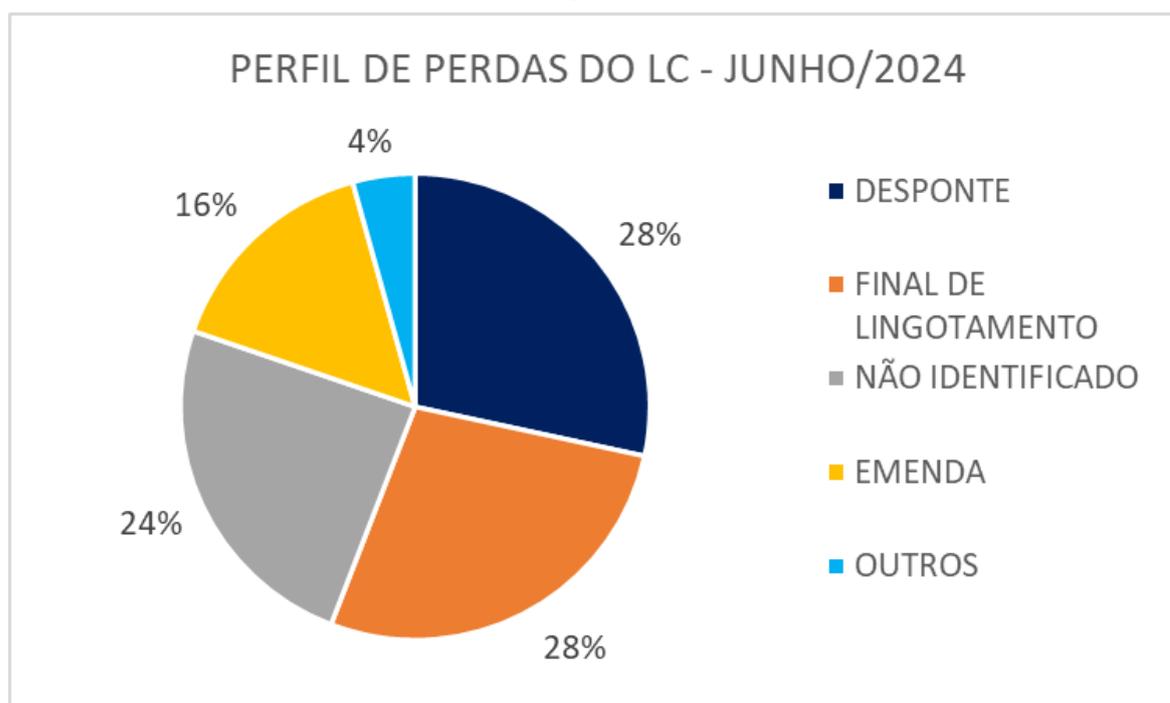
identificação das causas raízes para as altas perdas metálicas pela Baia 2 e após o molde no LC.

Gráfico 6 – Principais paradas com potencial perda de aço líquido envolvendo painelas



Fonte: O Autor, 2024

Gráfico 7 – Perfil de perdas no Lingotamento Contínuo em junho de 2024



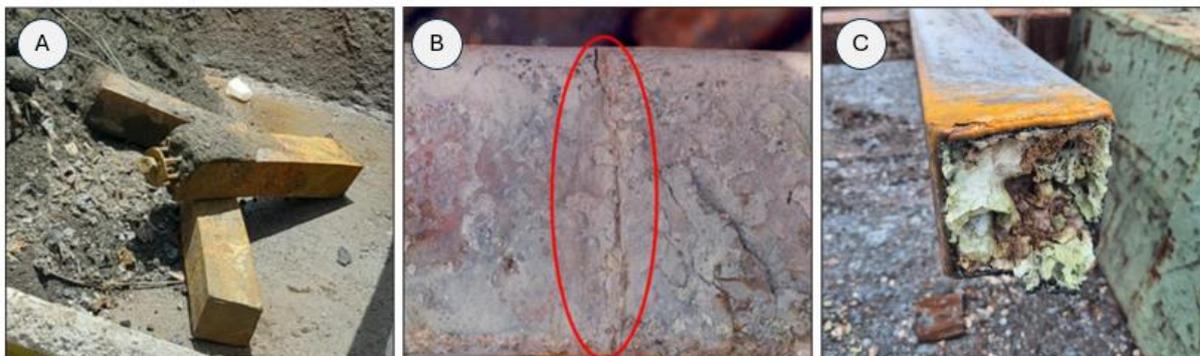
Fonte: O Autor, 2024

Tabela 3 – Identificação das causas raízes da alta perda metálica da Aciaria

CAUSA	PORQUÊ 1	PORQUÊ 2	PORQUÊ 3	PORQUÊ 4	PORQUÊ 5
Alta perda por rechepe de final de lingotamento	Alta quantidade de interrupções de processo	Corridas encerradas prematuramente	Corridas com baixa temperatura	Falta de controle da perda térmica durante o processamento da corrida no FP	Método ineficiente de medição da perda térmica
		Falhas mecânicas			
		Falta de painel			
	Não realização do fechamento estratégico dos veios	Corridas com baixa temperatura	Falta de controle da perda térmica durante o processamento da corrida no FP	Método ineficiente de medição da perda térmica	
Alta perda por desponte	Início de lingotamento saindo com uma curvatura muito acentuada	Rolo da endireitadora demorando para descer	Sensor de posição da cabeça do tarugo mal posicionado		
	Alta quantidade de interrupções de processo	Corridas encerradas prematuramente	Corridas com baixa temperatura	Falta de controle da perda térmica durante o processamento da corrida no FP	Método ineficiente de medição da perda térmica
		Falhas mecânicas			
		Falta de painel			
Alta perda por emenda	Alta quantidade de interrupções de processo	Corridas encerradas prematuramente	Corridas com baixa temperatura	Falta de controle da perda térmica durante o processamento da corrida no FP	Método ineficiente de medição da perda térmica
		Falhas mecânicas			
		Falta de painel			
Corridas quentes	Corrida liberada com excesso de temperatura no FP	Falta de controle da perda térmica durante o processamento da corrida no FP	Método ineficiente de medição da perda térmica		
Corridas frias	Aço perdendo calor para a panela	Falta de controle da perda térmica durante o processamento da corrida no FP	Método ineficiente de medição da perda térmica		
Esgotamento do FEA feito sem foco nas perdas metálicas	Falta de padronização da atividade com foco em perdas metálicas				
Corridas encerradas prematuramente no LC	Problemas com a temperatura do aço	Falta de controle da perda térmica durante o processamento da corrida no FP	Método ineficiente de medição da perda térmica		
		Interrupções frequentes no processo geram perdas térmicas consideráveis			

Fonte: O Autor, 2024

Figura 21 – Principais perdas de metal sólido após o molde no LC: (A) Desponte; (B) Emenda; (C) Final de lingotamento



Fonte: O Autor, 2025

#### 4.2.3. Elaboração do plano de ação

Foram definidas ações para mitigar as principais causas raízes para cada ponto de perda. Entretanto, problemas como a alta quantidade de interrupções do processo, quantidade de falhas mecânicas e indisponibilidade de painéis foram tratados em seus respectivos projetos isolados. Dessa forma, as principais causas a serem tratadas neste trabalho foram o método ineficiente de medição da perda térmica e o sensor de posição da cabeça do tarugo mal posicionados, sendo elaborado o plano de ação descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Elaboração do plano de ação para redução da perda metálica da Aciaria.

PROBLEMA	O QUÊ?	COMO?
<b>Método ineficiente de medição da perda térmica</b>	Incluir a perda térmica entre medições de temperatura no Forno Painela	Disponibilizar um sistema para facilitar a aferição da perda térmica entre as medições de temperatura no FP
<b>Sensor de posição da cabeça do tarugo mal posicionado</b>	Reposicionar o sensor de posição da cabeça do tarugo na partida da máquina	Serviços de caldeiraria e soldagem

Fonte: O Autor, 2024

Além disso, foram propostas as seguintes ações complementares que ajudariam a reduzir ainda mais os valores de perda na Baía 2 e Lingotamento Contínuo:

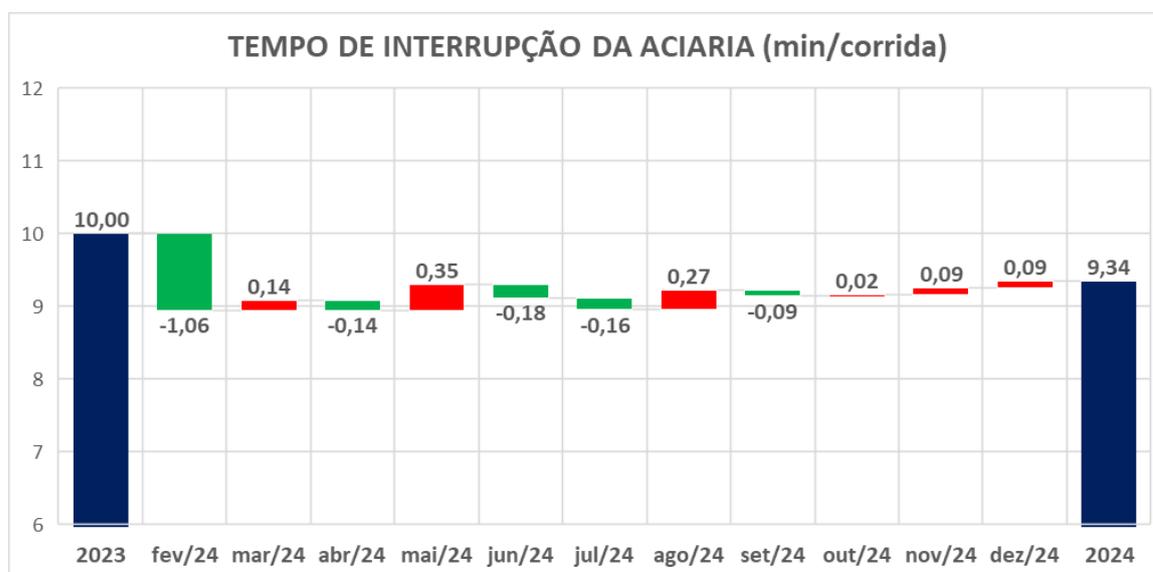
- Retirada de escória do distribuidor com foco na redução da perda metálica pela calha;
- Reclassificação de tarugos com composições químicas fora da faixa do aço sendo produzido;
- Retrabalho e reclassificação de tarugos com defeitos físicos menores como pequenos rechupes e empenamentos leves;
- Fechamento estratégico dos veios durante o final de lingotamento para reduzir o comprimento perdido por rechupe.

#### **4.2.4. Ações**

Após a melhoria no método de aferição das perdas metálicas, foi possível evidenciar uma redução considerável do indicador de controle. Essa redução se deve à melhor segregação dos materiais atuais do passivo acumulado na planta de beneficiamento de escórias. Além dessa redução devido às melhorias dos métodos de aferição, a melhor estabilização do processo da Aciaria também impacta positivamente na redução das perdas metálica. Entretanto, no decorrer do ano, a segregação dos materiais das Baias 2, 3 e 5 para processamento acabou se mostrando inviável por conta dos problemas logísticos que isso acarretaria. Dessa forma, decidiu-se que essas perdas seriam medidas através da Baia 2.

Outros trabalhos de estabilização do processo foram realizados em paralelo ao projeto de redução das perdas metálicas da Aciaria, ocasionando uma redução efetiva de 7% no tempo de interrupção do processo ao longo do ano de 2024 (Gráfico 8). Este aumento da estabilidade do processo é diretamente responsável pela redução da perda metálica em pontos como as perdas de metal sólido após o molde, uma vez que problemas como emendas, despontes e rechupes de fim de lingotamento podem ser ocasionados por interrupções do lingotamento. Uma outra consequência dessa estabilização é a redução do tempo de espera com as painéis, o que ameniza consideravelmente a perda térmica das painéis e do aço líquido, reduzindo a perda de aço líquido pela Baia 2.

Gráfico 8 – Redução do tempo de interrupção do processo da Aciaria em 2024.



Fonte: O Autor, 2025

Para facilitar a visualização das perdas térmicas das painéis, foi disponibilizada uma planilha que calcula a perda térmica do aço entre as medições de acordo com a Equação 3.

$$\text{Perda térmica } [^{\circ}\text{C}/\text{min}] = \Delta T / \Delta t \quad (3)$$

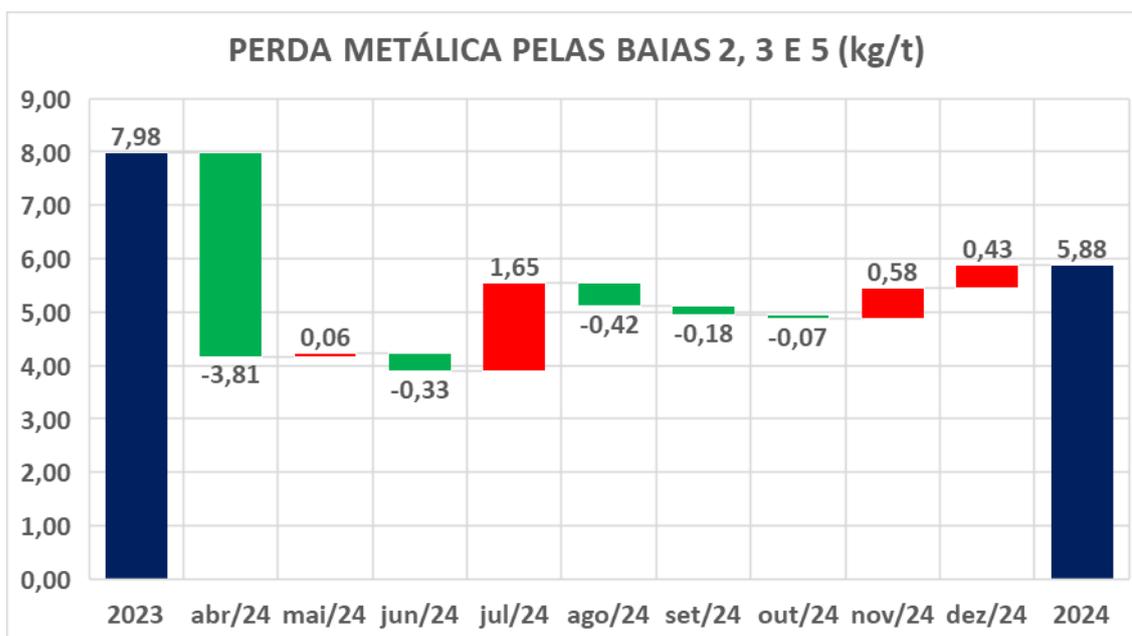
Onde  $\Delta T$  é a variação de temperatura entre as medições em  $^{\circ}\text{C}$  e  $\Delta t$  é o tempo entre as medições em minutos. Essa ferramenta foi útil na estabilização da temperatura de liberação do aço para lingotamento, o que ajudou a diminuir a quantidade de metal perdido por corridas frias ou quentes.

Já no LC, o reposicionamento dos sensores de posição dos tarugos ajudou a reduzir o empenamento da ponta dos tarugos durante as partidas do lingotamento, reduzindo assim o comprimento descartado sempre que a máquina de lingotamento contínuo inicia as suas operações. Também foram reforçadas práticas de reclassificação e retrabalho de peças que previamente seriam descartadas por não conformidades, como por exemplo reclassificações para aços diferentes dentro das mesmas faixas de composição, remoção da fração com rechupe no final do lingotamento e reclassificação para tarugos de menor comprimento para a laminação.

#### 4.2.5. Verificação dos resultados

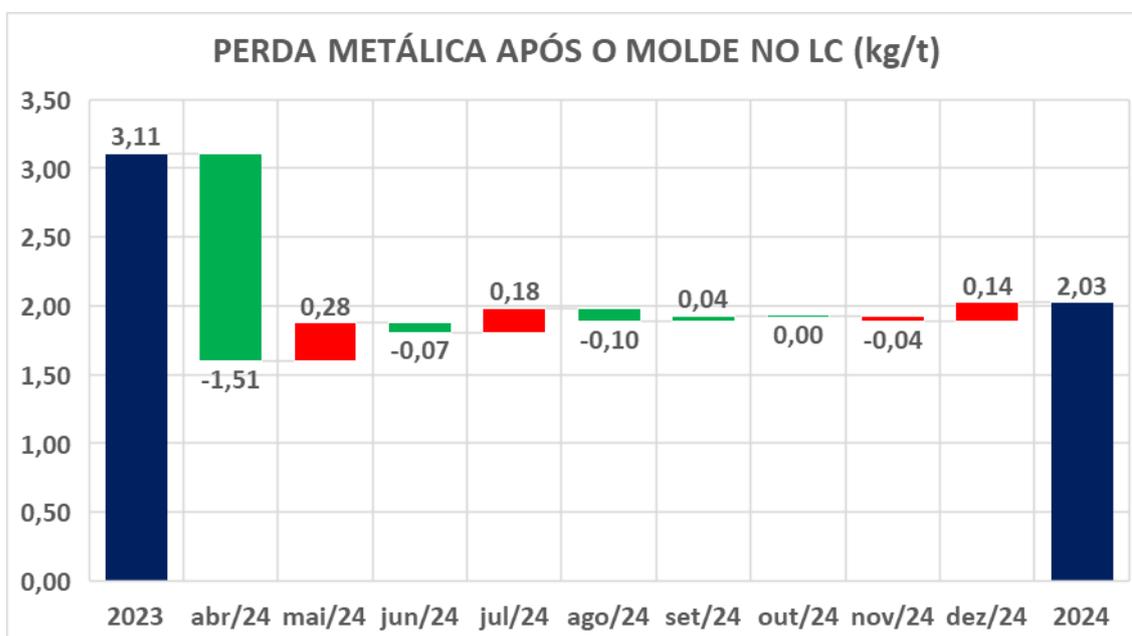
A evolução na perda metálica média para o ano de 2024 começaram a ser acompanhadas durante o mês de março, que apresentou uma redução considerável nos valores dos indicadores de controle para a Baias 2 e também para a massa de metal sólido perdido após o molde no LC, como demonstrado nos gráficos 9 e 10.

Gráfico 9 – Evolução das perdas metálicas pela Baia 2 em 2024



Fonte: O Autor, 2025

Gráfico 10 – Perdas após o molde no lingotamento em 2024



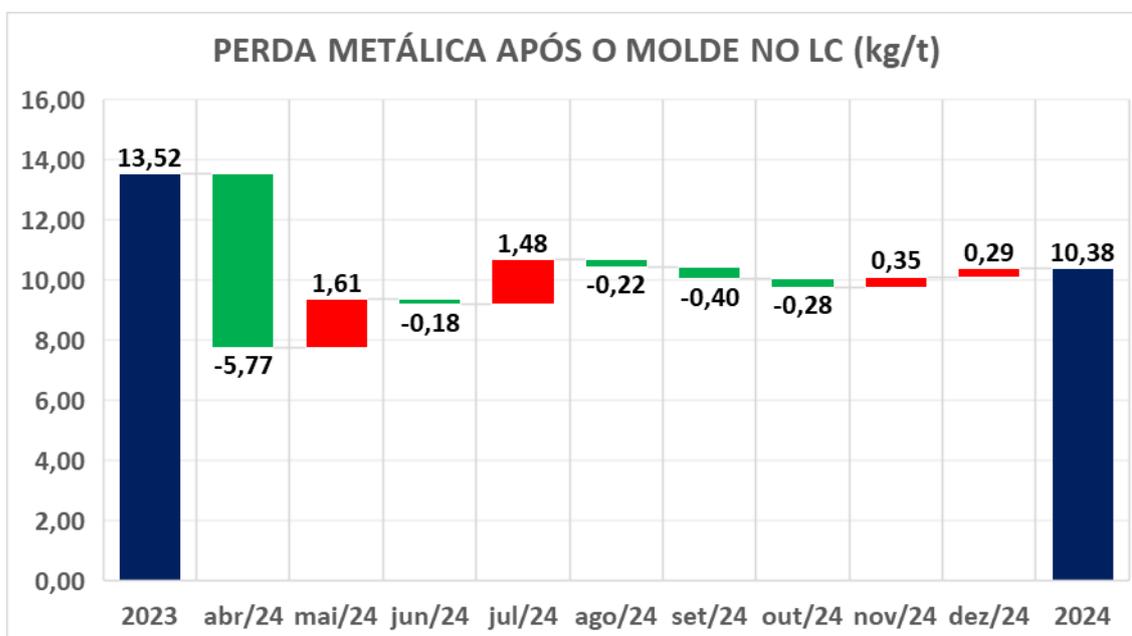
Fonte: O Autor, 2025

A redução nos valores de perda pelas baias de descarte de aço líquido se deve principalmente ao aprimoramento do método de aferição do indicador de controle, que passou a evitar contaminação dos dados e a considerar o %Fe presente na sucata recuperada utilizada para calcular a quantidade de metal perdido nessas baias. Já a redução nos valores de perdas de metal sólido no LC se deve principalmente às práticas de reclassificação e retrabalho de tarugos defeituosos.

Durante o mês de julho, houve um aumento considerável nos valores de perdas metálicas em ambos os pontos de descarte. Este aumento ocorreu por conta de alterações no processo durante um período de produção de um aço específico de difícil reclassificação e retrabalho, além de possuir faixas de especificações mais estreitas para temperatura e composição química, o que gerou um maior descarte de aço líquido.

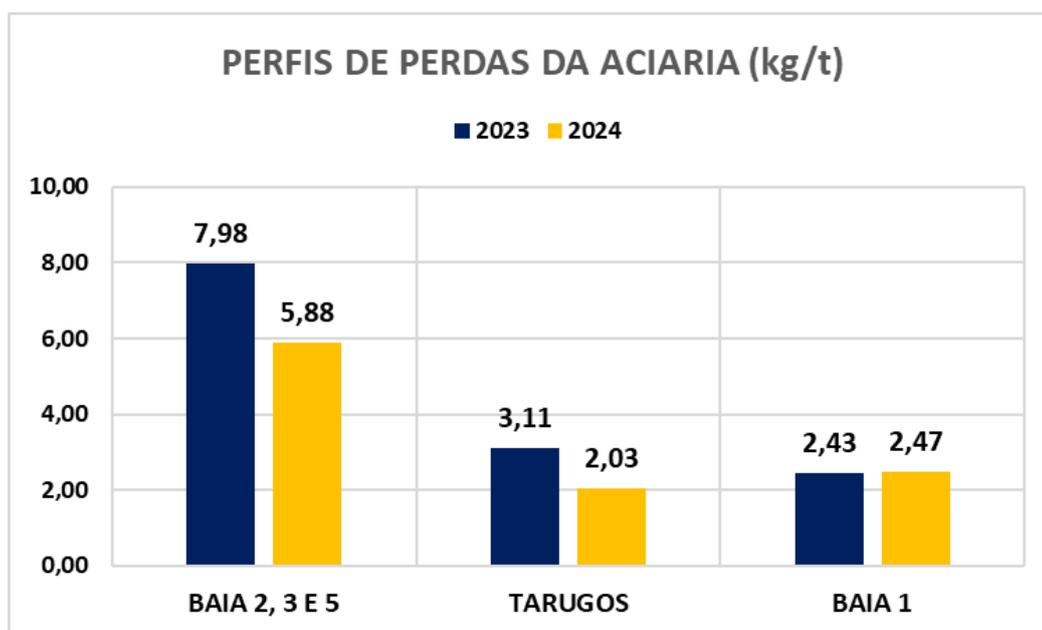
Ao fim do projeto, foi possível observar uma redução de 23% no valor da perda metálica média da Aciaria para o ano de 2024, como apresentado no Gráfico 11. Também foi gerado um novo perfil de perdas metálicas por ponto de descarte para a Aciaria em 2024 (Gráfico 11).

Gráfico 11 – Evolução das perdas metálicas da Aciaria durante o projeto



Fonte: O Autor, 2025

Gráfico 12 – Comparativo do perfil de perdas da Aciaria entre 2023 e 2024



Fonte: O Autor, 2025

#### 4.2.6. Padronização das atividades

Tendo em vista a importância de uma metodologia eficiente de aferição do indicador de controle para garantir uma boa gestão de perdas, as seguintes práticas operacionais foram reajustadas para contemplar essa necessidade:

- Segregação dos materiais passivos e atuais na área de armazenamento da planta de beneficiamento de escórias;
- Recebimento e classificação de sucatas recuperadas pela planta de beneficiamento de escórias;
- Aferição do %Fe das sucatas recuperadas pela planta de beneficiamento de escórias;
- Registro das perdas metálicas no LC durante o registro dos lotes no sistema.

Já para as práticas que diretamente impactam a quantidade de metal perdido, foram revisadas/reforçadas as seguintes atividades:

- Avaliação da perda térmica do aço durante a operação no Forno Panela;
- Controle de temperatura de liberação das corridas para o Lingotamento Contínuo;
- Reclassificação de tarugos desclassificados por composição química;

- Retrabalho de peças com deformidades menores.

#### **4.2.7. Conclusão da etapa**

A conclusão do projeto resultou em melhorias significativas, com uma redução de 26% nas perdas das Baias 2, 3 e 5 e de 35% nas perdas de tarugos sólidos. Considerando que as perdas na Baia 1 permaneceram estáveis, a redução consolidada foi de aproximadamente 23% nas perdas metálicas da Aciaria. No entanto, persistem oportunidades para otimizações futuras, como a otimização do esgotamento do FEA, a minimização das perdas na Baia 1 e o monitoramento do peso da panela, que podem diminuir ainda mais o índice de perda metálica da Aciaria.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da análise de projetos anteriores, foi possível estabelecer uma base de dados de longo prazo para monitoramento das perdas metálicas na Aciaria. Com isso, foram implementadas melhorias ao sistema de aferições pontuais em etapas específicas do processo como aferições mais precisas do %Fe das sucatas utilizadas para quantificar as perdas, relatórios de perdas após o molde no LC e, para facilitar a coleta, as perdas metálicas das baias 2, 3 e 5 passaram a ser mensuradas de forma conjunta.

Os resultados obtidos demonstram avanços significativos no controle e redução das perdas metálicas. Destacam-se a redução de 26% nas perdas por meio das baias 2, 3 e 5, a diminuição de 35% nas perdas de metal sólido após o molde. Por fim, a perda metálica média da Aciaria em 2024 apresentou queda de 23% em relação ao ano de 2023, superando em 4% a referência de base de 2010.

Esses resultados confirmam a efetividade das melhorias propostas, contribuindo não apenas para a elevação do rendimento da Aciaria, mas também para a construção de um método mais confiável de monitoramento, que poderá servir de referência para futuras análises e iniciativas de melhoria contínua.

## 6. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Realizar balanços de massas periódicos da Aciaria para melhor estudo do rendimento do processo;
- Realizar a pesagem dos materiais antes do processamento na planta de beneficiamento de escórias para gerar informações sobre as perdas durante as retiradas de escória no FEA e sobras nas panelas com mais eficiência;
- Atualizar padrões de esgotamento do FEA a fim de minimizar a perda metálica nessa atividade;
- Avaliar oportunidades de redução da perda metálica pela Baia 1;
- Realizar estudos das perdas por oxidação do ferro metálico no FEA;
- Criar um controle das perdas térmicas por corrida no FP;

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. Vol. 2. [S.l.]: Arte e Ciência, 1997.
- ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, T. C.; LIMA, G. H. **Ferramentas da qualidade aplicadas à análise de falhas: estudo de caso com a utilização dos 5 porquês e do diagrama de Ishikawa**. *Brazilian Journal of Development*, v. 9, n. 4, p. 22145-22160, 2023.
- ATOLL METAL RECOVERY. **Atoll Metal Recovery**. [S. l.], c2025. Disponível em: <https://atoll.co.za/#explore>. Acesso em: 8 abr. 2025.
- ATTRON ENGENHARIA E TECNOLOGIA. **Integração e otimização de projetos**. [S. l.], c2025. Disponível em: <http://atron.com.br/integracao-e-otimizacao-dos%20projetos/>. Acesso em: 27 fev. 2025.
- BASTOS JÚNIOR, L. C. S.. **Método de Análise e Solução de Problemas (MASP) apoiado no ciclo PDCA: um estudo bibliográfico**. *Revista Brasileira de Administração Científica*, v.7, n.1, p.6-13, 2016. DOI: <http://doi.org/10.6008/SPC2179-684X.2016.001.0001>
- BELVAL. **Duty Cycle Crane and Dragline**. [S. l.], c2025. Disponível em: <https://www.belval.es/en/machinery/duty-cycle-crane-and-dragline/>. Acesso em: 8 abr. 2025.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CAMPOS, V. F. **Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. 9. ed. Belo Horizonte: DG Editors, 2014.
- CARVALHO, C. V. D. de et al. Redução da perda metálica na aciaria da Gerdau Usina de Ouro Branco. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA, FUNDIÇÃO E METALURGIA DE NÃO-FERROSOS, 48., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2017. p. 390-401.
- COSTA, D. A.; ALMEIDA, F. R. **Implementação do 5W2H como ferramenta de apoio à gestão da qualidade: estudo de caso em uma indústria química**. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, v. 19, n. 3, p. 1123-1135, 2022.
- FELL, A. F. de A. **A perspectiva da gestão da qualidade total (GQT) como modo de controle organizacional**. *Caderno de Administração*, v. 28, n. 2, p. 98–116, jan. 2021. DOI: 10.4025/cadadm.v28i2.53645.
- FERNANDES, E. S. G.. et al. **MASP no controle de desperdício: um estudo de caso em uma gráfica**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 32. Anais. Bento Gonçalves, 2012.

FINE METAL. **What is Continuous Casting? Why is it Used?**. [S. I.], c2025. Disponível em: <https://finemetal.ro/what-is-continuous-casting-why-is-it-used/>. Acesso em: 8 abr. 2025.

FREITAS, F. V. M.. **Estudo sobre a aplicação da metodologia MASP em uma empresa transformadora de termoplásticos**. São Paulo: Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, 2009.

GCFGLOBAL. **Usando a matemática: A coroa do rei e a banheira de Arquimedes**. [S. I.], c2025. Disponível em: <https://edu.gcfglobal.org/pt/usando-a-matematica/a-coroa-do-rei-e-a-banheira-de-arquimedes/1/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

GHOSH, A.; CHATTERJEE, A. **Ironmaking and steelmaking: theory and practice**. 1. ed. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2008.

GOMES SAS. **Fabricant de lances thermiques leader en France**. [S. I.], c2025. Disponível em: <https://www.lance-thermique.com/fabricant-lances-thermiques/>. Acesso em: 8 abr. 2025.

HERMOGENES, L. R.; SANTOS, M. S.; WALKER, R. **Utilização do Diagrama de Ishikawa como ferramenta de análise da causa raiz do alto índice de perdas em uma indústria de plásticos no Rio de Janeiro**. *SPOLM*, v. 3, 2020.

HOLAPPA, L. Secondary Steelmaking. In: ELSEVIER. **Process Metallurgy**. Volume 3. Espoo, Finlândia: Department of Materials Science and Engineering, Aalto University, School of Chemical Technology, 2014. p. 301-345. DOI: 10.1016/B978-0-08-096988-6.00012-2.

INÁCIO, L. C. R. et al. **Ferramentas básicas da qualidade: folha de verificação, estratificação, fluxograma, diagrama de Ishikawa, diagrama de Pareto, matriz GUT e 5W2H**. *Revista Gestão e Secretariado (GeSec)*, v. 14, n. 10, p. 17413-17427, 2023.

KT-GRANT. **Produtos**. [S. I.], c2025. Disponível em: <https://kt-grant.com/products>. Acesso em: 8 abr. 2025.

LOUHENKILPI, S. Continuous Casting of Steel. In: **TREATISE ON PROCESS METALLURGY**, Volume 3. Espoo: Elsevier, 2014. p. 373-385.

MELLO, C. H. P. **Gestão da qualidade**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.

MOURÃO, M. B. (coord.). **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011.

PIECHNICKI, A. S.; KOVALESKI, J. L.; SOUZA, M. V.; PIECHNICKI, F.; BARAN, L. R.. **Utilização da metodologia de análise e solução de problemas na redução das**

**perdas de água: um estudo de caso na SANEPAR.** Revista de Engenharia e Tecnologia, v.3, n.2, 2011.

SILVA, A. P.; MORAIS, G. F.; SANTOS, R. B. **Utilização do diagrama de Pareto no gerenciamento de falhas em processos produtivos: um estudo de caso.** *Revista Espacios*, v. 43, n. 8, p. 112-123, 2022.

SILVA, V. R. da. **Siderurgia: uma visão geral.** São Paulo: Blucher, 2024. 576 p. ISBN 978-85-212-2325-2.

SOUSA, R. S.; LOOS, M. J. **Aplicação do Ciclo PDCA e Ferramentas da Qualidade na redução de custos e perdas em uma distribuidora de hortifruti.** *Journal of Perspectives in Management*, v. 4, n. 1, p. 68, 2020.

STAHLEISEN. **Steel manual.** 1. ed. Düsseldorf: Stahleisen, 2007.

VAZ, G. D. **Quantificação das perdas de ferro metálico em escórias de forno elétrico a arco.** 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

YUSHUN. **LF Series 1000KW 120 Ton Ladle Furnace In Steel Making.** [S. l.], c2025. Disponível em: <https://www.isunsteel.com/china-lf-series-1000kw-120-ton-ladle-furnace-in-steel-making-13701328.html>. Acesso em: 8 abr. 2025.