

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

PEDRO BARRETO BOTELHO

**ESTUDO SOBRE A INCIDÊNCIA DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E
INTERNALOS NO PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

DE TARUGOS

**SÃO PAULO - SP
2021**

PEDRO BARRETO BOTELHO

**ESTUDO SOBRE A INCIDÊNCIA DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E
INTERNAL NO PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO
DE TARUGOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro
Metalúrgico, do Departamento de
Engenharia Metalúrgica e de
Materiais, da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda
Mourão

**SÃO PAULO - SP
2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Botelho, Pedro Barreto

ESTUDO SOBRE A INCIDÊNCIA DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E
INTERNALOS NO PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE
TARUGOS / P. B. Botelho -- São Paulo, 2021.

50 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Lingotamento Contínuo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

RESUMO

O processo de lingotamento contínuo de tarugos é considerado um processo de extrema complexidade e que possui forte dependência de uma série de variáveis. Por esse motivo, são conduzidos diversos estudos que possuem o objetivo de avaliar a influência de cada parâmetro de processo na qualidade do aço lingotado, bem como na sua produtividade.

A compreensão do processo de transferência de calor e de solidificação do aço é a chave para prevenir a incidência de defeitos de qualidade no produto semi-acabado, sejam superficiais, internos ou até mesmo de forma. Neste trabalho foram levantados dados referentes a perdas metálicas por sucateamento de tarugos em uma usina siderúrgica semi-integrada. O principal produto dessa Aciaria é o tarugo de aço baixo carbono SAE 1020 com seção quadrada de 160 mm de lado, destinado a aplicações na indústria de construção civil e que apresenta, portanto, certas exigências em relação aos requisitos de qualidade que são estabelecidos pelos seus clientes.

Através do levantamento dos dados foi colocado em prática um projeto baseado na metodologia MASP em conjunto com o ciclo PDCA, visando a implementação de ações corretivas para reduzir o volume de produto sucateado em decorrência desses defeitos e aumentar a eficiência da produção. Com a análise dos dados também foi possível entender quais tipos de defeitos apresentam maior incidência.

Palavras-chave: Lingotamento Contínuo. Formação de Trincas. Transferência de Calor.

ABSTRACT

The continuous casting of steels is an extremely complex process that strongly depends on a series of variables. For this reason, several studies have been conducted with the aim of evaluating the influence of each process parameter on the quality of the cast steel, as well as on its productivity.

Understanding the process of heat transfer and solidification of steels is the key to preventing the incidence of quality defects in the semi-finished product, whether superficial, internal, or even in shape. In this work, data about metallic losses due to billet scrapping in a semi-integrated steel mill were collected. The main product of this steel mill is the SAE 1020 low carbon steel billet with a square section of 160 mm side that is intended for applications in the civil construction industry, with specific requirements established by its customers.

Through data collection, a project based on the MASP methodology was put into practice in conjunction with the PDCA cycle, aiming to implement corrective actions to reduce the volume of scrapped product as a result of these defects and increase production efficiency. With the data analysis, it was also possible to understand the types of defects of highest incidence.

Keywords: Continuous Casting. Crack Formation. Heat Transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação esquemática do processo de Lingotamento Contínuo (SANTOS, 2005).....	5
Figura 3.2 – Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga de ferro-carbono com composição hipoeutetóide C ₀ (contendo menos do que 0,76% C) (CALLISTER, 2008).....	7
Figura 3.3 – Micrografia de um aço com 0,38% C e que apresenta uma microestrutura composta por perlita e ferrita proeutetóide, com uma ampliação de 635x (CHIAVERINI, 2008).....	8
Figura 3.4 – Influência do teor de carbono sobre propriedades mecânicas do aço resfriado lentamente (CHIAVERINI, 2008).....	11
Figura 3.5 – Desenho esquemático dos componentes do molde (SAMARASEKERA, 1982)	13
Figura 3.6 – Mecanismos de transferência de calor no molde (GARCIA, 2001)	14
Figura 3.7 – Perfis de temperatura registrados a partir da utilização de termopares acoplados ao molde (KARLINSKI, 2009)	15
Figura 3.8 – Esquema do processo de Lingotamento Contínuo (LOTOV, 2005)	16
Figura 3.9– Comportamento do fluxo de calor no molde a partir do menisco. (STEELUNIVERSITY, 2007)	19

Figura 3.10 – Comportamento do fluxo de calor calculado para molde com diferentes conicidades (CHANDRA, 1993).....	20
Figura 3.11 – Disposição dos termopares no molde de seção quadrada 120 x 120 mm para controle de temperatura (CHOW, 1998b).....	21
Figura 3.12 – Perfil de fluxo térmico para duas velocidades de lingotamento distintas (CHOW, 1998b)	22
Figura 3.13 – Esquema das principais funções do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo (BRANION, 1986)	23
Figura 3.14 – Relação entre o fluxo de calor e a viscosidade do pó fluxante (WOLF, 1980).....	24
Figura 3.15 – Efeito da velocidade da água de refrigeração no perfil do fluxo de calor do molde (PINHEIRO, 2000)	25
Figura 3.16 – Secção do diagrama de fase Fe-C com destaque da região de transformação peritética.....	27
Figura 4.1 – Ciclo PDCA (JUNIOR, 2017).....	32
Figura 5.1 – Valor mensal de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em quilogramas por toneladas	35
Figura 5.2 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente a janeiro de 2021	40
Figura 5.3 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente a fevereiro de 2021	40

Figura 5.4 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente a março de 2021	41
Figura 5.5 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente ao ano de 2020	41
Figura 5.6 – Diagrama de Ishikawa ou diagrama causa e efeito das perdas metálicas por sucateamento de tarugos.....	43
Figura 5.7 – Curva do indicador de sucateamento entre janeiro de 2020 e julho de 2021.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas de aços resfriados lentamente, em função do teor de carbono (CHIAVERINI, 2008)	10
Tabela 4.1 – Composição química do aço SAE 1020, em massa.....	29
Tabela 4.2 – Propriedades físicas e mecânicas do aço SAE 1020	29
Tabela 4.3 – Parâmetros da máquina de lingotamento contínuo utilizada	29
Tabela 4.4 – Método de Análise e Solução de Problemas (MASP) (CAMPOS, 1992)	33
Tabela 5.1 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em janeiro de 2021	37
Tabela 5.2 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em fevereiro de 2021	37
Tabela 5.3 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em março de 2021	38
Tabela 5.4 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos no ano de 2020	38
Tabela 5.5 – Plano de Ação 5W1H elaborado para eliminar as causas identificadas	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LC - Lingotamento Contínuo

FEA - Forno Elétrico a Arco

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute

SAE - Society of Automotive Engineers

SI - Sistema Internacional

NBR - Designação de Norma da ABNT

ISO - International Organization for Standardization

ASTM - American Society for Testing and Materials

MASP - Método de Análise e Solução de Problemas

GSP - Grupo de Solução de Problemas

SUMÁRIO

RESUMO.....	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	IX
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Visão Geral do Processo de Lingotamento Contínuo	3
3.1.1. Histórico do Processo.....	4
3.1.1. Síntese do Processo.....	5
3.2. Aço-Carbono	5
3.2.1. Definição e Transformações de Fase	5
3.2.2. Propriedades dos Constituintes dos Aços e sua Influência Sobre as Características Mecânicas	9
3.2.3. Efeito das Impurezas nos Aços	11
3.3. Extração de Calor no Processo de Lingotamento Contínuo	12
3.3.1. Molde ou Resfriamento Primário	13
3.3.2. Região de Sprays ou Resfriamento Secundário	16
3.3.3. Região de Radiação Livre ou Resfriamento Terciário	17
3.4. Principais Parâmetros de Processo Ligados à Formação de Defeitos.	17
3.4.1. Conicidade do Molde	18
3.4.2. Velocidade de Lingotamento	20
3.4.3. Pó Fluxante	22
3.4.4. Vazão da Água de Refrigeração.....	25
3.4.5. Composição Química	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1. Máquina de Lingotamento Contínuo e Produto.....	29
4.2. Metodologia MASP	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. Etapa de Identificação do Problema	34
5.2. Etapa de Observação	37
5.3. Etapa de Análise	42
5.4. Etapa de Plano de Ação	44
6. CONCLUSÕES	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

Segundo a “The World Steel Association”, a produção global anual de aço situa-se hoje em torno de 1,85 bilhões de toneladas, das quais 85% a 90% são produzidas utilizando o processo de lingotamento contínuo, ao passo que ao restante é aplicado o lingotamento convencional. Apesar do processo de lingotamento contínuo também ser fortemente aplicado nas indústrias do alumínio e do cobre, esse trabalho tem como objeto de estudo a sua aplicação especificamente em uma usina semi-integrada que utiliza sucata ferrosa para produção de aço. Nessa usina, o processo metalúrgico é realizado através do forno elétrico a arco (FEA), do forno panela e do lingotamento contínuo.

O principal aço fabricado nessa Aciaria em questão é o aço baixo carbono SAE 1020. Esse aço é destinado a aplicações na indústria de construção civil e, portanto, apresenta certas de exigências em relação aos requisitos de qualidade que são estabelecidos pelos seus clientes. Para garantir que o produto final esteja de acordo com esses requisitos existe um controle de qualidade que avalia o surgimento de quaisquer tipos de defeitos, sejam internos ou sejam superficiais. A presença ou isenção desses defeitos irá caracterizar a qualidade do produto laminado proveniente dos tarugos produzidos no processo de lingotamento contínuo (XUAN, 2018).

O controle de qualidade tem como função realizar a inspeção do tarugo para avaliar a possibilidade de remoção dos defeitos ou o sucateamento do produto final quando os defeitos não podem ser removidos, como por exemplo os defeitos de trincas. Essa impossibilidade de remoção, por sua vez, pode estar associada a fatores como por exemplo a profundidade acima da tolerância admitida pelo cliente e/ou a presença de uma quantidade elevada de trincas.

2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO

O objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto do sucateamento de tarugos do aço baixo-carbono SAE 1020 na produtividade de uma máquina de lingotamento contínuo em uma usina siderúrgica semi-integrada. Nos últimos meses, nessa usina se observou um aumento de 130% no volume de tarugos sucateados devido a problemas de qualidade superficial e interna. A partir de uma metodologia de solução de problemas, procurou-se identificar e entender as causas fundamentais que influenciam na formação dessas não-conformidades para possibilitar a implementação de ações corretivas que otimizem o processo e diminuam suas perdas. Como parte dessa estratégia, nesse trabalho pretende-se estudar as principais variáveis de processo que afetam a transferência de calor no molde e sua influência na geração de defeitos superficiais e internos no tarugo. Finalmente será proposto um conjunto de ações para contribuir com a diminuição da incidência desses defeitos e, consequentemente, aumentar a produtividade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Visão Geral do Processo de Lingotamento Contínuo

3.1.1 Histórico do Processo

Por muito tempo o processo de lingotamento convencional foi considerado comercialmente um dos processos mais comuns para a obtenção de aço sólido a partir do metal líquido. Esse processo se dá a partir do vazamento do metal líquido em moldes metálicos (lingoteiras de ferro-fundido), mas passou ao longo do tempo por diversas melhorias quanto à sua tecnologia e ao próprio rendimento. Nesse tipo de lingotamento ocorre o vazamento independente em cada lingoteira, que em seguida deve ser resfriada para possibilitar a desmoldagem dos lingotes e o posterior reaquecimento para continuação das etapas de conformação.

No século XIX, George Sellers, J. Laing e H. Bessemer foram grandes nomes do desenvolvimento de um caráter contínuo para o processo de lingotamento voltado a metais não-ferrosos e de baixo ponto de fusão. Esse desenvolvimento visava também uma maior eficiência nos processos de solidificação de aços. Já em 1887, o alemão R. M. Daelen elaborou uma tecnologia que demonstrava diversas similaridades com os maquinários de lingotamento contínuo atuais, dentre elas: um sistema de molde resfriado com água, sistema de resfriamento secundário, rolos extratores, barra falsa e artefato para corte do lingote. Em 1933 S. Junghans tornou-se outro grande nome ao desenvolver e patentar um processo de oscilação do molde, prevenindo o agarramento da casca solidificada na parede do molde, o que permitiu uma ampliação em grande escala do processo de lingotamento contínuo (LC) de aços (RIZZO, 2006).

No início de 1960 ainda existiam menos de 30 instalações de LC no mundo, sendo a maioria de um único veio, capazes de processar panelas de 10 a 20 toneladas de aço em tarugos de seção transversal relativamente pequena. A partir de 1963 o processo sofreu um grande impulso com a introdução de

máquinas curvas e moldes curvos, permitindo uma menor altura total da instalação, maior facilidade de construção, redução da pressão metalostática do metal líquido e o prolongamento da zona de resfriamento secundário. Dessa forma, em 1970 já havia 438 equipamentos em funcionamento no mundo todo, chegando a 986 equipamentos em 1980. Segundo a “The World Steel Association”, atualmente esse processo é responsável por aproximadamente 85% a 90% da produção mundial de aço semiacabado (RIZZO, 2006).

3.1.2 Síntese do Processo

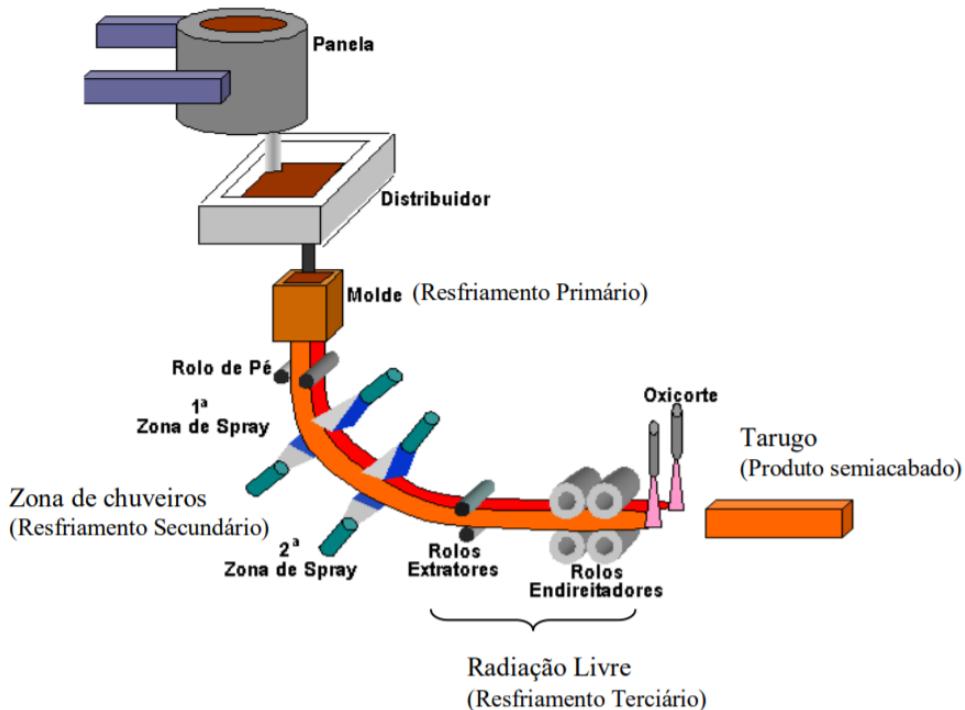
O processo de lingotamento contínuo é baseado a princípio em um processo de transferência de calor no qual o produto semiacabado, que pode assumir formatos de tarugo, bloco, beam blank ou placa, é obtido pela solidificação do metal líquido vazado da panela. O processo de resfriamento desse aço vazado pode ser subdividido em três etapas em série: resfriamento primário pelo contato com o molde refrigerado a água, resfriamento secundário pelo sistema de sprays de água e resfriamento terciário pela radiação livre.

O início do processo de lingotamento contínuo se dá a partir da abertura da válvula gaveta da panela de aço proveniente dos processos antecessores e o início do seu vazamento no distribuidor, cuja função como o nome sugere é de distribuir o jato de aço da panela entre cada um dos veios em funcionamento. Quando o aço líquido finalmente entra em contato com o molde metálico resfriado por uma camisa de água, há início do processo de solidificação e com isso a formação de uma casca sólida na interface entre o aço líquido e o molde. Essa casca sólida deve ser espessa a ponto de suportar a pressão metalostática interna do aço líquido logo após a saída do molde, caso contrário ocorrerá uma perfuração da camada sólida e consequentemente a paralização do processo.

Na próxima etapa do processo, chamada de resfriamento secundário, o aço percorre uma série de regiões de resfriamento que utilizam um mecanismo de sprays com água ou mistura de ar com água para realizar a retirada de calor do material e contribuir com o avanço da solidificação. A condução do lingote é feita utilizando rolos de suporte, sendo alguns destes também extratores de calor. Por fim, com a solidificação do material já finalizada, é feito o corte

automatizado da peça utilizando-se um sistema de maçaricos, na metragem pré-estabelecida. Na Figura 3.1 é possível observar uma ilustração da síntese do processo.

Figura 3.1 - Representação esquemática do processo de Lingotamento Contínuo.



Fonte: Adaptado de SANTOS, 2005.

3.2 Aço-Carbono

3.2.1 Definição e Transformações de Fase

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias. De fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Dessa forma, se faz necessária à coleta de amostras do material

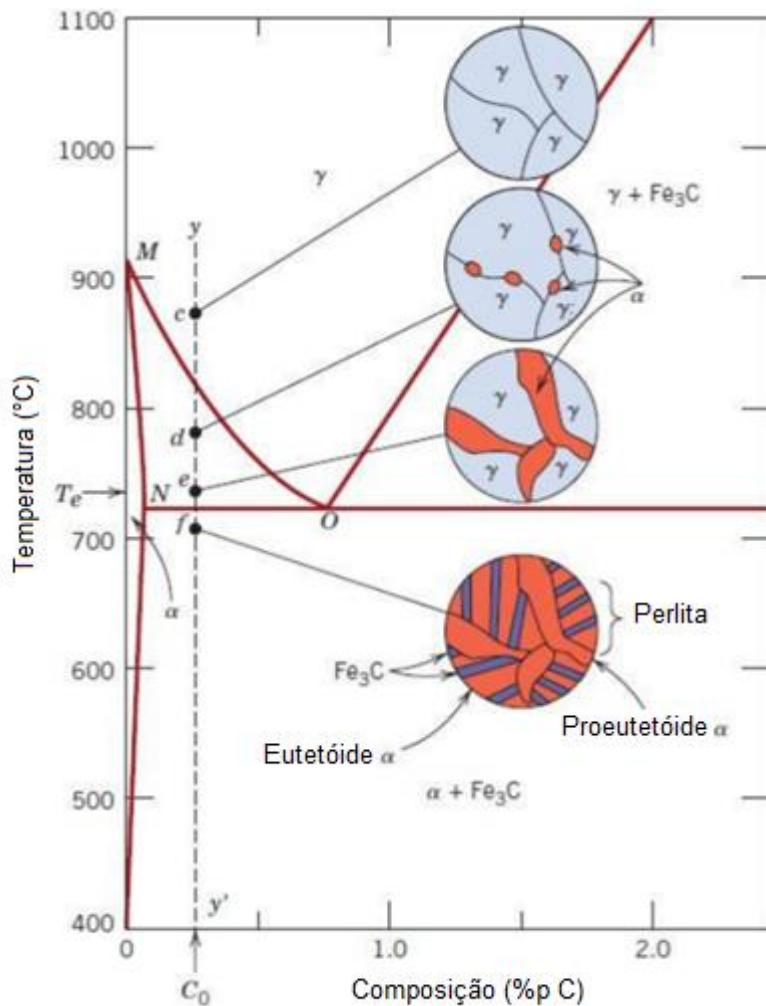
para garantir que esses elementos secundários estejam dentro das faixas previstas para os mesmos (CHIAVERINI, 2008).

“Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação” (CHIAVERINI, 2008). Ainda é possível, todavia, subdividir esse conceito do autor em três principais grupos: aços-carbono de baixo, médio e alto teor de carbono. Aços baixo carbono nada mais são que ligas ferro-carbono contendo até 0,2% C. Aços baixo carbono também são chamados de hipoeutetóides por apresentarem composição química abaixo do ponto eutetóide (CHIAVERINI, 2008).

No Brasil existem dois sistemas adotados pela ABNT e que são muito utilizados para considerar a composição química de aços, que são os da “Society of Automotive Engineers (SAE)” e da “American Iron and Steel Institute (AISI)”. Esse sistema de classificação SAE/AISI/ABNT utiliza um formato ABXX que permite saber se o aço é de baixo, médio ou alto teor de carbono apenas olhando para seus dois últimos dígitos, ao passo que os dois primeiros dígitos identificam os elementos de liga existentes nesse aço. Com isso é possível saber que o aço SAE 1020 por exemplo se trata de um aço-carbono simples com 0,20% de teor de carbono em média.

A principal ferramenta para entender o comportamento da liga binária ferro-carbono é o diagrama de fases, normalmente representado de 0 até 6,7% carbono. Para uma liga hipoeutetóide, todavia, é possível utilizar o diagrama de fases reduzido até a faixa de 2% carbono, como é possível verificar na Figura 3.2. Nela, estão esquematizadas as transformações que ocorrem ao longo da solidificação dessa liga e as respectivas microestruturas da ferrita (ferro α), que apresenta estrutura cristalina CCC; da perlita, que consiste em camadas alternadas; e da austenita (ferro γ), que possui estrutura cristalina CFC, como consequência de uma transformação polimórfica sofrida pela ferrita.

Figura 3.2 - Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga de ferro-carbono com composição hipoeutetóide C_0 (contendo menos do que 0,76% C).



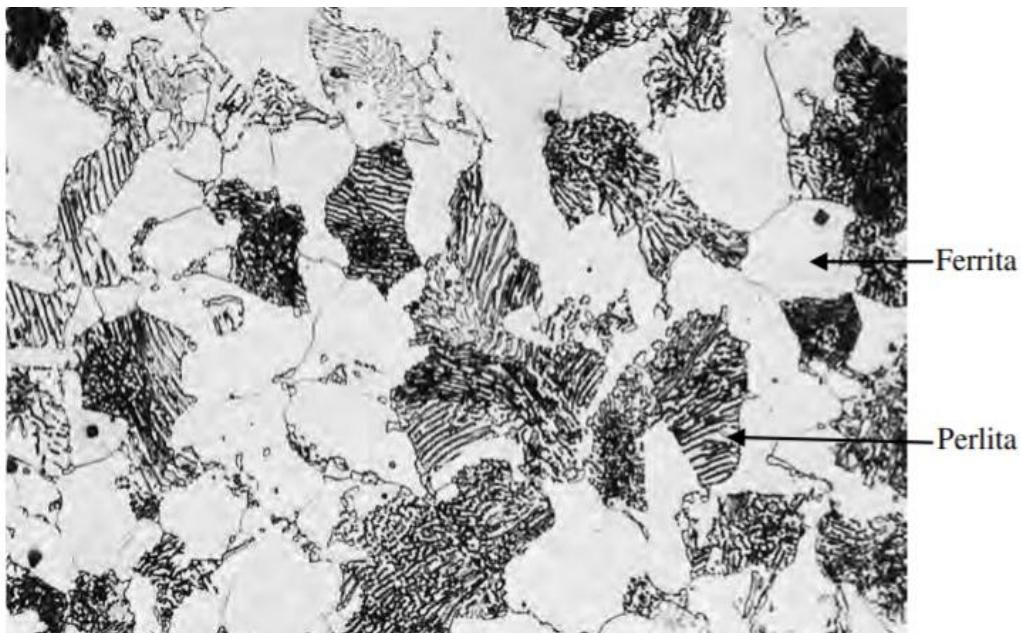
Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2008.

É possível observar que a cerca de 875°C, no ponto C da liga de composição hipoeutetóide C_0 , a microestrutura é constituída somente por grãos da fase γ (austenita). Ao se resfriar até o ponto d, por volta de 775°C, ocorre a formação de pequenas partículas da fase α (ferrita) ao longo dos contornos dos grãos originais da austenita. O resfriamento a partir do ponto d até o ponto e, ainda acima da temperatura eutetóide, irá fazer com que a composição da fase α (ferrita) se torne ligeiramente mais rica em carbono consequentemente o aumento da sua fração. Já no ponto f, abaixo da temperatura eutetóide (723°C), toda a fase γ (austenita) que estava presente é convertida em perlita, em quanto a fase α (ferrita) se mantém inalterada, sendo essa considerada como uma fase matriz que circunda as colônias isoladas de perlita. Portanto, a ferrita estará

presente tanto na fase formada durante o resfriamento acima da temperatura eutetóide (chamada de ferrita proeutetóide), quanto no interior da perlita (ferrita eutetóide).

Essa é, por fim, a composição microestrutural final de um aço médio carbono (possui entre 0,30% e 0,60% de carbono). Um aço com médio teor de carbono apresentará mais ferrita e menos perlita, resultando, como consequência, em uma maior dureza e menor ductilidade do que o aço baixo carbono. O aspecto da perlita e da ferrita podem ser visualizados na Figura 3.3, que é a micrografia real de um aço médio carbono contendo 0,38% C e ampliada em 635x, onde as regiões claras e maiores correspondem a ferrita α , enquanto as regiões alternadas e escuras representam a perlita.

Figura 3.3 – Micrografia de um aço com 0,38% C e que apresenta uma microestrutura composta por perlita e ferrita proeutetóide, com uma ampliação de 635x.



Fonte: Adaptado de CHIAVERINI, 2008.

3.2.2 Propriedades dos Constituintes dos Aços e sua Influência Sobre as Características Mecânicas

As propriedades mecânicas dos aços-carbono são decorrentes, a princípio, da sua composição química e da sua microestrutura. Os constituintes básicos da microestrutura do aço são a ferrita, perlita e cementita, cujas principais características são:

- Ferrita: é formado por uma solução sólida de inserção do carbono em ferro no estado alotrópico alfa, apresentando baixa dureza e baixa resistência à tração (aproximadamente 280 N/mm²) mas excelente resistência ao choque e elevado alongamento (ductilidade), além de possuir uma estrutura de grãos equiaxiais que pode ser observada no microscópio com um ataque de ácido nítrico diluído. Sua máxima solubilidade é de 0,008%;
- Cementita: é o carbeto de ferro (Fe_3C) contendo 6,67% de carbono e 93,33% de ferro, sendo muito dura (650 HV) e, portanto, responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela menor ductilidade. É termodinamicamente instável a temperaturas inferiores a 1200°C;
- Perlita: é a mistura mecânica de 88% de ferrita com 12% de cementita na forma de lamelas finas com disposição alternada e de espessura menor que um micrometro. As propriedades mecânicas da perlita dependem do tamanho das partículas de cementita, sendo mais dura e resistente a tração que a ferrita e mais dúctil que a cementita. Sua resistência à tração é em média 75 kgf/mm². A proporção de perlita cresce de 0% para ferro puro até 100% para o aço eutetóide (CHIAVERINI, 2008).

Para um aço hipoeutetóide resfriado lentamente ocorre a formação de uma certa quantidade de ferrita até que a austenita restante se transforme em perlita. Dessa forma, a estrutura final contém uma certa proporção de ferrita e perlita, que pode ser prevista. Já para um resfriamento rápido e que atinja temperaturas mais baixas antes que a nucleação da ferrita proeutetóide ocorra,

a perlita poderá se transformar até com teores de 0,4% de carbono (CHIAVERINI, 2008).

Devido às diferenças entre as propriedades mecânicas de cada um dos constituintes vistos acima, as características mecânicas do aço variam de acordo com a sua proporção. Dessa forma, à medida em que o teor de carbono cresce, os valores da resistência mecânica, isto é, o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e a dureza também aumentam. Por outro lado, os valores relativos à ductilidade, como alongamento, estrição e resistência ao choque sofrem uma diminuição. Na Tabela 3.1 é possível verificar algumas características mecânicas dos aços conforme o seu teor de carbono.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas de aços resfriados lentamente, em função do teor de carbono.

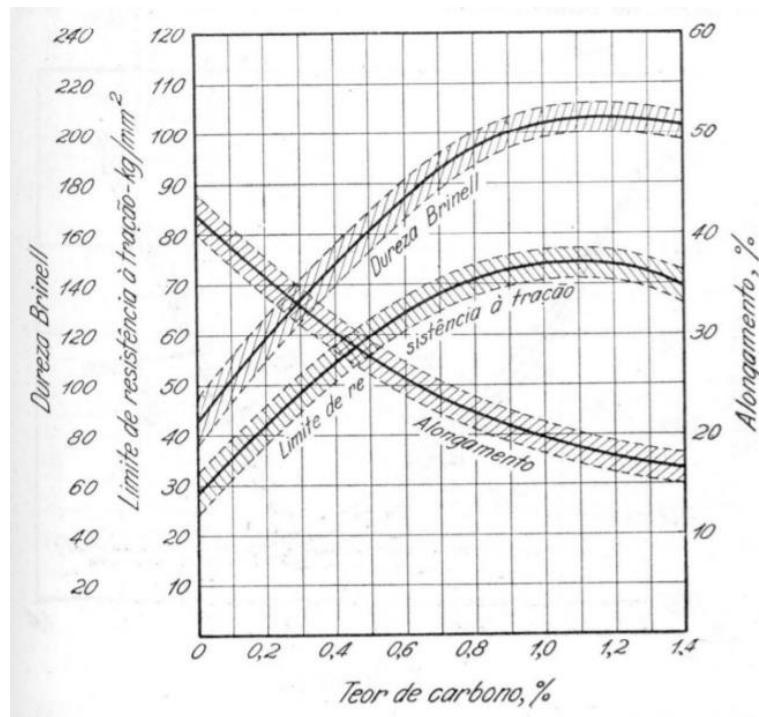
Carbono %	Límite de escoamento, kg/mm ²	Límite de resistência à tração, kg/mm ²	Alongamento %	Estricção %	Dureza Brinell
0,01	12,5	29,0	47	71	90
0,20	25,0	41,5	37	64	115
0,40	31,0	52,5	30	48	145
0,60	34,5	67,0	23	33	190
0,80	36,5	80,5	15	22	220
1,00	36,5	75,5	22	26	195
1,20	36,0	71,5	24	39	200
1,40	35,0	69,5	19	25	215

Fonte: CHIAVERINI, 2008.

Na Figura 3.4 a seguir é possível observar que a curva relativa aos limites de resistência à tração atinge seus maiores valores logo acima da composição eutetóide. Esse fenômeno ocorre devido ao fato da estrutura perlítica ser a estrutura mais resistente que pode ser formada durante o resfriamento lento. Além disso, é de se esperar que em aços hipereutetóides haja um aumento da resistência à tração devido ao envolvimento dos grãos de perlita com cementita de grande dureza. Entretanto, como também é possível observar na curva, esse

aumento não é muito sensível, visto que a própria alta dureza da cementita pode, após certa quantidade, trazer fragilidade e desfavorecer a resistência mecânica do aço.

Figura 3.4 – Influência do teor de carbono sobre propriedades mecânicas do aço resfriado lentamente.



Fonte: CHIAVERINI, 2008.

3.2.3 Efeito das Impurezas nos Aços

Apesar dos principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, os aços contêm sempre outros elementos secundários em pequenos teores, como o fósforo, enxofre, manganês e silício. Essas impurezas podem se combinar com o ferro, carbono ou até mesmo entre si, apresentando-se como inclusões ou soluções sólidas.

Enxofre: É uma impureza facilmente detectada no microscópio devido à formação de inclusões de sulfeto, visíveis sem a necessidade de ataque químico na amostra. A combinação do manganês com o enxofre forma o sulfeto de manganês, que não é nocivo devido à sua propriedade relativamente plástica,

deformando-se no sentido que o material é trabalhado. Já quando combinado com ferro é formado o sulfeto de ferro, que causa fragilidade em temperaturas superiores a 988°C, afetando propriedades de resistência à tração, a ductilidade e a tenacidade. Para aços com teor de carbono abaixo de 0,1%, todavia, seus efeitos deletérios acabam sendo menos nocivos.

Fósforo: Pode ser considerado um dos elementos mais nocivos para os aços quando o seu teor ultrapassa certos limites, causando fragilidade no material a temperatura ambiente. Essa impureza é localizada na ferrita formando uma solução sólida imperceptível ao microscópio, mas possível de ser detectada de forma indireta devido a presença de faixas longitudinais formadas de ferrita e com perlita agrupada nas bordas (ghost lines). O seu teor máximo pode variar conforme a aplicação do material, sendo ele menor em aplicações que necessitam de tenacidade a frio. Além disso, existe um valor crítico da relação Mn/S que deve ser respeitado, abaixo do qual é possível que o aço apresente uma alta suscetibilidade a trincas durante a sua solidificação (KARLINSKI, 2009).

Apesar de existirem outros elementos que também podem ser nocivos ao aço, como o manganês e silício, os mesmos não afetam tanto as propriedades dos aços como o fósforo e o enxofre. Eles se dissolvem na ferrita, fazendo que tanto a dureza quanto a resistência mecânica sofram um ligeiro aumento.

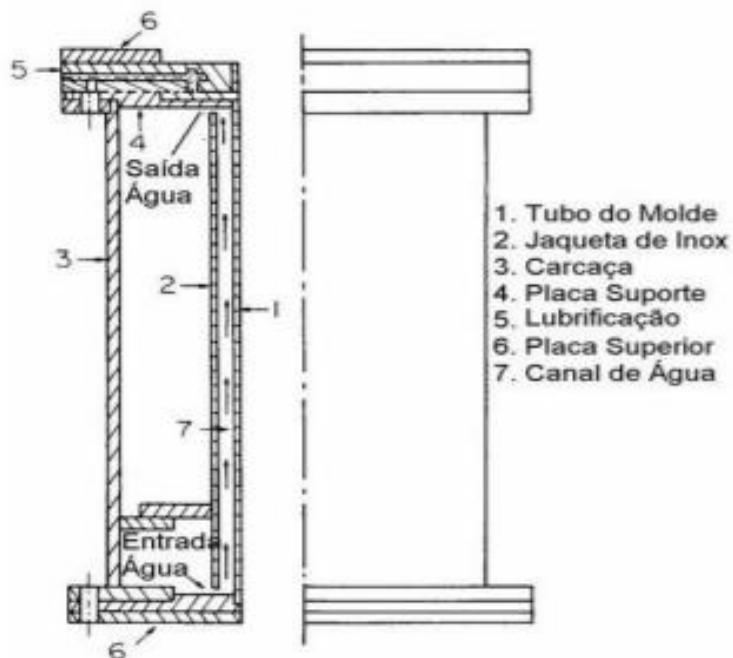
3.3 Extração de Calor no Processo de Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo é baseado a princípio em um processo de transferência de calor no qual o produto semi-acabado de determinada forma geométrica é obtido pela solidificação contínua do aço líquido vazado da panela. O processo de resfriamento e solidificação desse aço vazado pode ser subdividido em três etapas em série e bem distintas: inicialmente o aço é resfriado pelo contato com o molde de cobre refrigerado a água, sendo este chamado de resfriamento primário; em seguida ocorre o resfriamento a partir de um sistema de sprays de água borrifada sobre a superfície do lingote, chamado de resfriamento secundário; na última etapa o resfriamento ocorre diretamente pelo ar e meio-ambiente na região de radiação livre, também chamado de resfriamento terciário.

3.3.1 Molde ou Resfriamento Primário

O molde, que se encontra acoplado a um sistema de vibração, cumpre o papel de receber o aço líquido proveniente do distribuidor. O resfriamento primário tem início a partir do momento que o aço líquido entra em contato com as paredes de cobre do molde, que estão envoltas por uma camisa de água que atua como um sistema de refrigeração, removendo o calor das paredes do molde. Ao passo que o resfriamento progride, a espessura da camada solidificada do aço aumenta até atingir uma resistência mecânica alta o suficiente para suportar a pressão metalostática do aço líquido no interior do lingote. Além disso, durante a solidificação ocorre a contração do aço e com isso o afastamento entre a pele em solidificação e o molde de cobre, formando um vazio denominado de “air gap” ou apenas de “gap”. A resistência associada à este “gap” está diretamente ligada à penetração do pó fluxante nesta região. Na Figura 3.5 a seguir é possível observar esquematicamente os componentes do molde.

Figura 3.5 – Desenho esquemático dos componentes do molde.



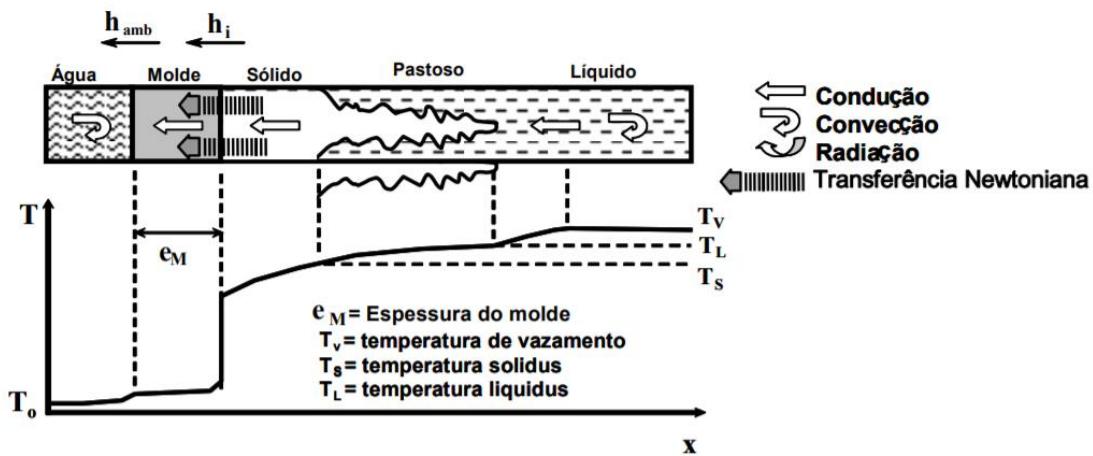
Fonte: Adaptado de SAMARASEKERA, 1982

Existem três formas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. O fenômeno de extração de calor no molde é complexo, podendo ser observados diversos fenômenos simultaneamente, dentre eles (GARCIA, 2001):

- Condução e convecção de calor no aço líquido;
- Condução de calor através da casca do aço solidificado;
- Convecção, radiação e condução de calor no “gap” formado pela contração do metal;
- Condução de calor na parede do molde;
- Convecção de calor na água de refrigeração.

Na Figura 3.6 a seguir é possível observar esquematicamente todos os fenômenos listados acima, bem como os perfis de temperatura para cada um desses fenômenos.

Figura 3.6 – Mecanismos de transferência de calor no molde.

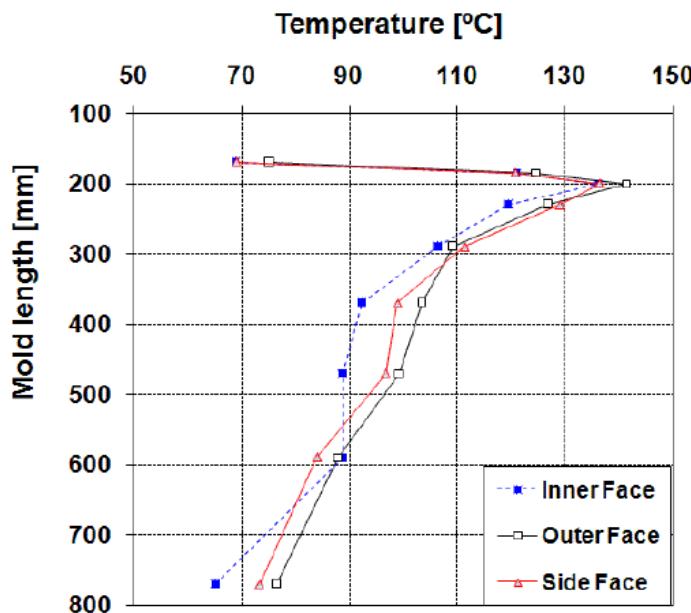


Fonte: GARCIA, 2001

O aço sólido não é um bom condutor de calor, ou seja, ao passo que a espessura da casca solidificada aumenta, maior é a dificuldade para a troca de calor. Existe uma maior transmissão de calor pela parte superior do aço líquido do que pela casca solidificada e, por esse motivo, a zona de temperatura mais alta do molde ocorre na região logo abaixo do menisco. Esse fenômeno fica evidente na Figura 3.7, onde é possível observar o comportamento do perfil de

temperatura na parede do molde em um experimento conduzido por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com o auxílio de 10 termopares estrategicamente posicionados em cada face (KARLINSKI, 2009).

Figura 3.7 – Perfis de temperatura registrados a partir da utilização de termopares acoplados ao molde.



Fonte: KARLINSKI, 2009

Para minimizar as distorções na extração de calor devido à depósitos precipitados da água na parede interna do molde, é de grande importância que a qualidade da água utilizada no resfriamento passe por um controle rigoroso de qualidade. Esse monitoramento da qualidade da água é feito a partir de um controle químico e da própria inspeção do molde, exigindo para a água de refrigeração primária um circuito independente e fechado.

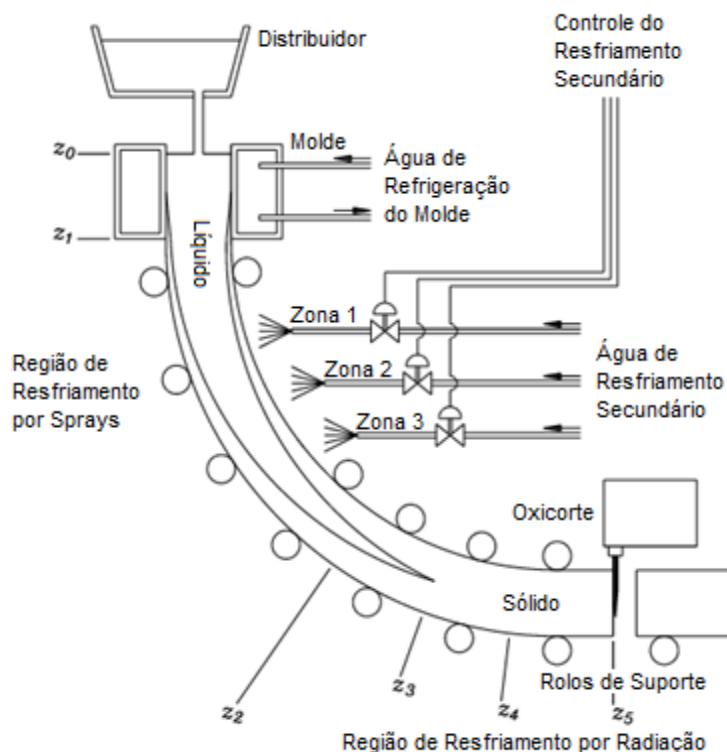
Vale ressaltar que a etapa de resfriamento primário é muito importante e necessita de um controle rigoroso, visto que quaisquer distúrbios que causem a diminuição da espessura da casca solidificada podem levar a perfuração do lingote devido à pressão metalostática do aço líquido, e com isso a paralisação do processo, além de possíveis danos ao próprio equipamento.

3.3.2 Região de Sprays ou Resfriamento Secundário

Após a saída do molde, o lingote entra na região de sprays ou resfriamento secundário. Nessa etapa o lingote, que já possui uma casca solidificada espessa o suficiente para suportar a pressão metalostática do líquido no seu interior, é transportado a partir de rolos que ajudam na sustentação, enquanto é resfriado a partir de um sistema de sprays de água que borrifam sobre a superfície do lingote de forma uniforme.

A etapa de resfriamento secundário é subdividida em três zonas distintas, cada uma com suas próprias variáveis de controle. A taxa de transferência de calor em cada uma dessas zonas é afetada por diversas variáveis, como por exemplo: tipo de bico utilizado, distância entre o bico e o lingote, pressão de saída da água, temperatura da água e a da superfície do aço. Na Figura 3.8 a seguir é possível observar esquematicamente a distribuição das zonas de resfriamento ao longo da máquina de lingotamento contínuo (LOTOV, 2005).

Figura 3.8 – Esquema do processo de Lingotamento Contínuo.



Fonte: Adaptado de LOTOV, 2005.

3.3.3 Região de Radiação Livre ou Resfriamento Terciário

Compreendida entre a refrigeração secundária e o leito de resfriamento encontra-se a região de radiação livre, ou resfriamento terciário. Nessa última etapa do resfriamento o lingote é resfriado naturalmente pelos fenômenos de convecção do ar, de radiação do calor da sua superfície e de condução na região de contato com os rolos extratores. A temperatura ambiente tem grande influência na eficiência dessa etapa do processo, sendo necessária uma avaliação do fluxo de ar em torno da área de resfriamento. Devido à não homogeneidade da temperatura na superfície do lingote, é mais propício de surgirem defeitos de forma ou trincas na região que realiza maior troca de calor com o ambiente, ou seja, nos cantos da peça.

3.4 Principais Parâmetros de Processo Ligados à Formação de Defeitos

Devido à existência de uma grande quantidade de variáveis envolvendo o processo de lingotamento contínuo, são conduzidos diversos estudos com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros de processo na transferência de calor no molde. Enquanto alguns desses parâmetros podem não apresentar algum efeito significante na transferência de calor, outros podem apresentar uma maior interferência no fluxo de calor, como por exemplo: a conicidade do molde, a velocidade de lingotamento, o tipo de pó lubrificante utilizado, a vazão da água de refrigeração, a composição química do aço, dentre outros (VALADARES, 2006).

A seguir serão discutidos alguns desses principais parâmetros do processo de lingotamento contínuo que estão diretamente ligados com a transferência de calor no interior do molde e consequentemente com a formação de defeitos superficiais e internos no tarugo.

3.4.1 Conicidade do Molde

Durante o processo de solidificação do aço ocorre uma progressiva contração conforme a casca solidificada é formada, o que implica no surgimento de uma folga de contração (gap de ar) entre a parede do molde e do tarugo. Esse gap de ar, por ser considerado um mau condutor de calor e deve ser minimizado para aumentar a extração de calor durante o resfriamento e reduzir a temperatura superficial do tarugo na saída do molde. Com o objetivo de garantir essa minimização do gap de ar foi criada a conicidade do molde, sendo esse um grande avanço na época e que permitiu que as máquinas de lingotamento contínuo operassem em maiores velocidades e com menores riscos de perfurações, aumentando enormemente a eficiência da produção.

A definição da conicidade do molde é uma tarefa complexa e está diretamente ligada com a quantificação do gap de ar. Para isso, as duas principais variáveis que causam a contração volumétrica do aço e devem ser levadas em consideração são a velocidade de lingotamento e o tipo de aço a ser lingotado. Por exemplo, enquanto aços alto-carbono requerem uma menor conicidade no topo do molde, aços baixo-carbono necessitam de uma conicidade maior na base do molde (CHOW, 2002a). Portanto é necessário que os moldes sejam especificamente projetados em função da composição do aço a ser produzido, com sua conicidade podendo ser definida pela equação (3.1) (CHOW, 2002a):

$$C = \frac{(A - B)}{B \times L} \times 100$$

onde:

C: Conicidade do molde [%/m];

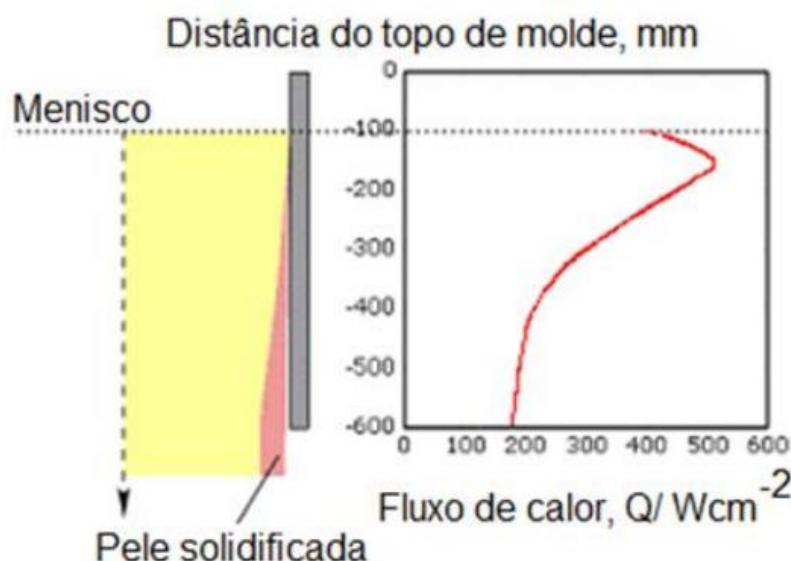
A: Distância entre o centro das paredes opostas do molde na parte superior (largura ou espessura) [m];

B: Distância entre o centro das paredes opostas do molde na parte inferior (largura ou espessura) [m];

L: Comprimento do molde [m].

Por meio de medições de temperatura, foi comprovado que o perfil de temperatura ao longo do molde não é constante e, portanto, a folga de contração da casca solidificada não apresenta um caráter linear, mas sim variável. O fluxo de calor atinge um valor máximo a aproximadamente 40 mm abaixo do menisco, pois há uma maior transmissão de calor pela parte superior do aço líquido, que se reduz à medida que caminha para a extremidade inferior do molde devido à contração da casca solidificada e formação do gap de ar. Na Figura 3.9 é possível observar o comportamento do fluxo de calor ao longo do comprimento do molde, junto à formação da pele solidificada.

Figura 3.9– Comportamento do fluxo de calor no molde a partir do menisco.

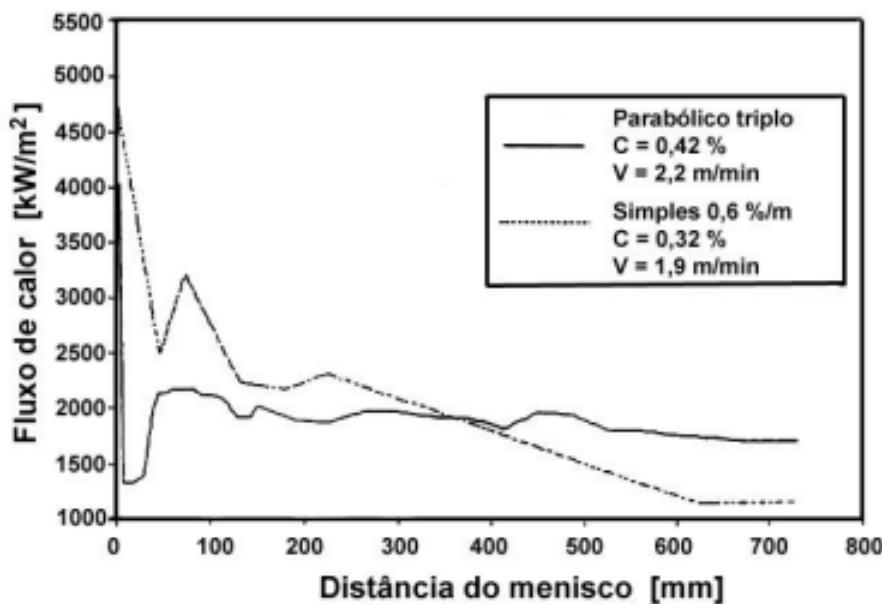


Fonte: STEELUNIVERSITY, 2007.

Dessa forma, com o objetivo de seguir esse perfil de temperatura, foram criados os moldes chamados de dupla conicidade, tripla conicidade e até mesmo os parabólicos. Utilizando moldes instrumentados com termopares estrategicamente posicionados em uma máquina de lingotamento contínuo, Chandra (1993) realizou uma comparação entre os perfis de fluxo de calor em dois moldes de conicidades distintas, sendo o primeiro de conicidade simples e o segundo de conicidade parabólica. Na Figura 3.10 é possível observar os perfis de fluxo de calor calculados a partir de um modelo matemático de solidificação.

É possível notar que no molde de conicidade simples o fluxo de calor decresce continuamente como resultado do aumento gradual do gap de ar entre a casca solidificada e a superfície do molde. Já no molde parabólico o fluxo de calor apresenta uma maior estabilidade, visto que o gap de ar se mantém constante.

Figura 3.10 – Comportamento do fluxo de calor calculado para molde com diferentes conicidades (simples e parabólica).



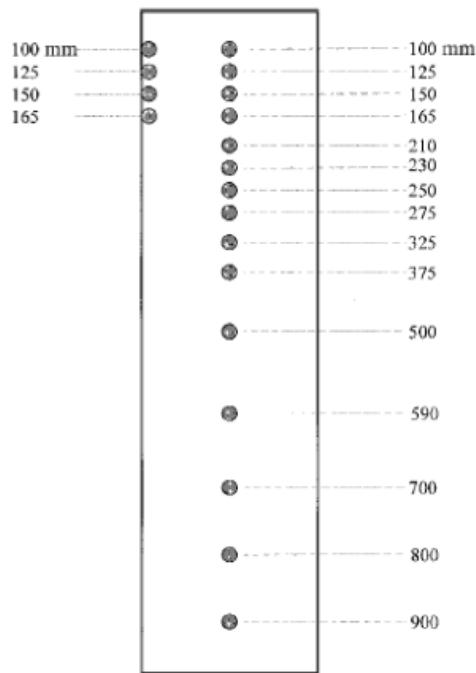
Fonte: CHANDRA, 1993.

3.4.2 Velocidade de Lingotamento

A velocidade de lingotamento, controlada pela unidade de comprimento lingotado na unidade de tempo, tem uma relação direta com o fluxo de calor no processo, visto que para maiores velocidades menos calor será extraído pelo mecanismo de resfriamento primário e, portanto, a casca solidificada apresentará uma espessura mais fina na saída do molde. Como consequência disso há um aumento na probabilidade de ocorrências de perfuração do lingote devido à pressão metalostática do aço líquido sendo exercida na casca fina e, com isso, a paralisação do processo, além de possíveis danos ao próprio equipamento.

Com o objetivo de analisar o fluxo de calor no molde para altas velocidades de lingotamento, Chow (2002b) instrumentou com o auxílio de 68 termopares estrategicamente posicionados conforme o esquema mostrado na Figura 3.11, um molde de seção quadrada 120 x 120 mm, 1 metro de comprimento e 14 mm de espessura de parede.

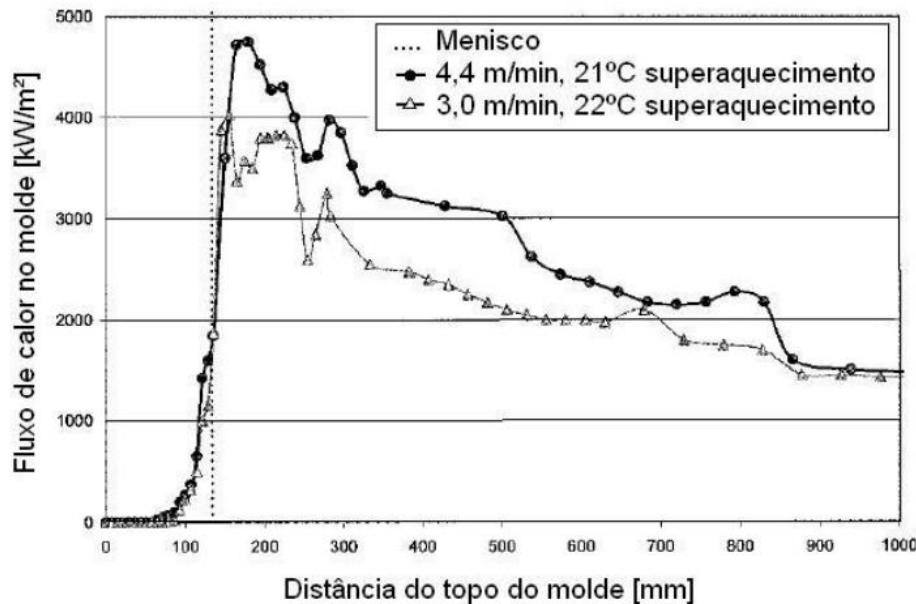
Figura 3.11 – Disposição dos termopares no molde de seção quadrada 120 x 120 mm para controle de temperatura.



Fonte: CHOW, 2002b.

Após uma série de medições utilizando esses termopares, Chow (2002b) conseguiu notar que a diferença no comportamento da transferência de calor no interior do molde pode ser observada mais facilmente para variações da velocidade de lingotamento acima de 0,5 m/min. Na Figura 3.12 é possível observar o comportamento do fluxo térmico no interior do molde durante o lingotamento de duas corridas distintas de um aço alto carbono, sendo a primeira a uma velocidade de 4,4 m/min e a segunda a uma velocidade de 3,0 m/min.

Figura 3.12 – Perfil de fluxo térmico para duas velocidades de lingotamento distintas.



Fonte: CHOW, 2002b.

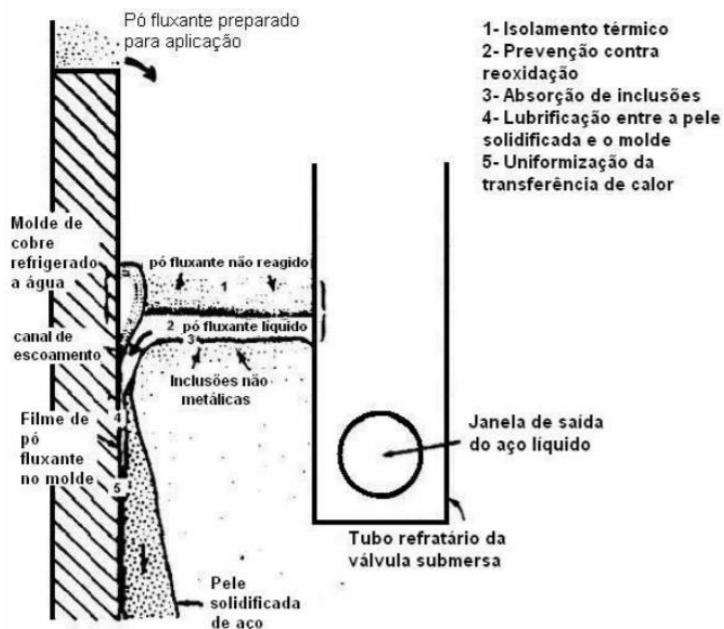
Dessa forma, fica evidente que o aumento da velocidade de lingotamento tem uma relação diretamente proporcional com o fluxo de calor no interior do molde. A explicação para esse fenômeno pode ser justificada a princípio por três motivos. Primeiro, devido à maior temperatura de lingotamento ocorre uma menor contração térmica da casca solidificada no interior do molde, impedindo o aumento do tamanho do gap de ar e melhorando o contato entre o aço e a parede do molde. Segundo, devido ao menor tempo de residência do aço, é formada uma casca solidificada menos espessa e mais suscetível a deformação devido à pressão metalostática do aço líquido, novamente impedindo o aumento do tamanho do gap de ar. Terceiro, devido ao tempo de residência reduzido o tarugo, apresenta uma temperatura superficial maior e com isso também um maior gradiente térmico para o fluxo de calor entre o metal e o molde.

3.4.3 Pó Fluxante

As máquinas de lingotamento contínuo de tarugos utilizam um pó refratário (pó fluxante) cuja principal finalidade é a lubrificação no molde para prevenir a aderência do aço em suas paredes. Além disso, de acordo com Branon (1986), o pó fluxante apresenta outras quatro funções que estão detalhadas a seguir e esquematizadas na Figura 3.13:

- Evitar que o aço líquido entre em contato com a atmosfera oxidante, prevenindo a reoxidação do mesmo. Devido à sua menor densidade, o pó fluxante se dispõe sobre o aço líquido que é alimentado através da válvula submersa.
- Absorver inclusões não metálicas flotadas no aço líquido e que podem causar defeitos superficiais e trincas no tarugo, como por exemplo a alumina (Al_2O_3).
- Isolar termicamente a superfície do molde em contato com a atmosfera, prevenindo a solidificação do aço nessa região e permitindo que o lingotamento seja possível com menores superaquecimentos devido à menor perda de temperatura.
- Controlar e uniformizar o fluxo de calor entre o aço e o molde, prevenindo novamente a formação de trincas.

Figura 3.13 – Esquema das principais funções do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo.

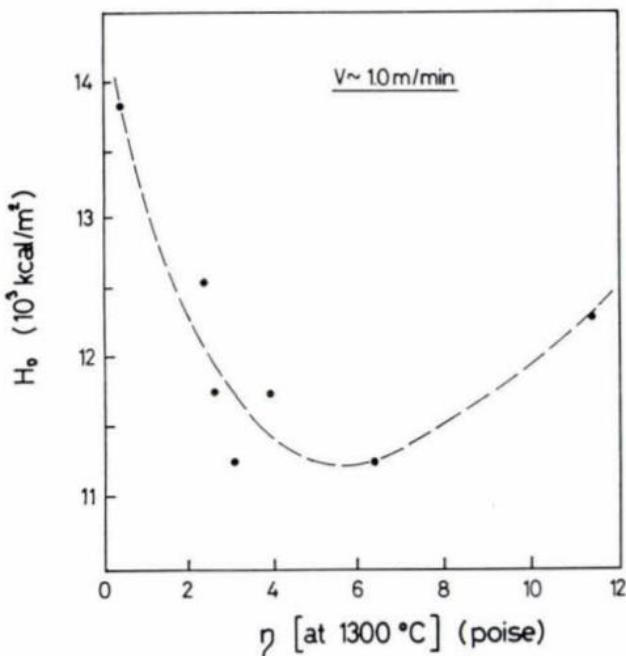


Fonte: BRANION, 1986.

Uma característica muito importante dos pós fluxantes é a viscosidade, a qual apresenta uma relação direta com o controle do fluxo de calor. Wolf (1980) estudou esse comportamento do fluxo de calor em relação à viscosidade do pó fluxante e observou que, para baixos valores de viscosidades, o fluxo de calor é elevado, para valores intermediários de viscosidade, o fluxo de calor é baixo e para valores elevados de viscosidade, o fluxo de calor volta a aumentar, conforme se pode observar na Figura 3.14.

Além da viscosidade, outras duas características de grande importância a respeito dos pós fluxantes são a sua temperatura de cristalização e a taxa de fusão. A primeira é uma relação direta com a formação de fases cristalinas e opacas e que servem para reduzir a perda de calor por radiação. A segunda está diretamente relacionada com a habilidade do pó fluxante em formar uma poça de escória líquida com uma espessura estável e capaz de preencher o interior do “gap”, garantindo a lubrificação e redução do atrito entre a camada solidificada e o molde.

Figura 3.14 – Relação entre o fluxo de calor e a viscosidade do pó fluxante.



Fonte: WOLF, 1980.

3.4.4 Vazão da Água de Refrigeração

Uma outra variável que afeta o fluxo de calor durante o resfriamento é a vazão da água de refrigeração do molde, cuja velocidade pode ser descrita pela equação (3.2) (VALADARES, 2006):

$$v_a = \frac{U}{n \times a}$$

Onde:

v_a : Velocidade da água nos canais de refrigeração [m/s];

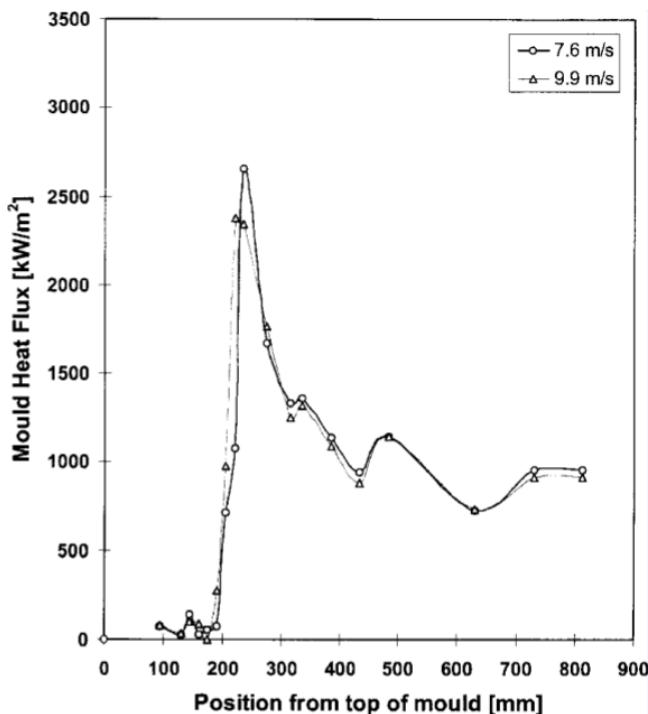
U : Vazão da água de refrigeração [l/min];

A : Área de seção transversal do canal [m^2];

n : Quantidade de canais.

Pinheiro (2000) realizou uma análise do perfil de fluxo de calor para duas vazões distintas da água de refrigeração do molde durante o lingotamento de um aço peritético 0,13%C, conforme é possível observar na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Efeito da velocidade da água de refrigeração no perfil do fluxo de calor do molde.



Fonte: PINHEIRO, 2000.

Ao reduzir a velocidade de 9,9 m/s para 7,6 m/s foi notado que o pico do fluxo de calor, a uma distância de aproximadamente 250 mm do topo do molde, aumentou em 10%, enquanto a média do fluxo de calor durante todo o seu comprimento aumentou apenas 1,4%. Para garantir que o fluxo de calor seja uniforme, também é necessário calcular a velocidade adequada para evitar que o fluxo de água seja turbulento. Quanto maior é a velocidade da água de refrigeração, maior será a extração de calor. Porém, conforme observado acima, as magnitudes dos aumentos não são significativas para velocidades muito altas. Contudo, velocidades muito baixas podem fazer com que a temperatura das paredes aumente rapidamente, o que pode causar a vaporização da água e até mesmo a perfuração do molde.

Em relação à água de refrigeração, outro aspecto de grande importância é a sua qualidade propriamente dita. Deve existir um controle rígido da sua

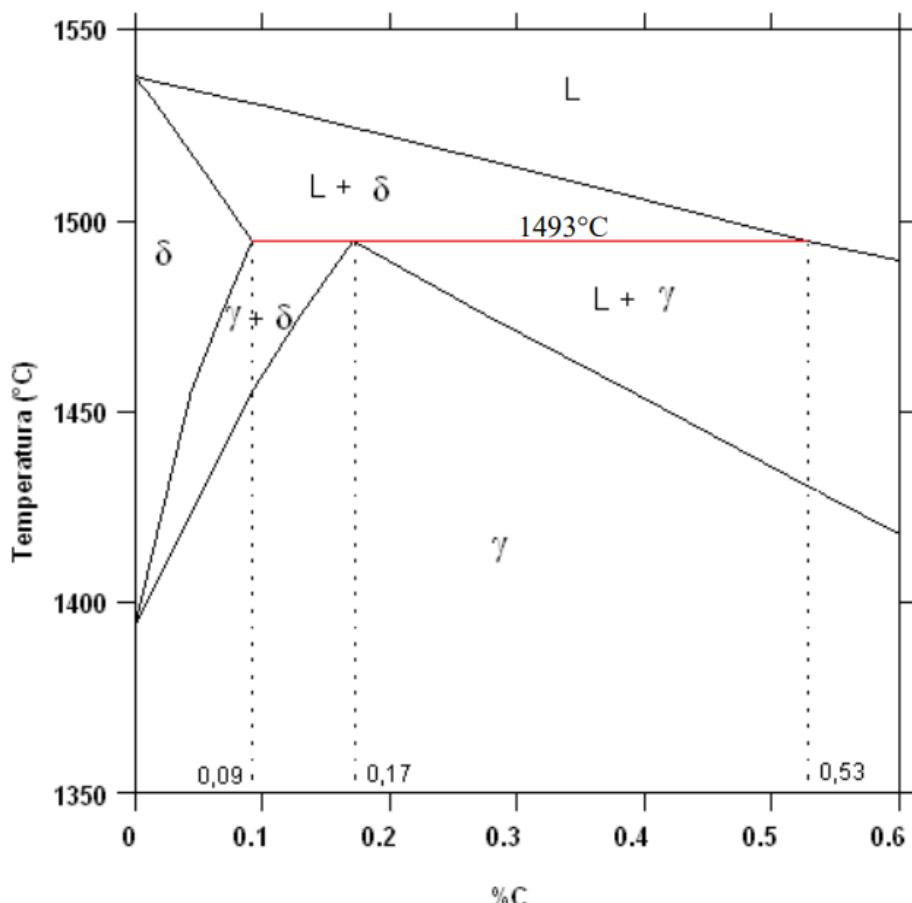
dureza, pH e sólidos em suspensão de forma a evitar a formação de um depósito na superfície externa do molde, o que pode acabar interferindo no fluxo de calor em determinadas regiões e modificando o perfil térmico do molde.

3.4.5 Composição Química

A formação de trincas durante o processo de solidificação também sofre uma grande influência da composição química do aço. Durante a solidificação o aço passa por uma sequência de transformações que dependem da composição química. A contração elevada do aço durante a transformação de ferrita- δ em austenita, decorrente da diferença de fator de empacotamento entre esses microconstituintes, ocasiona tensionamentos térmicos na frente de solidificação. Esses tensionamentos são uma das principais causas da formação de trincas nos aços peritéticos (Kulkarni, 2005).

Conforme é possível observar no diagrama Fe-C da Figura 3.16 a seguir, os aços podem seguir trajetórias distintas durante o seu processo de solidificação. Em virtude dessa variedade de transformações é possível dividir os aços em três diferentes grupos, sendo o primeiro composto pelos aços com teor de carbono de até 0,09%, o segundo pelos aços de teor de carbono 0,09% a 0,53%, e o terceiro grupo pelos aços com teores de carbono acima de 0,53%.

Figura 3.16 – Secção do diagrama de fase Fe-C com destaque da região de transformação peritética.



No primeiro grupo, cuja temperatura liquidus é maior que 1530°C, ocorre a formação da fase sólida denominada ferrita delta (ferrita- δ) a partir do líquido. Já o segundo grupo pode ser subdividido em dois subgrupos, de acordo com a estrutura que é formada na região peritética. Enquanto o primeiro subgrupo que inclui os aços com teores de 0,09% a 0,15% de carbono solidifica em uma estrutura composta por ferrita- δ e austenita, o segundo subgrupo composto pelos aços com 0,17% a 0,53% de carbono tem um equilíbrio entre a austenita e a fase líquida após a reação peritética. Por último, no terceiro grupo ocorre a formação da austenita ao longo do resfriamento diretamente da fase líquida.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão tratados e definidos alguns dos parâmetros e aspectos específicos da máquina de lingotamento contínuo utilizada nesse estudo. Também será apresentada a metodologia em que o projeto foi embasado, desde a sua estrutura básica de funcionamento até a descrição total do seu método. Por fim, será mostrado o procedimento para coleta e análise das amostras.

4.1 Máquina de Lingotamento Contínuo e Produto

O estudo em questão foi desenvolvido em uma aciaria elétrica, dotada de uma máquina de lingotamento contínuo que opera com 5 veios e realiza corridas de 120 toneladas, vazadas por meio de um distribuidor de capacidade de 30 toneladas. O vazamento do distribuidor para os moldes ocorre por meio de jatos abertos com adição de arame de alumínio para evitar a reoxidação em contato com a atmosfera. A altura medida do distribuidor até o solo é de aproximadamente 10 metros de altura, com um raio de curvatura de 9 metros e uma distância linear até o oxicorte de 25 metros.

Os moldes utilizados são moldes de cobre do tipo CONVEX, com seção quadrada de 160x160mm. De forma a otimizar o contato entre o tarugo e sua parede interna, existe uma variação da sua espessura ao longo do comprimento, com um revestimento interno de aproximadamente 0,9 mm de cromo, prevenindo o desgaste das paredes. A máquina possui um sistema de oscilação cujo principal objetivo é evitar a aderência da casca solidificada do tarugo nas paredes internas do molde e auxiliar na extração do lingote. A adição do pó fluxante forma uma camada de aproximadamente 5 cm que ajuda no isolamento térmico da superfície do molde.

Na Tabela 4.1 a seguir está indicada a composição química da liga SAE 1020 estudada nesse trabalho, enquanto na Tabela 4.2 é possível observar algumas das propriedades físicas e mecânicas dessa liga. Por fim, na Tabela 4.3 estão listados alguns dos principais parâmetros específicos da máquina de lingotamento contínuo que foi utilizada no estudo.

Tabela 4.1 – Composição química do aço SAE 1020, em massa.

%C	0,18-0,23%
%Si	0,15-0,35%
%Mn	0,30-0,60%
%S	≤ 0,05%
%P	≤ 0,04%

Tabela 4.2 – Propriedades físicas e mecânicas do aço SAE 1020.

Massa específica	7,87 g/cm ²
Limite de escoamento	350 MPa
Resistência a tração	420 MPa
Módulo de elasticidade	205 GPa
Condutividade térmica	51,9 W/m.K

Tabela 4.3 – Parâmetros da máquina de lingotamento contínuo utilizada.

Capacidade distribuidor	30 t
Capacidade da panela	120 t
Raio de curvatura	9 m
Velocidade de lingotamento	2,4 a 3,2 m/min
Temperatura de vazamento	1530 a 1550 °C
Número de veios	5
Amplitude de oscilação	9 mm
Vazão da água de refrigeração	1900 l/min
Temperatura da água de refrigeração	35 °C
Tipo de molde	Parabólico

4.2 Metodologia MASP

A metodologia utilizada para solucionar o problema de alto índice de sucateamento de tarugos em decorrência da incidência de defeitos superficiais e internos no processo de lingotamento contínuo foi o Método de Análise de Solução de Problemas (MASP). Essa é uma ferramenta de gestão da qualidade baseada na melhoria contínua do processo, visando a eliminação das causas das não-conformidades a partir da implementação de ações corretivas e preventivas com uma atuação constante. Para isso, foi montado um time composto por diferentes operadores da célula de lingotamento contínuo e que ficariam responsáveis pela ajuda na implementação do plano de ação posteriormente.

Essa ferramenta é estruturada utilizando o ciclo PDCA (“Plan, Do, Check, Act”) como conceito e é baseada na coleta de dados e evidências para que seja possível implementar de forma sistemática um conjunto de ações corretivas capazes de eliminar as principais causas do problema e evitar sua reincidência no processo. Conforme é possível observar na Figura 4.1, esse ciclo pode ser subdividido em quatro principais etapas, que são:

- PLAN (Planejar): nessa primeira etapa ocorre o estudo e a avaliação de como o problema será resolvido, a partir da elaboração de um plano estratégico;
- DO (Executar): nessa segunda etapa ocorre a implementação da solução encontrada para o problema na etapa anterior;
- CHECK (Verificar): nessa terceira etapa ocorre uma avaliação crítica dos resultados das soluções implementadas na etapa anterior, visando detectar eventuais falhas ou erros;
- ACTION (Agir): nessa quarta e última etapa devem ser corrigidas as falhas observadas na etapa de verificação, a partir de ações corretivas.

Figura 4.1 – Ciclo PDCA.



Fonte: JUNIOR, 2017.

De forma a viabilizar sua implantação, a metodologia MASP também pode ser auxiliada pelo emprego de diversas ferramentas da qualidade como por exemplo: Gráfico de Pareto, Diagrama de Causa e Efeito, Histogramas, Fluxogramas, Carta de Controle, Diagrama de Dispersão, Curva de Gauss, dentre outras. Essas ferramentas permitem trabalhar com os dados e informações que foram previamente coletados e estratificados, adequando a visualização dos registros para cada necessidade específica.

Embora a estruturação das etapas do MASP seja derivada do ciclo PDCA, existem algumas diferenças em relação à sua apresentação. Enquanto no ciclo PDCA existe uma divisão em quatro etapas distintas e bem definidas, no MASP essa divisão acontece em um total de oito etapas, conforme é possível observar na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Método de Análise e Solução de Problemas (MASP).

PDCA	FLUXO	ETAPA	OBJETIVO
P	1	Identificação do problema	Definir claramente o problema e reconhecer sua importância.
	2	Observação	Investigar as características específicas do problema com uma visão ampla e sob vários pontos de vistas.
	3	Análise	Descobrir as causas fundamentais.
	4	Plano de ação	Conceber um plano para bloquear as causas fundamentais.
D	5	Ação	Bloquear as causas fundamentais.
C	6	Verificação	Verificar se o bloqueio foi efetivo.
	?	(Bloqueio foi efetivo?)	
A	7	Padronização	Prevenir contra o reaparecimento do problema.
	8	Conclusão	Recapitular todo o processo de solução do problema para trabalho futuro.

Fonte: CAMPOS,1992.

Esse procedimento forma uma espécie de “história” ou “enredo”, narrando cada etapa de como um determinado problema foi solucionado. Por esse motivo o método também recebe a denominação de QC-Story (“quality control story”), de origem japonesa. Ao se executar todas as etapas ordenadamente será possível trazer uma maior consistência lógica para as atividades de melhoria, garantindo uma maior segurança a longo prazo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados e a discussão do projeto desenvolvido nesse trabalho. Serão quatro tópicos referentes a cada uma das etapas do Método de Análise e Solução de Problemas (MASP) que foram desenvolvidas, todas referentes à etapa de planejamento do ciclo PDCA.

5.1 Etapa de Identificação do Problema

Na primeira etapa do projeto foi realizada de forma clara e criteriosa a identificação e a definição do problema, a partir dos seguintes passos:

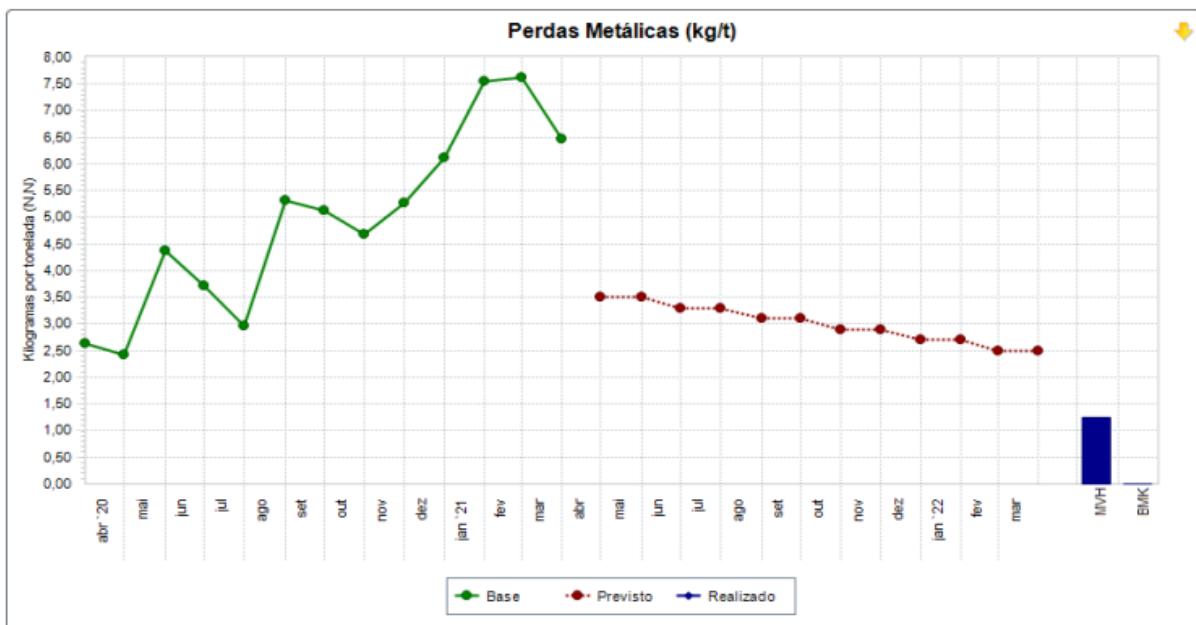
- Foi criado um grupo de solução de problemas (GSP) envolvendo um total de cinco operadores da célula de lingotamento contínuo, que ficariam responsáveis posteriormente pela ajuda na implementação das ações corretivas;
- Foi analisado o histórico de perdas metálicas devido ao sucateamento de tarugos para que fosse possível comparar com os valores atuais;
- Foram estipuladas metas para os indicadores de sucateamento ao longo dos meses subsequentes ao início do projeto;
- Foram realizados cálculos de potencial de ganho a partir do aumento de volume de produto vendido, evidenciando os ganhos possíveis com a solução do problema;
- Foram estabelecidas referências temporais a partir de um cronograma bem definido, com uma data-limite estabelecida para cada etapa do projeto.

Os dados de perdas metálicas são aferidos de duas formas distintas. A primeira forma é a aferição manual feita pelos operadores do oxicorte, que realizam as medições de comprimento de tarugo sucateado com trenas e utilizam estimativas do peso linear do tarugo com o objetivo de converter essas

medidas em valores de massa (202 kg/m para o tarugo de seção quadrada de 160 mm e 133 kg/m para o tarugo de seção quadrada de 130 mm). A segunda é forma é a aferição automatizada onde ocorre a pesagem da caçamba de aparas para aferir a quantidade de material sucateado diretamente do processo de corte, como é o caso do desponte. Após o registro desses dados de perdas metálicas no sistema interno da empresa é possível consulta-los a partir de outros terminais.

Na curva verde da Figura 4.2 a seguir é possível observar a tendência dos valores de perdas metálicas devido ao sucateamento de tarugos (em quilogramas por tonelada de aço lingotado no eixo Y) ao longo dos últimos 12 meses de produção. Já na curva vermelha estão indicadas as metas que foram estipuladas para cada um dos 12 meses subsequentes ao início do projeto, com uma diminuição gradual das perdas metálicas devido à implementação de ações corretivas.

Figura 5.1 – Valor mensal de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em quilogramas por toneladas.



A partir do levantamento do histórico do problema foi possível notar que existe uma tendência de alta na curva verde do volume mensal de perdas metálicas por sucateamento de tarugo. Enquanto em março de 2020 foram

sucateados somente 2,64 kg de material não conforme por tonelada de produção, em dezembro do mesmo ano esse número passou para 6,10 kg/t, um aumento de aproximadamente 130% em menos de 12 meses. Esse notável aumento na quantidade de produto semiacabado perdido em decorrência de problemas de qualidade foi uma das principais motivações para a realização desse projeto, visto que o retorno financeiro seria considerável. O cálculo de ganho desse retorno foi realizado com base no aumento do volume de produto vendido, visto que a redução de perdas de material causa um aumento da eficiência da produção real. A relação utilizada para obter esse ganho em R\$/ano foi a seguinte:

$$G = (P_B - P_R) \times M_c \times R_M \times 12$$

onde:

G: Ganho monetário anual com a diminuição das perdas metálicas [R\$/ano];

P_B: Valor base da produção, ou seja, a média da produção mensal realizada nos meses que antecedem o projeto [t/mês];

P_R: Valor referência da produção, ou seja, a meta de produção a partir da redução de perdas metálicas [t/mês];

M_c: Margem de contribuição dada pela diferença entre a receita líquida de vendas e os custos/despesas variáveis [R\$/t];

R_M: Rendimento metálico da produção obtido com a implementação das melhorias, dado pela relação entre volume produzido não sucateado e volume produzido total [%].

Apesar do valor base de produção e da margem de contribuição serem informações sensíveis da empresa e, portanto, não constarem nesse presente trabalho, com a aplicação da relação de cálculo de ganho foi estimado o potencial desse projeto na casa dos R\$500.000,00/ano. Com isso foi possível demonstrar o atual impacto financeiro dessas perdas de produto semi-acabado no rendimento total da produção e justificar a importância da execução desse projeto.

5.2 Etapa de Observação

Nessa etapa de desenvolvimento do projeto foram coletados os relatórios de dados referentes à produção de janeiro de 2020 até março de 2021, o que possibilitou estratificar todos os tipos de ocorrências de sucateamento ao longo de cada mês de produção e assim calcular a relevância de cada um dos problemas em relação à produção total.

A estratificação foi realizada inicialmente dividindo os problemas de perdas metálicas em dois grupos distintos: o primeiro grupo definido pelas perdas de processo e o segundo grupo pelas perdas de qualidade. As perdas de processo são decorrentes principalmente de problemas de sincronismo na Aciaria como um todo, o que acarreta em diversas aberturas e fechamentos de veios, ocasionando sucateamentos por Barra Curta, Final de LC e Desponte. Já as perdas de qualidade são decorrentes de problemas de não conformidade ocasionados por falha no ajuste dos parâmetros de processo, utilização de padronização desatualizada, manutenção insuficiente da máquina ou até mesmo falha no cumprimento de padrões. As perdas de qualidade podem ser defeitos superficiais, internos e até mesmo de forma, como por exemplo Trincas, Blow Holes, Romboidade ou até mesmo Rechupe.

A seguir, é possível observar os dados referentes aos meses de janeiro, fevereiro e março de 2021 na Tabela 5.1, Tabela 5.2 e Tabela 5.3 respectivamente. Já na Tabela 5.4 é possível observar os dados referentes ao ano inteiro de 2020. Na segunda e terceira coluna de cada tabela está indicado o valor total sucateado para cada motivo em quilogramas e toneladas respectivamente. Já na quarta coluna está indicado a porcentagem em peso que cada motivo representa em relação ao total geral, enquanto na quinta coluna foi calculado o total acumulado das porcentagens em peso. Na sexta e última coluna foi calculada a proporção em quilogramas por tonelada de cada motivo de perda frente a produção total do mês correspondente.

Tabela 5.1 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em janeiro de 2021.

Motivo	Perda (kg)	Perda (t)	%Peso	%Peso acm	Perda (kg/t)
Barra curta	48.404	48,404	13%	13%	0,9984
Desponte fora	43.614	43,614	12%	25%	0,8996
Incrustação	42.746	42,746	12%	37%	0,8817
Final de LC	41.689	41,689	11%	48%	0,8599
Blow holes	33.876	33,876	9%	57%	0,6987
Empeno	30.491	30,491	8%	66%	0,6289
Sobra de Material	25.000	25	7%	73%	0,5157
Romboidade	22.005	22,005	6%	79%	0,4539
Trincas centralizada	21.915	21,915	6%	85%	0,4520
Curto Fim Lingot	20.836	20,836	6%	90%	0,4298
Trincas	17.065	17,065	5%	95%	0,3520
Corte irregular	8.934	8,934	2%	97%	0,1843
Emenda	5.010	5,01	1%	99%	0,1033
Rechupe	2.946	2,946	1%	100%	0,0608
Marcas Oxicorte	1.600	1,6	0%	100%	0,0330
Total Geral	366.131	366,13	100%	100%	7,5518

Tabela 5.2 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em fevereiro de 2021.

Motivo	Perda (kg)	Perda (t)	%Peso	%Peso acm	Perda (kg/t)
Desponte fora	62.868	62,868	15%	15%	1,1221
Final de LC	53.288	53,288	12%	27%	0,9511
Incrustação	48.783	48,783	11%	39%	0,8707
Trincas centralizada	46.455	46,455	11%	49%	0,8292
Barra curta	46.250	46,25	11%	60%	0,8255
Blow holes	45.486	45,486	11%	71%	0,8119
Curto Fim Lingot	22.042	22,042	5%	76%	0,3934
Empeno	21.640	21,64	5%	81%	0,3862
Romboidade	19.559	19,559	5%	86%	0,3491
Trincas	17.115	17,115	4%	90%	0,3055
Corte irregular	10.385	10,385	2%	92%	0,1854
Comprimento	7.580	7,58	2%	94%	0,1353
Marcas Oxicorte	7.335	7,335	2%	96%	0,1309
Trincas de cantos	7.335	7,335	2%	97%	0,1309
Rechupe	5.623	5,623	1%	99%	0,1004
Perfuração	2.522	2,522	1%	99%	0,0450
Sangria	2.004	2,004	0%	100%	0,0358
Emenda	1.402	1,402	0%	100%	0,0250
Total Geral	427.672	427,67	100%	100%	7,6333

Tabela 5.3 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos em março de 2021.

Motivo	Perda (kg)	Perda (t)	%Peso	%Peso acm	Perda (kg/t)
Blow holes	64.584	64,58404	19%	19%	1,2498
Curto Fim Lingot	53.002	53,002	16%	35%	1,0257
Final de LC	34.489	34,489	10%	46%	0,6674
Barra curta	27.687	27,687	8%	54%	0,5358
Incrustação	24.579	24,579	7%	61%	0,4756
Trincas	24.450	24,45	7%	69%	0,4731
Empeno	20.900	20,9	6%	75%	0,4044
Desponte fora	20.771	20,771	6%	81%	0,4019
Trincas centralizada	12.225	12,225	4%	85%	0,2366
Comprimento	11.651	11,65108	3%	88%	0,2255
Romboidade	11.648	11,648	3%	92%	0,2254
Perfuração	8.572	8,572	3%	94%	0,1659
Rechupe	6.433	6,433	2%	96%	0,1245
Emenda	3.963	3,963	1%	97%	0,0767
Sangria	2.525	2,525	1%	98%	0,0489
Defeito interno	2.445	2,445	1%	99%	0,0473
Corte irregular	1.895	1,895	1%	99%	0,0367
Trincas de cantos	1.895	1,895	1%	100%	0,0367
Total Geral	333.714	333,71	100%	100%	6,4578

Tabela 5.4 – Dados de perdas metálicas por sucateamento de tarugos no ano de 2020.

Motivo	Perda (kg)	Perda (t)	%Peso	%Peso acm	Perda (kg/t)
Barra curta	450.673	451	18%	18%	0,7658
Final de LC	423.794	424	17%	36%	0,7201
Blow holes	372.007	372	15%	51%	0,6321
Desponte fora	227.986	228	9%	60%	0,3874
Trincas centralizada	204.795	205	8%	68%	0,3480
Incrustação	193.563	194	8%	76%	0,3289
Curto Fim Lingot	111.183	111	5%	81%	0,1889
Trincas	92.930	93	4%	85%	0,1579
Empeno	74.268	74	3%	88%	0,1262
Rechupe	59.044	59	2%	90%	0,1003
Sobra de Material	53.000	53	2%	92%	0,0901
Empenamento em arco	36.634	37	1%	94%	0,0623
Emenda	20.862	21	1%	95%	0,0355
LC - probl mecânicos	20.000	20	0,82%	95,41%	0,0340
Mistura de Aço	19.413	19	0,79%	96,21%	0,0330
Sangria	16.586	17	0,68%	96,88%	0,0282
Perfuração	15.176	15	0,62%	97,50%	0,0258
Compoosição Química	14.200	14	0,58%	98,08%	0,0241
Risco	12.225	12	0,50%	98,58%	0,0208
Trincas de cantos	12.184	12	0,50%	99,07%	0,0207
Comprimento	7.996	8	0,33%	99,40%	0,0136
Romboidade	7.335	7	0,30%	99,70%	0,0125
Corte irregular	3.698	4	0,15%	99,85%	0,0063
Pele dupla	2.652	3	0,11%	99,96%	0,0045
Falha de desponte	1.002	1	0,04%	100,00%	0,0017
Total Geral	2.453.205	2453,21	100%	100%	4,1686

Após a coleta e a estratificação dos dados de sucateamento foi utilizado o Diagrama de Pareto como ferramenta da qualidade, o que permitiu a priorização dos problemas que apresentaram maior impacto no rendimento da produção no período observado. Essa ferramenta teve como objetivo agrupar os problemas mais relevantes e que representam juntos a maior parte da frequência total de ocorrências, permitindo identificar quais são os problemas mais significativos e que deveriam ser priorizados nas etapas posteriores do projeto. Os diagramas obtidos estão ilustrados na Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5 a seguir, onde as linhas laranjas representam a porcentagem acumulada da frequência das ocorrências de perdas metálicas de 0 a 100%. A priorização foi feita selecionando os principais motivos cuja frequência acumulada é igual a 80%, conforme indicado em cada curva.

Figura 5.2 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente a janeiro de 2021.

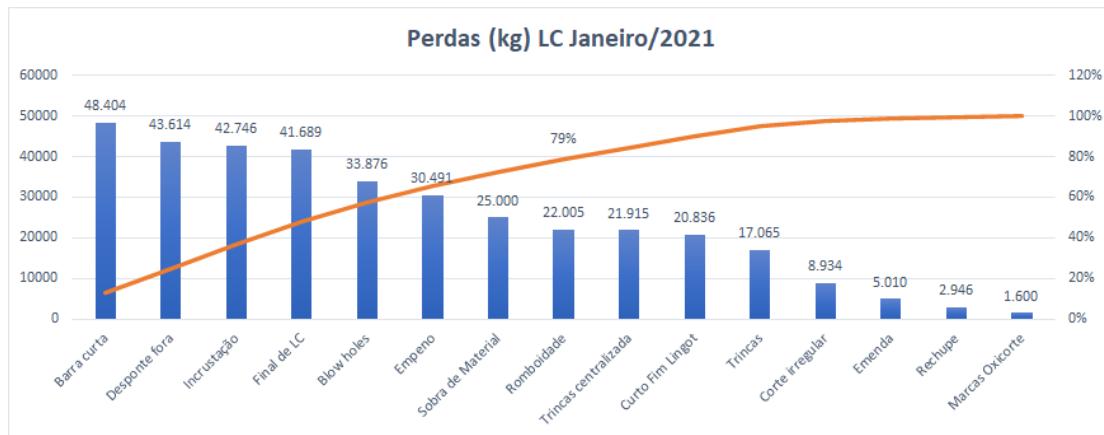


Figura 5.3 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente a fevereiro de 2021.

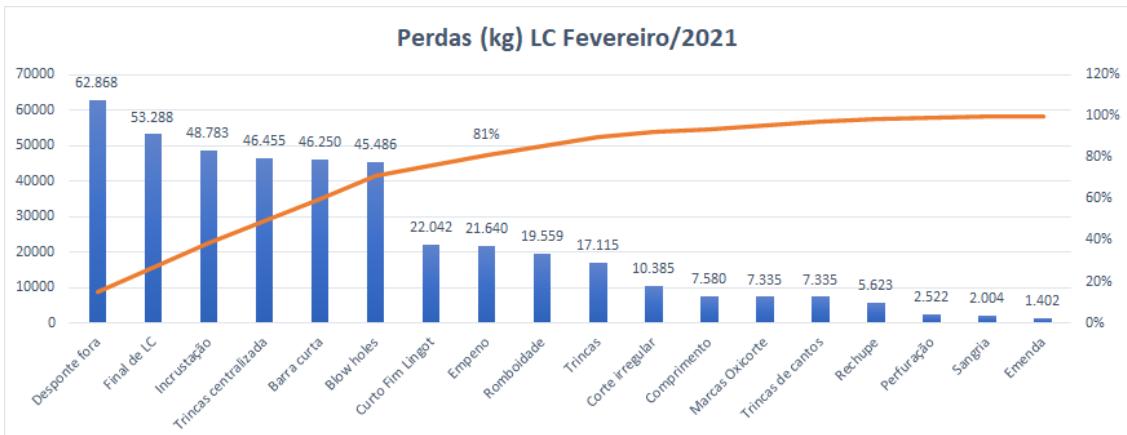


Figura 5.4 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente à março de 2021.

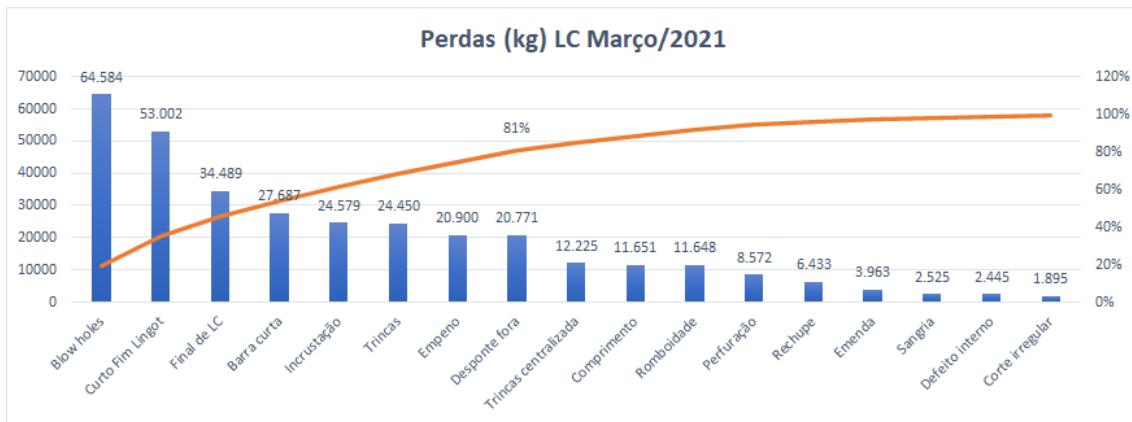
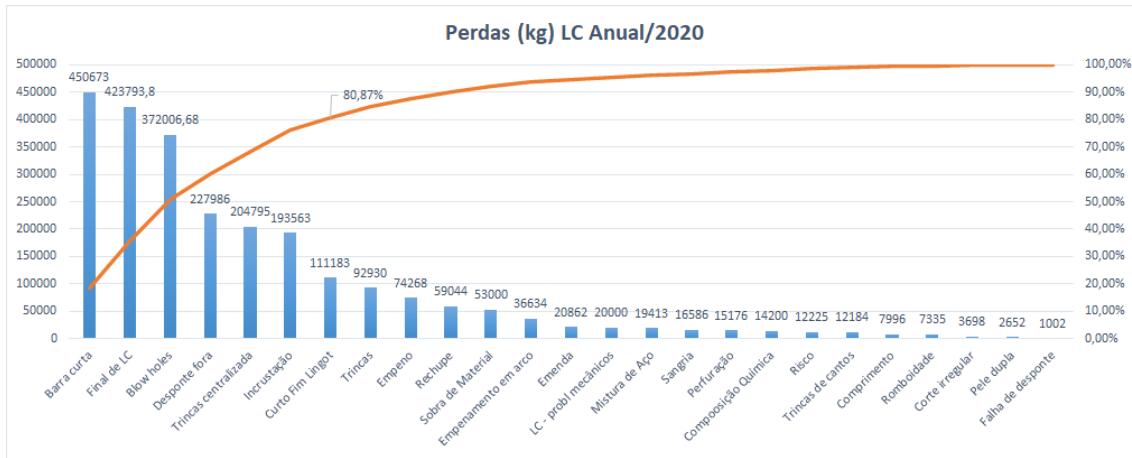


Figura 5.5 – Diagrama de Pareto dos diferentes motivos de sucateamento de tarugos referente ao ano de 2020.



A partir da montagem dos Diagramas de Pareto foi possível visualizar os dados previamente apresentados de uma forma mais intuitiva, o que permitiu selecionar os principais motivos causadores de perdas metálicas e descartar os de menor relevância. Os motivos selecionados para serem levados a etapa seguinte do projeto com base nos diagramas estão detalhados a seguir:

- Perdas de Processo: Barra Curta, Desponte Fora, Final de LC;
- Defeitos de Forma: Romboidade, Empeno;
- Defeitos Superficiais: Trincas, Incrustação;
- Defeitos Internos: Trincas, Blow Holes.

5.3 Etapa de Análise

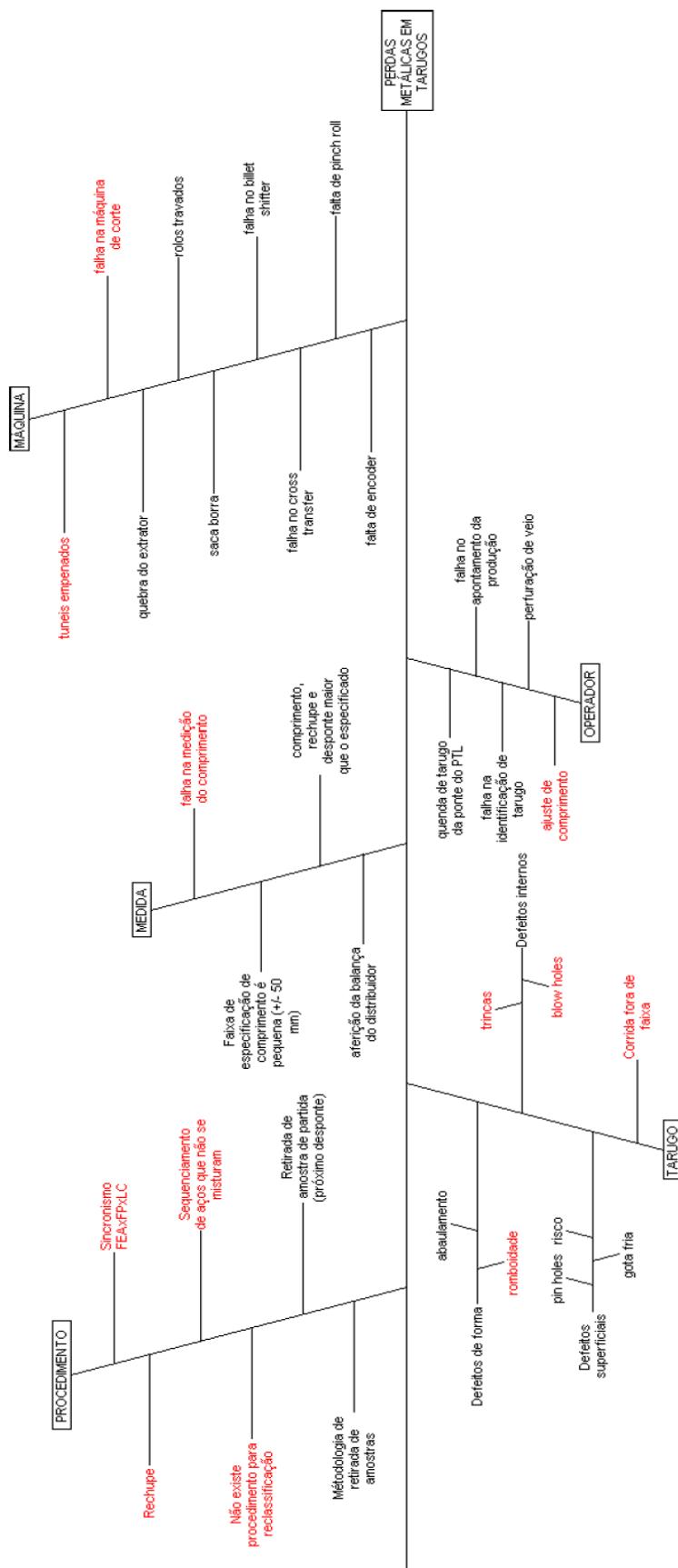
Em seguida da etapa de observação e da estratificação dos principais problemas que ocasionam perdas metálicas, foi realizado um brainstorming com o grupo GSP para levantar sugestões e hipóteses em relação às causas desses problemas. Também foram realizadas entrevistas com operadores experientes da célula de lingotamento contínuo e envolvidos diretamente com o processo produtivo para coletar informações adicionais e também ajudar na identificação das possíveis causas.

Após o levantamento das hipóteses e identificação dessas possíveis causas, foi elaborado um diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa-e-efeito, conforme é possível observar na Figura 5.6. Para realizar a montagem desse diagrama foi necessário subdividir as causas levantadas durante o brainstorming em cinco categorias distintas e bem definidas: Procedimento, Tarugo, Medida, Operador e Máquina.

Na categoria de procedimento foram destacadas as causas relacionadas com sincronismo da acaria, procedimentos operacionais e sequenciamento de corridas. Essas causas ocasionam as perdas de processo que foram listadas anteriormente. Já na categoria de tarugo foram destacados os defeitos de qualidade (superficiais, internos e de forma), como Romboidade, Trincas e Blow Holes.

Foram identificadas também possíveis problemas relacionados ao comprimento do tarugo, desde falhas na medição e na aferição da balança do distribuidor até mesmo falhas operacionais de ajuste e apontamento da produção. Por fim foi criada uma última categoria referente as causas atreladas ao bom funcionamento da máquina. Dentre essas causas, pode-se destacar problemas com tuneis empenados e falhas na máquina de corte.

Figura 5.6 – Diagrama de Ishikawa ou diagrama causa e efeito das perdas metálicas por sucateamento de tarugos.



5.4 Etapa de Plano de Ação

Após a identificação, observação e análise do problema foi elaborado um plano de ação visando eliminar as causas mais relevantes encontradas. Para a elaboração desse plano foi necessário dividir as ações entre os cinco operadores da célula de lingotamento continuo participantes do grupo de solução de problemas, estipulando uma data limite para a implementação de cada melhoria.

Algumas das ações envolvendo a mitigação dos defeitos superficiais, internos e de forma foram embasadas na revisão bibliográfica dos parâmetros de processo, expostas ao longo desse trabalho. Por exemplo, foi verificado através da literatura que a formação de trincas e romboidade tem forte relação com os resfriamentos primário e secundário, bem como a temperatura e velocidade de lingotamento. Já a formação de blow holes é decorrente de gases CO, H e N dissolvidos no aço líquido acima do equilíbrio, e, portanto, a injeção de Al caso insuficiente pode favorecer fortemente o aparecimento desse tipo de problema.

A técnica utilizada na elaboração desse plano foi o 5W1H, que consiste na realização de diversos questionamentos importantes e relacionados diretamente com a causa traçada (O Quê, Quando, Quem, Como, Onde, Por Quê). Na Tabela 5.5 é possível observar as medidas tomadas para solucionar cada uma das causas expostas na etapa de análise. As colunas referentes aos operadores responsáveis pela implementação de cada ação e aos prazos estipulados foram omitidas deste presente trabalho, tornando a tabela mais enxuta.

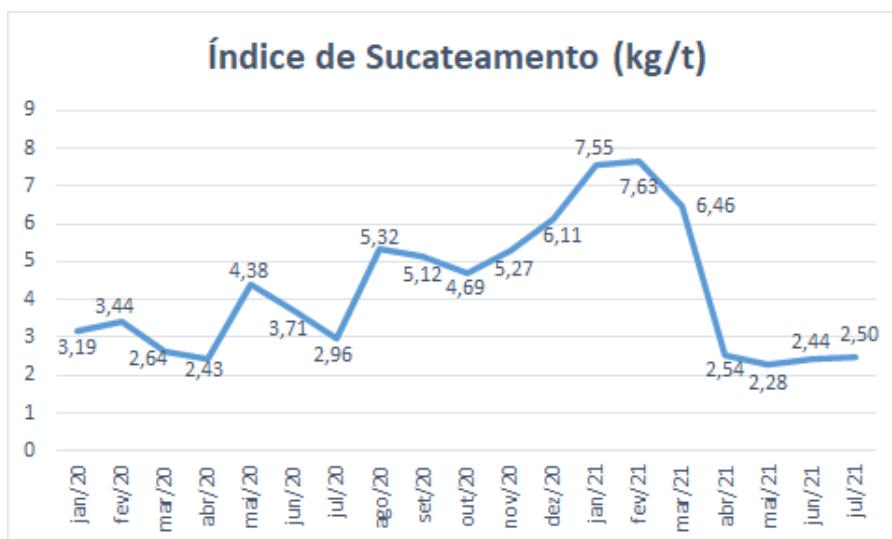
Tabela 5.5 – Plano de Ação 5W1H elaborado para eliminar as causas identificadas.

Causas	O Quê?	Como?	Onde?	Por Quê?
Incrustação	Acompanhar a formação de escória no interior do distribuidor.	Criando um procedimento de rotina para acompanhamento da formação de escória.	Lingotamento Contínuo	Evitar o acumulo excessivo de escória no distribuidor.
Blow Holes	Aferição da máquina de injeção de alumínio.	Durante a parada de produção, ligar a máquina de injeção, simulando o lingotamento e medindo com o auxílio de uma trena a velocidade em "mm/min" de cada veio.	Lingotamento Contínuo	Pois o alumínio é um poderoso desoxidante e a sua falta pode resultar na ocorrência de blow holes por excesso de oxigênio.
Blow Holes	Aferição da vazão de óleo no molde.	Durante a parada de produção, medir a quantidade de óleo vazada com a o auxílio de uma proveta volumétrica.	Lingotamento Contínuo	Pois o óleo contém hidrocarbonetos (H e O) e seu excesso pode gerar blow holes.
Romboidade e Trincas	Elaborar padrão de atividades com finalidade de garantir uma partida de máquina mais eficiente.	Avaliando a frequência e a criticidade de cada atividade de partida de máquina.	Lingotamento Contínuo	Garantir que a máquina opere em condições ideais e com resfriamento adequado.
Romboidade e Trincas	Criar rota de inspeção diária acompanhada de preenchimento de relatório.	Inspecionando a célula de lingotamento continuo.	Lingotamento Contínuo	Garantir a operação dos equipamentos em condições ideais, mantendo a romboidade baixa e evitando problemas de empeno.
Romboidade e Trincas	Aumentar a frequência das atividades de manutenção dos filtros dos sprays da equipe operacional.	Modificando o padrão da atividade.	Lingotamento Contínuo	Garantir o funcionamento correto do filtro dos sprays e evitar o entupimento dos bicos.
Romboidade e Trincas	Cadastramento no estoque do almoxarifado bicos de abertura maior que a atual para a zona secundaria de sprays.	Cadastrando as peças no sistema.	Almoxarifado	Substituir os bicos utilizados na segunda zona de spray atualmente para garantir melhor resfriamento.
Rechupe	Elaborar critério para fechamento de veios que seja capaz de evitar a formação de rechupe nos tarugos.	Elaborando um critério que mantenha o aço dentro do molde antes de iniciar o procedimento de finalização de corrida.	Lingotamento Contínuo	Evitar a formação de defeitos por rechupe.

Sequenciamento de aços que não se misturam	Elaborar padrão de sequenciamento de aços com critérios bem definidos.	Elaborando um procedimento de rotina e treinando os operadores para sua utilização.	Lingotamento Contínuo	Evitar que ocorra sucateamento de tarugos devido à mistura de diferentes tipos de aço.
Não existe procedimento para reclassificação	Elaborar padrão para reclassificação por comprimento e por composição química.	Elaborando um procedimento de rotina e treinando os operadores para sua utilização.	Lingotamento Contínuo	Evitar o sucateamento desnecessários de tarugos que podem ser recuperados.
Não existe procedimento para reclassificação	Elaborar padrão para recuperação de tarugos bloqueados.	Elaborando um procedimento de rotina e treinando os operadores para sua utilização.	Área de recuperação de tarugos	Evitar o sucateamento desnecessários de tarugos que podem ser recuperados.
Falha na máquina de corte	Definir critérios para corte parcial do tarugo quando ocorrer falha em algum veio.	Definindo critérios de avaliação de atividades do oxicorte.	Oxicorte	Evitar acumulo de tarugos no oxicorte, ocasionando em fechamento de veios.
Defeitos superficiais ou internos	Acompanhar o desgaste dos moldes.	Realizando medições do desgaste dos moldes com frequência semanal.	Oficina de Moldes	Evitar que sejam realizadas corridas com moldes que estejam desgastados ou danificados.

Após a implementação dessas ações em abril de 2021 foi possível verificar uma melhora significativa no indicador de perdas metálicas por sucateamento de tarugos, se mantendo constante e abaixo de 3,0 kg/t nos meses seguintes. A curva desse indicador está ilustrada na Figura 5.7 a seguir:

Figura 5.7 – Curva do indicador de sucateamento entre janeiro de 2020 e julho de 2021.



6. CONCLUSÕES

Os dados coletados e os resultados obtidos a partir das análises realizadas nesse projeto permitiram avaliar a relevância de cada tipo de perda de processo e de perda por qualidade frente ao volume total de produção na célula de lingotamento continuo dessa acaria.

Foi feito um levantamento histórico do problema onde notou-se uma tendência de alta na curva do indicador de perdas metálicas por sucateamento de tarugos, que subiu progressivamente de 2,64 kg sucateados por tonelada de produção para 6,10 kg/t, um aumento de aproximadamente 130% em menos de 12 meses. Esse levantamento permitiu notar uma oportunidade de melhoria de performance na célula de lingotamento continuo.

Na etapa de identificação foi realizado o cálculo de ganho do possível retorno financeiro com a execução do projeto. Esse cálculo permitiu estimar um potencial de aproximadamente meio milhão de reais por ano com base no aumento da eficiência da produção, justificando a relevância desse projeto.

Foi realizada uma estratificação dividindo os problemas observados em dois grupos distintos: o primeiro grupo definido pelas perdas de processo e o segundo grupo pelas perdas de qualidade. Com o auxilio do Diagrama de Pareto ainda foi possível priorizar os problemas que apresentaram maior impacto no rendimento da produção no período observado. Os problemas mais recorrentes observados foram: Barra Curta, Desponte Fora, Final de LC, Romboidade, Empeno, Trincas, Incrustação e Blow Holes.

Durante a análise do problema foi elaborado um diagrama de Ishikawa como uma ferramenta visual para auxiliar na disposição das principais causas do problema, levantadas durante o brainstorming. Isso permitiu progredir para a quarta e ultima etapa do projeto, a elaboração do plano de ação com a técnica do 5W1H. Durante essa elaboração foram retomados conceitos estudados ao longo da revisão bibliográfica deste trabalho.

Por fim, com a implementação do plano de ação foi notada uma melhora de aproximadamente 150% no indicador de perdas metálicas por sucateamento de tarugos da célula de lingotamento contínuo ao longo dos meses subsequentes.

7. REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS

BRANION, R. V. Mold Fluxes for Continuous Casting. I&SM, p.41-50, September 1986.

CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, c2008. xx, 705 p.

CAMPOS, Vicente Falconi. TQC Controle da Qualidade Total. Rio de Janeiro: Bloch, 1992.

CHANDRA, S.; Brimacombe, J. K.; Samarasekera, I.V. Mould – strand interaction in continuous casting of steel billets. Part 3 – Mould heat transfer and taper. Ironmaking and Steelmaking, V. 20, Nº 02, pp. 104-112. (1993).

CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. amp. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p.

CHOW, C.; Samarasekera, I. V. High speed continuous casting of steel billets. Part 1: General overview. Ironmaking and Steelmaking, V. 29 Nº. 1, pp 53-60. (2002a).

CHOW, C.; Samarasekera, I. V.; Walker, B. N.; Lockhart, G. High speed continuous casting of steel billets. Part 2: Mould heat transfer and mould design. Ironmaking and Steelmaking, V. 29 Nº. 1, pp 61-69. (2002b).

GARCIA, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. Campinas, SP. Editora da Unicamp, (2001).

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A.; CHEUNG, N. Lingotamento contínuo dos aços. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2006.

HEAT flux in the mold. In: Steel University. Continuous Casting. 2007. Disponível em <http://www.steeluniversity.org/>. Acesso em: 25 de novembro 2007.

JUNIOR, Carlos. Ciclo PDCA, uma ferramenta imprescindível ao gerente de projetos, 2017. Disponível em: <https://www.doxplan.com/Noticias/Post/Ciclo-PDCA,-uma-ferramenta-imprescindivel-ao-gerente-de-projetos>. Acesso em: 1 nov. 2021.

Karlinski, V., Fogazzi, W., De Souza, B. V., Ferreira, C. R. F., Dos Santos, C. A., & Spim, J. A. (2009). a Ferrite Potential Influence on Heat Transfer Conditions in Industrial Mold During the Continuous Casting of Steels. Revista de Engenharia Térmica, 8(1), 18.

KULKARNI, M. S.; BABU, S. Managing quality in continuous casting process using product quality model and simulated annealing. Journal of Materials Processing Technology, v. 166, p. 294-306, 2005.

Lotov, A.V., Kamenev, G.K., Berezkin, V.E., Miettinen, K., 2005. Optimal control of cooling process in continuous casting of steel using a visualization-based multi-criteria approach. Applied Mathematical Modelling 29, 653–672.

PINHEIRO, C. A. M.; Samarasekera, I. V.; Brimacombe, J. K.; Walker, B. N. Mould heat transfer and continuously cast billet quality with mould flux lubrication: Part 1 Mould heat transfer. Ironmaking and Steelmaking, V. 27, Nº. 1, pp. 37-54, (2000).

RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos de lingotamento dos aços. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2006.

SAMARASEKERA, I.V.; Anderson, D.L.; Brimacombe, J. K. The thermal distortion of continuous-casting billet molds. Metallurgical Transactions B, V. 13B, pp.91-103. (1982).

SANTOS, C.A.; Fortaleza E.L.; Ferreira C.R.L.; Spim J.A.; Garcia A. A Solidification heat transfer model and a neural network based algorithm applied to the continuous casting of steel billets and blooms. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, V. 13, pp. 1-17. (2005).

VALADARES, C. A. G.. Curso de Lingotamento Contínuo de Placas. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

WOLF, M.M. A review of published work on the solidification control of steel in continuous casting moulds by heat flux measurement. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, v.20, n.10, p.718-724, 1980.

Xuan, H., Fernandes, P. C., Silva, A. L. da, & Scripnic, I. L. de M. (2018). Otimização Dos Parâmetros Do Lingotamento Contínuo Na Melhoria Da Qualidade Superficial Do Tarugo. October, 2483–2493.
<https://doi.org/10.5151/1982-9345-25220>