

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DO MATERIAL APÓS O
TRATAMENTO TÉRMICO À INDUÇÃO

Isadora Marques Grawer

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre,

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Grawer, Isadora Marques
Avaliação da homogeneidade do material após o
tratamento térmico à indução / Isadora Marques
Grawer. -- 2024.
47 f.
Orientador: Afonso Reguly.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Tratamento térmico à indução. I. Reguly, Afonso,
orient. II. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais e meus avós, Dora, Egon, Jorge e Suzana.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este momento especial para agradecer a todas as pessoas que contribuíram para que eu chegasse nesse momento.

Assim, gostaria de agradecer aos meus pais por todo suporte, compreensão, amor e me encorajar em minhas decisões.

Ao Prof. Dr. Afonso Reguly pela orientação e as dicas valiosas para a conclusão desse trabalho.

À CAPES pela oportunidade de realizar o programa de duplo diploma na França.

Aos meus tutores e operadores da empresa Ascometal pela confiança no meu trabalho, pelas orientações e apoio ao longo do estágio.

Aos meus amigos que me acompanharam e tornaram essa trajetória mais fácil.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. DIAGRAMA DE FERRO CARBONO	3
2.2. REVENIMENTO	5
2.3. FORNO POR INDUÇÃO	7
2.4. MICROESTRUTURA	8
2.4.1. Polifásica	8
2.4.2. Martensita	9
3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	12
3.1. SITUAÇÃO INICIAL DE DESEMPENHO DO FORNO	12
3.1.1. Taxa de rendimento sintético (TRS)	13
3.1.2. Causa raíz	16
3.2. PROPOSTA DE MELHORIA	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1. MATERIAL UTILIZADO	21
4.2. TRATAMENTO TÉRMICO	21
4.3. GEOMETRIA DAS BARRAS AVALIADAS	22
4.4. ENSAIO DE DUREZA	24
4.5. ENSAIO DE TRAÇÃO	25
4.6. METALOGRAFIA	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1. ENSAIO DE DUREZA	27

5.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO	28
5.3.	METALOGRAFIA	30
5.4.	EXPECTATIVA DE GANHOS	33
6	CONCLUSÕES	35
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	36
8	REFERÊNCIAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de fases de Ferro-Carbono.....	4
Figura 2: Sistema de aquecimento por indução aquecido por uma bobina solenoide.....	7
Figura 3: Exemplo da grade metalográfica para auxiliar no auxílio da análise da microestrutura.....	8
Figura 4: Efeito do teor de carbono nos pontos de martensita M e Mt.	10
Figura 5: Gráfico da dureza (à temperatura ambiente) em função da concentração de carbono para um aço-carbono.....	11
Figura 6: Média de produção por turno nos 4 primeiros meses de 2023.....	12
Figura 7: Eficiência do forno por indução de 2019 à 2023, sendo o primeiro trimestre de 2023	14
Figura 8: Comparativo da eficiência de produção entre os diferentes tipos de fornos da empresa.....	15
Figura 9: Gráfico da taxa de rendimento sintético (TRS) inicial e a meta de melhoria para atingir uma excelente eficiência	15
Figura 10: Diagrama de Ishikawa para identificação das causas raiz para o problema de baixa eficiência do forno	17
Figura 11: Diagrama de Pareto para as causas de parada de produção do forno por indução	18
Figura 12: Diagrama de Pareto para as causas de parada agrupando todos os problemas relacionados à serra.....	18
Figura 13: Esquema de funcionamento da linha por indução pelo método de barra contínua	19
Figura 14: Barras com a calda identificada numericamente na mesa de espera para serem cortadas	23

Figura 15: Pontos na metade do raio da amostra, onde serão realizados o ensaio de dureza.....	24
Figura 16: Resultados do ensaio de dureza realizado no comprimento de 5cm de cada extremidade nas 21 barras de Ø34,8mm	27
Figura 17: Resultados do ensaio de dureza realizado no comprimento de 5cm de cada extremidade nas 21 barras de Ø51,55mm	27
Figura 18: Resultado dos ensaios de tração em 6 barras de Ø34,8mm realizados no centro da barra	29
Figura 19: Resultado do ensaios de tração em 3 barras de Ø51,55mm realizado no centro da barra	29
Figura 20: Microestrutura polifásica da liga 42CrMo4 após a laminação, em amostras de 5cm da cabeça (a), meio (b) e calda (c) no aumento de 20x	30
Figura 21: Microestrutura polifásica da liga 42CrMo4 após a laminação, em amostras de 5cm da cabeça (a), meio (b) e9 calda (c) no aumento de 50x.	31
Figura 22: Microestrutura martensítica da liga 42CrMo4 após o tratamento térmico por indução, das amostras de 5cm retidas da cabeça (a), meio (b) e calda (c) no aumento 20x	32
Figura 23: Microestrutura martensítica da liga 42CrMo4 após o tratamento térmico por indução, das amostras de 5cm retidas na cabeça (a), meio (b) e calda (c) no aumento 50x	33
Figura 24: Gráfico da taxa de rendimento sintético (TRS) inicial, o TRS atingido e a meta do TRS para atingir uma excelente eficiência.....	34

RESUMO

A siderurgia desempenha um papel crucial na produção de aço, impactando significativamente a infraestrutura global e o cotidiano das pessoas. O aço, essencial na construção civil e em produtos de consumo, destaca-se por suas propriedades mecânicas excepcionais. Os tratamentos térmicos, especialmente nos aços, desempenham um papel fundamental na modificação dessas propriedades para atender às demandas específicas dos clientes. A inovação das linhas de tratamento térmico por indução tem sido crucial para elevar a eficiência na produção de aço. Ao contrário dos métodos tradicionais, o revenimento por indução, utilizando fornos elétricos, busca reduzir emissões de gases e economizar energia. Em 2017, a Ascometal, uma empresa francesa fundada em 1920, que faz parte do Swiss Steel Group, líder europeia na produção de aços especiais longos e com 5 sedes na França sendo a principal em Hagondange na França, implementou seu primeiro forno por indução, visando benefícios ambientais e econômicos. No entanto, desafios surgem com a implementação desse sistema, como a necessidade de garantir tratamentos homogêneos em todas as áreas das peças. Assim foram feitas análises nas barras metálicas para validar modificações estratégicas propostas no processo de produção para aumentar a capacidade de fabricação por este processo.

Palavras-chave: Aço, tratamento térmico, revenimento por indução, modificações na produção

ABSTRACT

A steel industry plays a crucial role in steel production, significantly impacting global infrastructure and people's daily lives. Steel, essential in construction and consumer products, stands out for its exceptional mechanical properties. Thermal treatments, especially in steels, play a key role in modifying these properties to meet specific customer demands. Innovation in induction heat treatment lines has been crucial in enhancing efficiency in steel production. Unlike traditional methods, induction hardening, using electric furnaces, aims to reduce gas emissions and save energy. In 2017, Ascometal, a French company founded in 1920 and part of the Swiss Steel Group, a leading European producer of long special steels with 5 locations in France, including its main headquarters in Hagondange, implemented its first induction furnace, aiming for environmental and economic benefits. However, challenges arise with the implementation of this system, such as the need to ensure homogeneous treatments in all areas of the pieces. Thus, analyses were conducted on the metal bars to validate strategic modifications proposed in the production process to increase manufacturing capacity through this process.

Keywords: Steel, heat treatment, induction tempering, Production process modifications

1 INTRODUÇÃO

A siderurgia, como setor fundamental na produção de aço, desempenha um papel vital na infraestrutura global e exerce um impacto significativo na vida cotidiana das pessoas. O aço, com suas propriedades mecânicas excepcionais, é uma peça-chave na construção civil, na fabricação de veículos, em equipamentos industriais e em uma variedade de produtos de consumo. Ele está presente desde estruturas monumentais até objetos do nosso dia a dia.

Nesse cenário, os tratamentos térmicos surgem como protagonistas, permitindo a transformação das propriedades mecânicas dos metais, particularmente no contexto siderúrgico. Especificamente com os aços, os tratamentos térmicos são essenciais para modificar as propriedades mecânicas dos metais, atendendo às exigências específicas dos clientes, dependendo das aplicações previstas para as peças.

A implementação de linhas de tratamento térmico por indução surgiu como uma inovação para elevar a eficiência na produção de aço. Além disso, um dos principais objetivos da linha de têmpera por indução é a redução das emissões de gases de efeito estufa e a economia de energia.

Diferentemente dos métodos tradicionais de tratamento térmico que utilizam fornos a gás, o aquecimento por indução baseia-se no uso de energia elétrica para geração de calor. Isso possibilita uma considerável redução nas emissões de gases, permitindo que os clientes das siderúrgicas comercializem seus produtos como sendo de baixo impacto ambiental. Simultaneamente, a indução eletromagnética oferece vantagens significativas em termos de economia de energia, já que essa tecnologia permite o aquecimento rápido e eficiente das peças metálicas, resultando em uma redução notável no consumo de energia.

A Ascometal, uma empresa líder europeia na produção de aço especial de alta qualidade, desempenha um papel importante nesse cenário, fornecendo materiais que atendem às exigências rigorosas das aplicações siderúrgicas e industriais. Seus produtos

são amplamente utilizados em diversas indústrias, desde automotiva até construção civil, destacando-se pela qualidade e confiabilidade.

No entanto, junto da implementação desse sistema surgem desafios, como a necessidade de garantir tratamentos homogêneos em todas as áreas das peças. Este trabalho abordará a modificação no método de alimentação das barras no forno a indução. Além de verificar a uniformidade das barras.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é direcionado à avaliar um novo processo de alimentação das barras em um forno à indução e verificar as propriedades mecânicas e as microestruturas das barras, após a passagem pelo forno, a fim de validar o novo método aplicado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obter uma visão global do desempenho do forno, através de uma análise inicial da produção e eficiência da produção pelo forno, identificando as principais causas de paradas e problemas.

Conduzir ensaios de dureza e tração para verificar a uniformidade do tratamento térmico no novo método de alimentação.

Avaliar a homogeneidade do tratamento térmico das barras por meio de análise metalográfica, especialmente as extremidades.

Realizar uma comparação dos ganhos em termos de produção decorrentes da implementação do novo método de alimentação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, será realizada uma breve revisão da literatura. é baseado em um contexto industrial, há poucos trabalhos similares na literatura acadêmica. Portanto, essa revisão abordará conceitos relevantes ao tema, visando aprofundar a compreensão sobre a motivação pelo qual este estudo foi realizado.

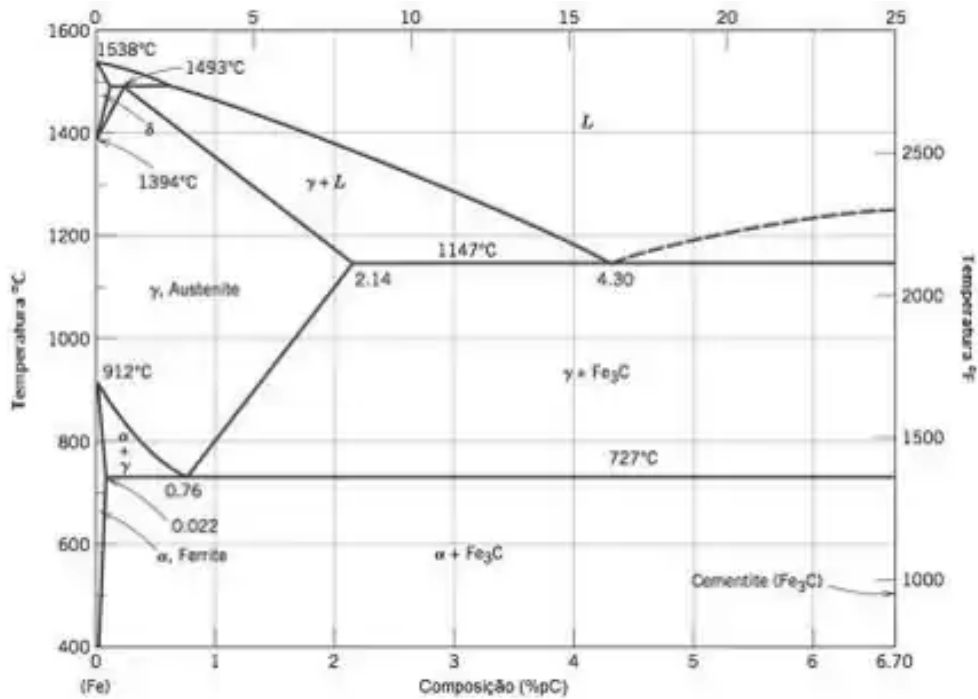
2.1. DIAGRAMA DE FERRO CARBONO

Muitos aços devem suas propriedades especiais à presença de certos elementos de liga. O carbono é o elemento mais importante que controla as propriedades de todos os aços. O diagrama que representa as temperaturas nas quais ocorrem mudanças de fase durante o resfriamento ou aquecimento muito lentos, e em relação ao teor de carbono, é chamado de diagrama de fases ferro-carbono. Este diagrama é a base para uma compreensão correta de todas as operações de tratamento térmico. (PRABHUDEV, 1988)

Ele abrange uma ampla variedade de ligas, que são categorizadas como ferro sem carbono, aço carbono e ferros fundidos. O teor de carbono nessas ligas varia de 0 a até aproximadamente 6%. Os aços, que são ligas de ferro, têm teores de carbono relativamente baixos, geralmente até cerca de 2% em massa. Ligas que ultrapassam esse limite de carbono são chamadas de ferros fundidos. (PRABHUDEV, 1988)

O diagrama Fe-C mostra quais fases podem ser esperadas em equilíbrio (ou equilíbrio metaestável) para diferentes combinações de concentração de carbono e temperatura. (COMMITTEE, 1991)

Figura 1: Diagrama de fases de Ferro-Carbono



Fonte: CALLISTER JR W, 2018

O ferro puro, ao ser aquecido, apresenta duas mudanças de estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente, a forma estável, chamada de ferrita, ou ferro α , apresenta uma estrutura cristalina CCC. A ferrita, a 912°C (1674°F), apresenta uma transformação polimórfica para austenita CFC, ou ferro γ . Essa austenita persiste até 1394°C (2541°F), quando a austenita CFC se reverte, novamente, a uma fase CCC, chamada de ferrita δ , e, finalmente, se funde a 1538°C (2800°F). Todas essas mudanças ficam evidentes ao longo do eixo vertical, à esquerda, no diagrama de fases. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

Na ferrita CCC, somente pequenas concentrações de carbono são solúveis; a solubilidade máxima é de 0,022 % em massa, a 727°C (1341°F). A solubilidade limitada é explicada pela forma e pelo tamanho das posições intersticiais CCC, que tornam difícil acomodar os átomos de carbono. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; PRABHUDEV, 1988)

A austenita, é uma solução sólida na qual átomos substitucionais de soluto estão frequentemente presentes; os mais comuns para aços incluem manganês, silício, níquel e cromo. Em aços de baixa liga, esses elementos podem ser assumidos como ocupando

locais de rede de forma aleatória, e, portanto, a solução austenítica mantém sua simetria cúbica. (TAYLOR, 1985). Sua solubilidade máxima do carbono é de 2,14 % em massa e ocorre a 1147°C (2097°F). Essa solubilidade é aproximadamente 100 vezes maior que o valor máximo para a ferrita CCC. (DO VALE, 2011)

A cementita (Fe₃C) forma-se quando o limite de solubilidade para o carbono na ferrita α é excedido abaixo de 727°C (1341°F) (para composições na região das fases α + Fe₃C). Como está indicado na Figura 9.24, o Fe₃C também coexistirá com a fase γ entre 727°C e 1147°C (1341°F e 2097°F). Mecanicamente, a cementita é muito dura e frágil; a resistência de alguns aços é aumentada substancialmente por sua presença. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

Cementite é uma fase metaestável dessa liga com uma composição fixa de Fe₃C. Ela se decompõe extremamente lentamente à temperatura ambiente em ferro e carbono (grafite). A cementite é dura e quebradiça, o que a torna adequada para fortalecer os aços. Suas propriedades mecânicas são uma função de sua microestrutura, que depende de como ela é misturada com ferrita. (VELLING, 2020)

A presença da cementita é fundamental, uma vez que ela desencadeia a formação de uma estrutura eutetóide de grande importância nos estudos sobre aços, conhecida como perlita, a qual é uma combinação de ferrita (α) e cementita (Fe₃C).

2.2. REVENIMENTO

A abordagem convencional para alcançar alta resistência e dureza envolve a formação de uma estrutura totalmente martensítica por meio da austenitização e subsequente têmpera [5,6]. No entanto, essa estrutura convencional frequentemente exhibe fragilidade e ductilidade limitada devido ao substancial estresse interno induzido pela transformação martensítica. Conseqüentemente, há uma necessidade urgente de explorar estratégias que possam ajustar finamente a microestrutura do aço. (GAO et al., 2023)

O revenimento rápido em alta temperatura é benéfico para liberar as tensões residuais. (WANG et al., 2024)

Quando o aço é temperado é duro, porém susceptível a desenvolver trincas de têmpera, especialmente em aços para ferramentas. Assim, os aços na condição de

potencialmente endurecidos são de utilidade limitada. Para superar isso, o aço temperado deve passar para uma condição estável. No entanto, esse estado de equilíbrio ou estável não pode ser alcançado imediatamente à temperatura ambiente devido à baixa mobilidade dos átomos. À medida que a temperatura aumenta, a mobilidade dos átomos aumenta devido à taxa acelerada de difusão. Isso resulta em uma mudança estrutural do aço temperado, dando origem a um estado estável. Na prática, esse processo é conhecido como revenimento. Pelo revenimento, a ductilidade pode ser aumentada e a resistência diminuída. Para a maioria dos aços estruturais, o objetivo é obter uma combinação de alta resistência, ductilidade e tenacidade. Portanto, o revenimento após o endurecimento torna o aço mais útil ao proporcionar uma estrutura estável, o que é essencial para aplicações práticas. (PRABHUDEV, 1988)

O tratamento de revenimento constitui uma etapa crítica na otimização das propriedades mecânicas e resistência à corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos (MSSs) [7]. Através desse processo, a microestrutura passa por modificações, impactando vários aspectos do comportamento do material. Em primeiro lugar, o revenimento em diferentes temperaturas induz ajustes na densidade de discordâncias e no tamanho de grão, influenciando assim o delicado equilíbrio entre resistência e ductilidade [8,9]. Em temperaturas mais elevadas de revenimento, a densidade de discordâncias diminui e ocorre crescimento de grão, resultando em uma resistência reduzida, mas uma ductilidade aprimorada. Em segundo lugar, durante o revenimento, os carbonetos com alta densidade tendem a precipitar-se ao longo dos contornos de grão e defeitos dentro da estrutura martensítica. (GAO et al., 2023)

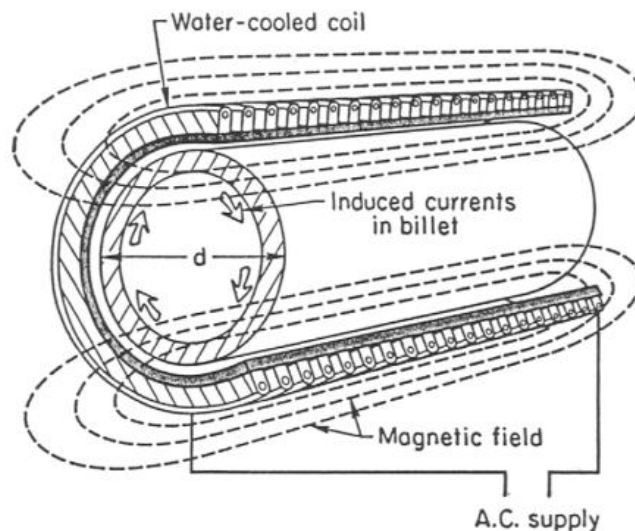
Normalmente, o revenido é conduzido em temperaturas entre 250°C e 650°C (480°F e 1200°F); as tensões internas, no entanto, podem ser aliviadas em temperaturas tão baixas quanto 200°C (390°F). Esse tratamento térmico de revenido permite, por meio de processos de difusão, a formação da martensita revenida. A microestrutura da martensita revenida consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas em uma matriz contínua de ferrita α . A tenacidade e a ductilidade são aumentadas de maneira significativa pelo revenido. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

2.3. FORNO POR INDUÇÃO

A indução de aquecimento sem núcleo está sendo utilizada em uma variedade crescente de aplicações industriais que requerem o aquecimento ou fusão de materiais sólidos condutores.

O princípio do aquecimento por indução é ilustrado na Figura 2. Quando uma bobina de cobre é enrolada ao redor de uma peça de trabalho condutora e uma corrente alternada é passada pela bobina, um campo magnético é estabelecido, fazendo com que uma corrente também flua na carga. A corrente diminui exponencialmente em magnitude da superfície para o centro da peça de trabalho. A profundidade até a qual a corrente flui depende da resistividade da carga, sua permeabilidade e a frequência da corrente alternada. Para o aço, os dois fatores-chave são suas propriedades magnéticas e a frequência da fonte de energia de corrente alternada. (CHEREMISINOFF, 1996)

Figura 2: Sistema de aquecimento por indução aquecido por uma bobina solenoide



Fonte: CHEREMISINOFF, 1996

A temperatura do revenimento adotada para eliminar tensões internas e proporcionar a relação desejada entre resistência e tenacidade para aços estruturais é de aproximadamente 500-650°C. Essa temperatura de revenimento também é adotada para melhorar a usinabilidade. (PRABHUDEV, 1988)

De acordo com (CENGEL; BOLES, 2018) a taxa de aquecimento é proporcional à diferença de temperatura entre a peça e o meio de aquecimento. Ou seja, quanto maior a temperatura, mais rápido o aquecimento será realizado.

No entanto, no forno por indução, devido a rapidez do tratamento térmico, a temperatura deve ser mais elevada, a fim de compensar o tempo reduzido do processo. É crucial, contudo, que essa temperatura seja suficientemente elevada para ocorrer a alteração na estrutura do material, mas não tão alta a ponto de causar danos à peça.

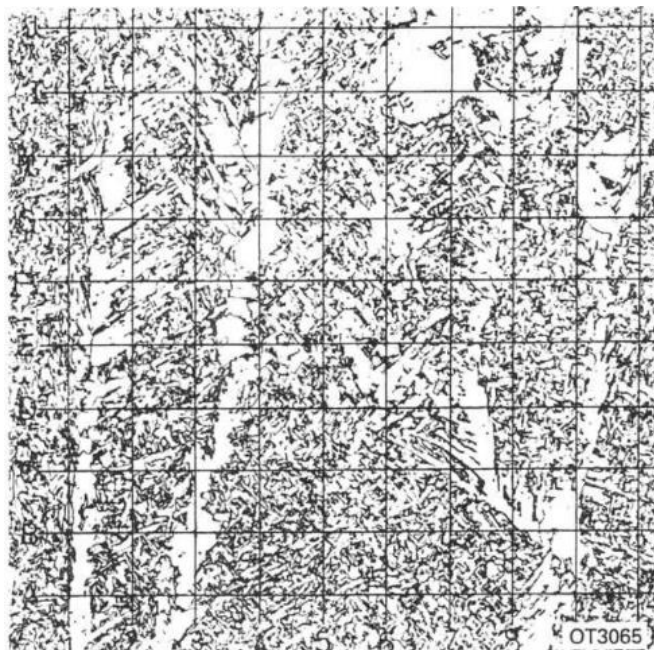
2.4. MICROESTRUTURA

2.4.1. Polifásica

A fim de identificar os constituintes microestruturais em metais heterogêneos foi desenvolvido um esquema pela subcomissão IXJ do IIW. (OF WELDING (IIW), 1988)

A amostra é dividida em uma grade metalográfica, composta por quadrados, como exemplificada na Figura 3. Cada quadrado da grade é examinado minuciosamente com o auxílio de um microscópio óptico. Durante essa análise visual, o foco está na identificação das diferentes microestruturas, tais como ferrita, perlita, martensita, cementita, entre outras. Cada observação é cuidadosamente registrada e documentada.

Figura 3: Exemplo da grade metalográfica para auxiliar no auxílio da análise da microestrutura



Fonte: OF WELDING (IIW), 1988

2.4.2. Martensita

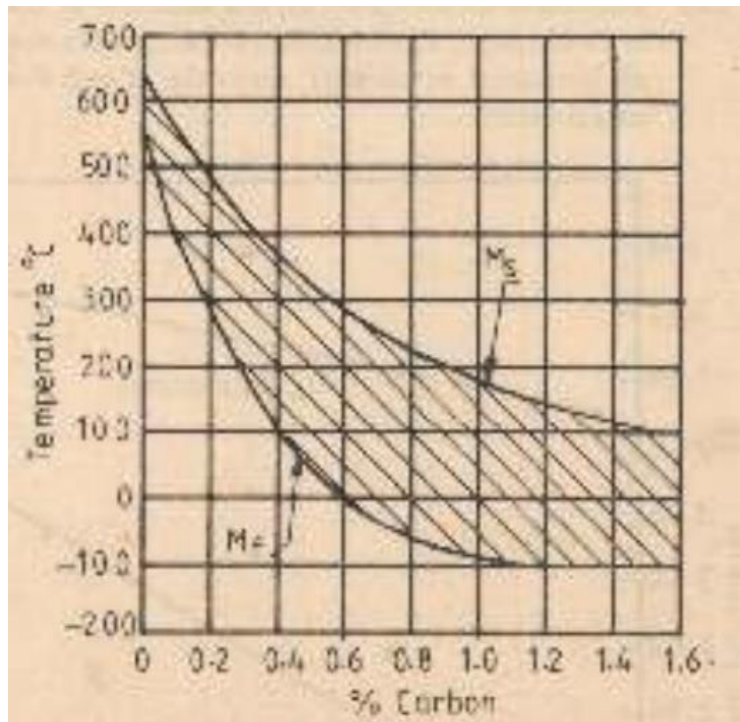
A martensita é classicamente uma transformação extremamente rápida e sem difusão, onde o carbono é retido em solução. À medida que a estrutura da austenita muda de CFC para a necessária estrutura TCC da martensita, as considerações de energia de deformação predominam e a martensita é estrangida a se apresentar na forma de placas finas. (THEWLIS, 2004)

A martensita é uma estrutura monofásica fora do equilíbrio que resulta de uma transformação em que não há difusão. Ela pode ser considerada como um produto da transformação que concorre com a perlita e a bainita. A transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é rápida o suficiente para prevenir a difusão do carbono. Qualquer difusão que porventura ocorra resultará na formação das fases ferrita e cementita. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

Ela é uma solução sólida supersaturada de carbono e outros elementos no ferro alfa com uma estrutura cristalina distorcida. (PRABHUDEV, 1988)

O início e o término da formação da martensita dependem da composição química do aço e das condições do tratamento de austenitização. Em aços carbono, as temperaturas de início e final da formação da martensita, M_s e M_f , respectivamente, dependem do teor de carbono, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4: Efeito do teor de carbono nos pontos de martensita M_f e M_s .

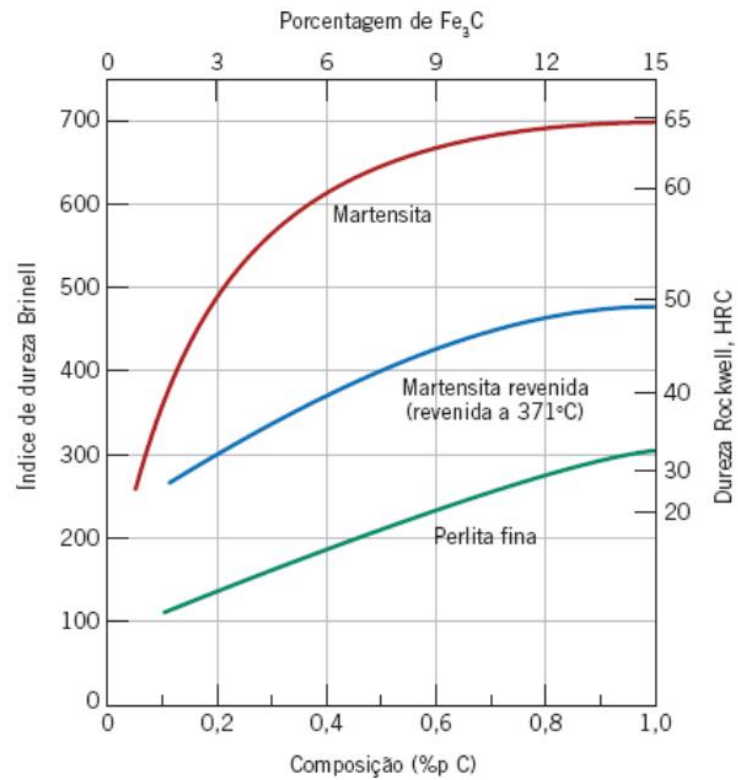


Fonte: PRABHUDEV, 1988

Quanto maior o percentual de carbono no aço, menores são as temperaturas de início e fim da formação da martensita. Além do carbono, elementos como manganês, silício, níquel, cromo, molibdênio e tungstênio tendem a diminuir o ponto M_f dos aços. A redução no ponto M_f é proporcional à quantidade do elemento dissolvido na austenita. (PRABHUDEV, 1988)

Sua dureza depende do teor de carbono até aproximadamente 0,6 % massa, como demonstrado na Figura 5, na qual está traçada a dureza da martensita e da perlita fina em função da porcentagem em peso de carbono. Em contraste aos aços perlíticos, acredita-se que a resistência e a dureza da martensita não estejam relacionadas com sua microestrutura. Em vez disso, essas propriedades são atribuídas à eficiência dos átomos intersticiais de carbono em restringir o movimento das e ao número relativamente pequeno de sistemas de escorregamento (ao longo dos quais as discordâncias se movem) existentes na estrutura TCC. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

Figura 5: Gráfico da dureza (à temperatura ambiente) em função da concentração de carbono para um aço-carbono



Fonte: CALLISTER JR W, 2018

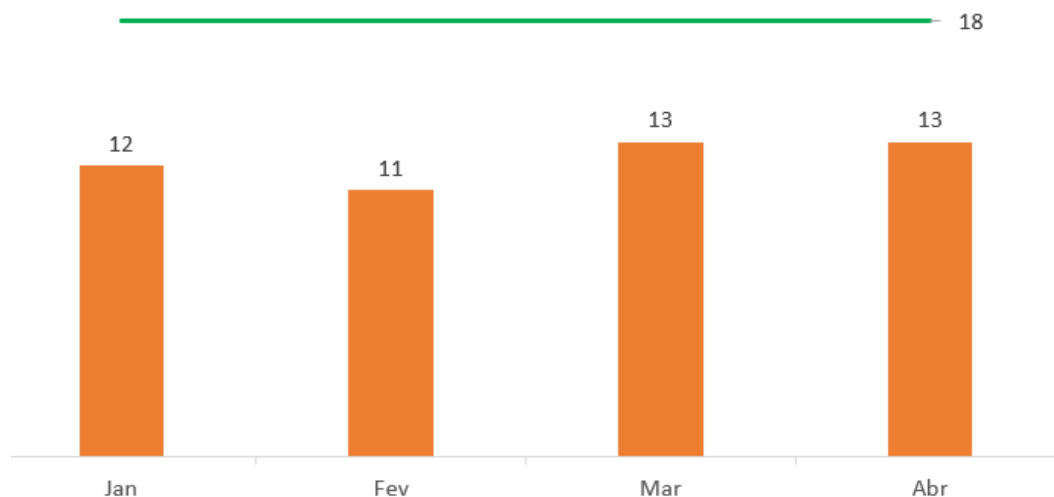
3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

3.1. SITUAÇÃO INICIAL DE DESEMPENHO DO FORNO

Primeiramente, foram coletados os dados de desempenho da produção para avaliar a situação atual da linha de produção. Para isso, usou-se a quantidade de toneladas produzidas por turno de trabalho, a qual é anotada diariamente para monitorar a situação da produção.

A Figura 6 apresenta a média de produção por turno para os quatro primeiros meses do ano de 2023.

Figura 6: Média de produção por turno nos 4 primeiros meses de 2023



Fonte: De autoria própria

A partir dos dados apresentados na Figura 2, constata-se que a média mensal de produção em toneladas por turno para cada mês do ano de 2023, foi de 12 T/turno. Além disso, uma linha superior é traçada para representar a meta de produção a ser alcançada. Pode-se observar uma produção com pouca variação, no entanto, claramente inferior à meta estabelecida.

A análise desse gráfico destaca a necessidade de uma melhoria significativa na produção, exigindo um aumento de 50% para atingir a meta. Os resultados obtidos levaram à implementação de ferramentas analíticas para realizar uma avaliação aprofundada da produção. O objetivo fundamental dessa abordagem é compreender os

fatores fundamentais responsáveis pelos resultados inferiores, determinar as variáveis que afetam esses números e identificar as ações estratégicas a serem implementadas para otimizar o indicador de produção.

3.1.1. Taxa de rendimento sintético (TRS)

A taxa de rendimento sintético (TRS) é um indicador utilizado para avaliar o desempenho da produção de uma empresa. Nesse contexto, o TRS mede a eficiência global com a qual os recursos de produção são utilizados para gerar produtos ou serviços. Ele é calculado levando em consideração alguns fatores: disponibilidade, qualidade da produção e eficiência das máquinas.

Disponibilidade: Mede a eficiência operacional de um meio, considerando todas as paradas detectáveis que afetam seu rendimento, sejam elas planejadas ou não. Essas paradas podem ser causadas por fatores internos, dependentes da máquina (ajustes, falhas, etc.), ou por fatores externos, que não dependem da máquina (falta de pessoal, escassez de energia, falta de matérias-primas, etc.).

Qualidade: Mede a proporção de peças fabricadas que não atendem às normas de qualidade, exigências, especificações e expectativas, incluindo aquelas que precisam ser retrabalhadas. Em outras palavras, o TRS para a qualidade avalia a porcentagem de produtos defeituosos ou não conformes em toda a produção.

Performance: Refere-se à capacidade de operar de maneira ótima e eficaz no processo de fabricação. Isso significa que a máquina opera à velocidade máxima possível quando está em funcionamento.

Para determinar a eficácia da linha de têmpera por indução, utiliza os dados registrados automaticamente pelo sistema, os registros feitos em diferentes arquivos e os relatórios de produção manuais elaborados pelos operadores. Esses dados são coletados e agrupados em um único arquivo. Como o forno opera com barras de características diferentes e o tratamento térmico não é uniforme para todos os tipos de barra, não é possível definir um tempo de ciclo ideal para o forno e fixar um número específico de barras por hora.

Devido a essa falta de padronização, as fórmulas de disponibilidade e desempenho necessitam ser modificadas para se adaptar a esse formato de produção. Assim, as fórmulas utilizadas são:

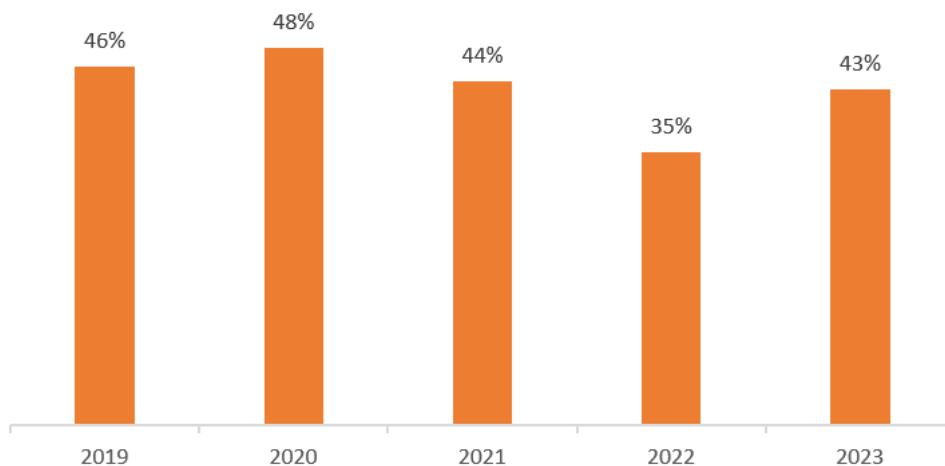
$$Disponibilidade = \frac{\text{Tempo de funcionamento efetivo}}{\text{Tempo de produção planejado}}$$

$$Performance = \frac{\text{Tempo de produção efetivo}}{\text{Tempo real de funcionamento do forno}}$$

$$Qualidade = \frac{\text{Nº de barras boas}}{\text{Nº de barras produzidas}}$$

Para obter uma visão global da linha, foram realizadas diferentes análises de desempenho. A primeira foi uma análise realizada para os anos anteriores, desde a instalação da máquina. Como é possível ver na Figura 7, em 2022, foi observado um desempenho de produção anormal sem uma explicação. Portanto, ao calcular a média do forno, esse fenômeno foi excluído, resultando em uma média de eficiência de 45%.

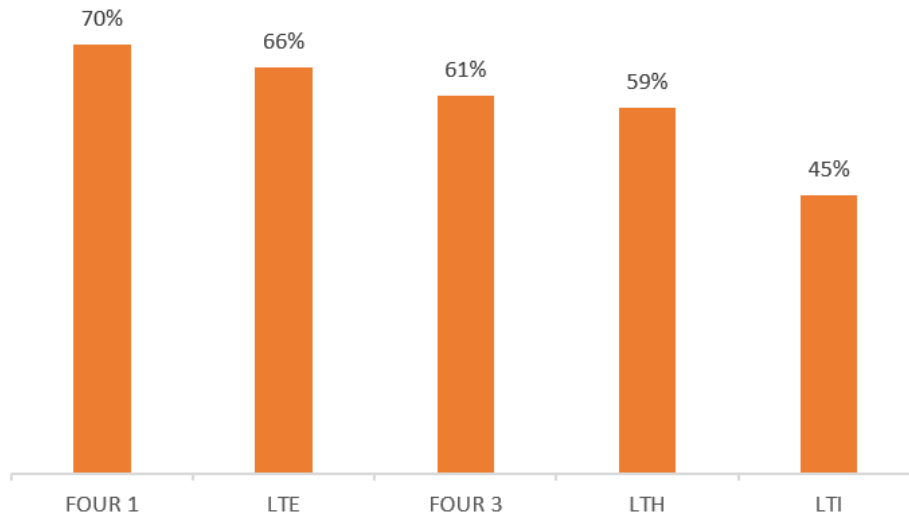
Figura 7: Eficiência do forno por indução de 2019 à 2023, sendo o primeiro trimestre de 2023



Fonte: De autoria própria

Por fim, uma comparação entre os diferentes fornos da fábrica foi realizada para obter um comparativo de eficiência da produção da empresa. Para isso, as mesmas fórmulas foram aplicadas a cada um dos fornos, resultando no seguinte resultado:

Figura 8: Comparativo da eficiência de produção entre os diferentes tipos de fornos da empresa

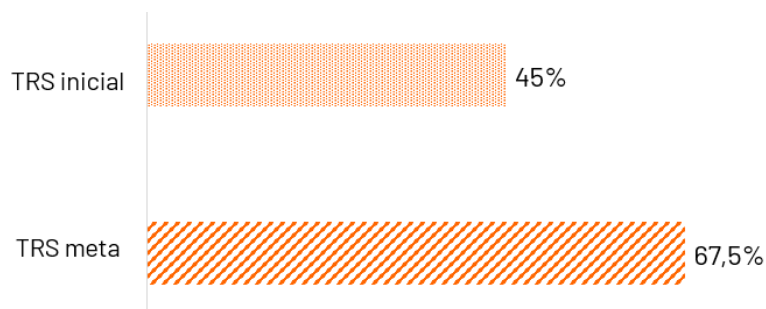


Fonte: De autoria própria

A Figura 8 revela que a taxa de produção é particularmente baixa no forno por indução, enquanto todos os outros fornos têm taxas de cerca de 60% ou mais. Como previsto, esse é um resultado inferior, tanto em comparação com os outros fornos da empresa quanto em termos de rentabilidade da produção.

Com base nessa análise, percebe-se que a taxa de rendimento sintético da linha é de 45% e para atingir o objetivo de melhoria na produção de 18 T/turno, uma melhoria de 50% é necessária. Isso significa que a meta deste trabalho é alcançar uma taxa de eficiência de 67,5%, como mostrado na Figura 9.

Figura 9: Gráfico da taxa de rendimento sintético (TRS) inicial e a meta de melhoria para atingir uma excelente eficiência



Fonte: De autoria própria

3.1.2. Causa raíz

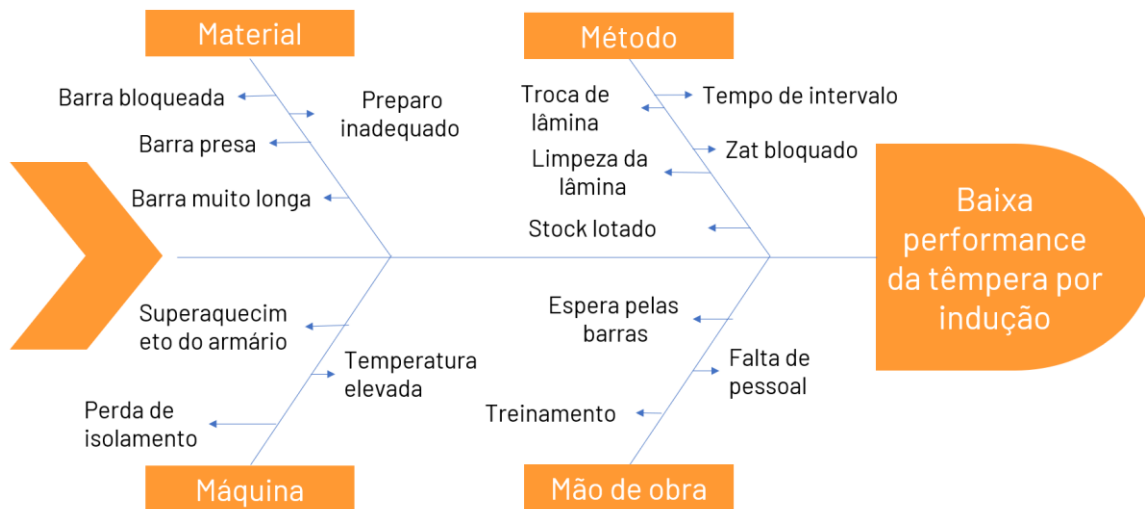
Na sequência foi realizado o diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de espinha de peixe ou diagrama de causa e efeito, o qual é uma ferramenta visual usada para identificar e organizar as causas potenciais de um problema.

O objetivo deste diagrama é permitir uma análise sistemática das causas potenciais de um problema ou efeito, facilitando a compreensão das relações entre diferentes causas e ajudando a identificar soluções possíveis para resolver o problema.

O diagrama de Ishikawa é construído na forma de uma espinha de peixe, onde o efeito ou problema que se deseja analisar é colocado na extremidade direita e é conectado por uma linha principal a uma coluna central. Esta coluna central representa o problema a ser analisado. A partir desta coluna central, são desenhadas arestas para representar diferentes categorias de causas potenciais. Essas categorias são geralmente divididas em torno dos seis M: Matéria, Mão de obra, Métodos, Meio ambiente, Material e Medidas. No entanto, as categorias podem ser ajustadas conforme um problema específico.

Durante a análise das causas gerais, as categorias foram reorganizadas em novas categorias de paradas para melhor identificar aquelas que têm um impacto mais significativo na redução do desempenho. Essas novas categorias são: paradas de fabricação, intervalos entre lotes, limpeza da serra, falhas elétricas, mecânicas e problemas com a serra. Essas causas, apresentadas na Figura 10, foram consideradas como possíveis causas-raiz do problema.

Figura 10: Diagrama de Ishikawa para identificação das causas raiz para o problema de baixa eficiência do forno



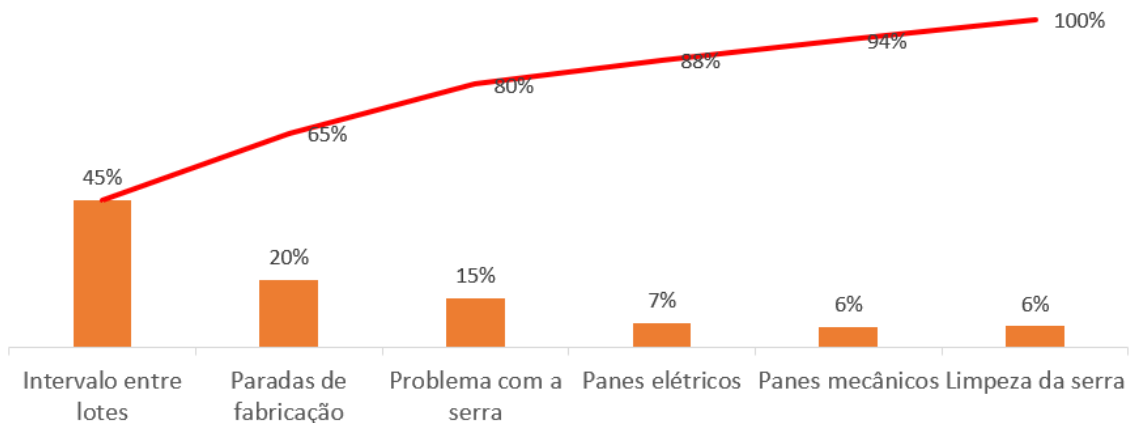
Fonte: De autoria própria

O diagrama de Pareto é uma ferramenta visual de gestão que permite identificar, classificar e hierarquizar os elementos ou causas que exercem a maior influência sobre um problema. Ele fundamenta-se no 'princípio de Pareto', também conhecido como regra 80/20, que destaca que a maior parte das consequências é resultante de uma minoria de causas. Através do diagrama de Pareto, é possível direcionar os esforços para as causas predominantes, visando alcançar melhorias significativas e direcionadas.

Este diagrama consiste em um gráfico de barras, onde as causas ou elementos são representados no eixo horizontal, enquanto o eixo vertical representa a frequência, impacto ou outra medida relevante. As barras são dispostas da esquerda para a direita em ordem crescente de sua contribuição para a situação analisada. Uma linha cumulativa também é traçada para mostrar a porcentagem acumulada do impacto total.

No caso representado pela Figura 11 foram utilizadas as 6 categorias baseadas no Diagrama de Ishikawa para a classificação: paradas de fabricação, intervalo entre lotes, limpeza da serra, falhas elétricas, mecânicas e problemas com a serra.

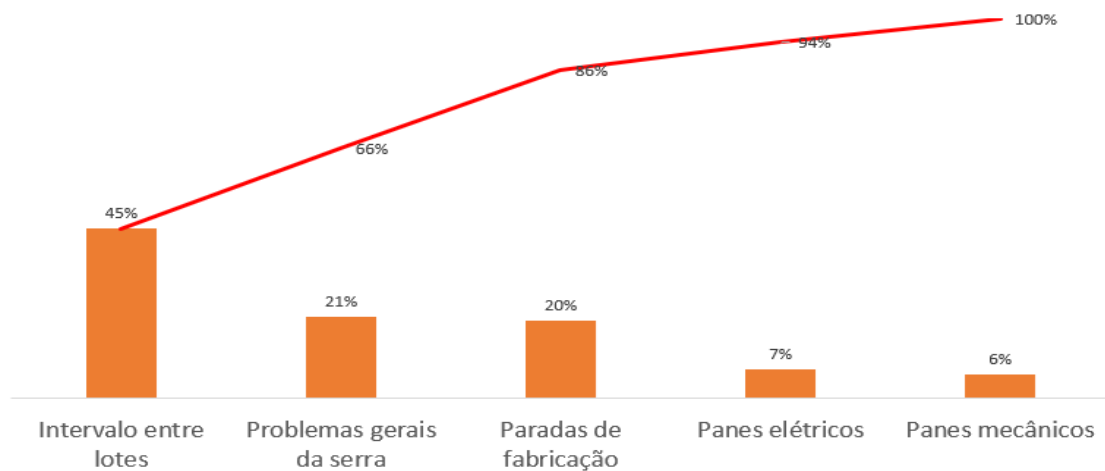
Figura 11: Diagrama de Pareto para as causas de parada de produção do forno por indução



Fonte: De autoria própria

Neste diagrama de Pareto, fica evidente que a causa principal das paradas está relacionada aos intervalos entre lotes. No entanto, se juntarmos os problemas relacionados à serra, problemas com a serra e limpeza da serra, podemos observar na Figura 12 que os problemas relacionados à serra representam 21% de todas as causas, sendo o segundo problema mais significativo.

Figura 12: Diagrama de Pareto para as causas de parada agrupando todos os problemas relacionados à serra



Fonte: De autoria própria

3.2. PROPOSTA DE MELHORIA

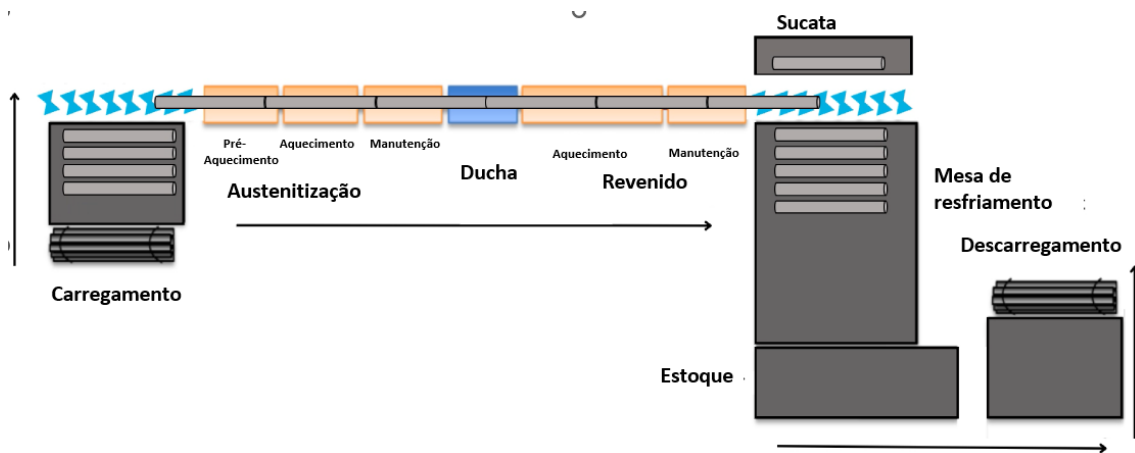
A baixa eficiência global da máquina pode ser atribuída ao seu princípio de funcionamento, que, devido aos espaços entre as barras durante a passagem pelo forno

resultam em extremidades com tratamento térmico não homogêneo. Esse fator requer o uso de uma serra no final da linha para realizar cortes. Como os problemas gerais relacionados à serra representam 21% das causas, tornando-se a segunda causa principal, este novo princípio de funcionamento destacará especialmente a melhoria dessa causa de tempo de parada.

O princípio da barra contínua, ao contrário do sistema atual, permitirá, como o próprio nome indica, a produção em barras contínuas. Isso envolve ajustar a velocidade dos rolamentos, permitindo que as barras entrem na linha coladas umas às outras e ao final os rolamentos acelerem igualmente para descolá-las.

Essa transformação proporcionará que o forno permaneça ligado na entrada de cada barra, resultando em um tratamento térmico uniforme e completo das barras, apresentado na Figura 13. Com isso, não será mais necessário cortar as extremidades das barras, eliminando o uso de uma serra.

Figura 13: Esquema de funcionamento da linha por indução pelo método de barra contínua



Fonte: De autoria própria

Para implementar esse método de produção, algumas modificações foram feitas no sistema informático, incluindo a nova velocidade dos rolamentos e a eliminação da distância entre as barras.

No entanto, como as barras estão coladas umas às outras, os sensores distribuídos ao longo do forno não detectam o início e o final das barras. Isso significa que é impossível garantir um rastreamento preciso da posição das barras durante seu percurso,

conhecido como 'rastreamento de barras'. Isso resultará, inicialmente, que a produção não será otimizada como prevista, pois haverá perdas adicionais de barras.

Todavia, antes de implementar esse princípio de produção, é essencial realizar testes de caracterização mecânica e microestrutura para garantir que a qualidade do metal será mantida. Esses ensaios são cruciais para assegurar a integridade e as propriedades desejadas das barras durante o processo, contribuindo para a garantia da qualidade do produto final.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAL UTILIZADO

Para a realização deste estudo de caso, foram empregados dois lotes de fabricação distintos com os seguintes códigos: AR537AF e AM814BI. O primeiro trata-se de um material com diâmetro de 34,8 mm, composto pela liga 42NCD2GUBi (denominação da empresa) ou 42NiCrMo2. Essa liga apresenta as seguintes composições percentuais: C: 0,42%, Ni: 0,5%, Cr < 0,5%, Mo < 0,5%. Vale ressaltar que a empresa ASCOMETAL inclui designações adicionais, como "GU.Bi", indicando condições específicas, como $0,020 < \% S < 0,050\%$ e a adição de Telúrio e Bismuto, com o objetivo de melhorar a usinabilidade.

Quanto às características dessa liga, destaca-se sua resistência mecânica e tenacidade, sendo frequentemente utilizada em aplicações que demandam alta resistência ao desgaste, como componentes mecânicos.

O lote AM814BI refere-se à liga 42CrMo4, com uma composição percentual de C: 0,42%, Cr: 1% e Mo < 1%. As características desta liga incluem boa temperabilidade, alta resistência e tenacidade, sendo bastante utilizada na fabricação de componentes mecânicos, como engrenagens, eixos, e peças estruturais em geral.

4.2. TRATAMENTO TÉRMICO

Após a fase de laminação, as barras foram submetidas a um tratamento térmico por indução. As bobinas eletromagnéticas são de dois tamanhos, para diâmetros de 20 a 34,9mm e de 35 a 60mm. Esse forno é programado de acordo com os critérios estabelecidos pelo cliente para cada lote de produção. A regulação das temperaturas ocorre por meio do controle de tensão, possibilitando aumentos ou reduções para atingir as temperaturas especificadas.

O processo de tratamento térmico realizado neste forno de indução é segmentado em diferentes etapas. Inicialmente, a barra passa por três fases de austenitização, sendo elas pré-aquecimento, aquecimento e manutenção, todas ocorrendo a uma temperatura

aproximada de 920°C. Em seguida, a barra é submetida à ducha ou têmpera, onde recebe jatos de água com uma vazão de 15L/s.

Posteriormente, a barra passa pelo reaquecimento, também conhecido como revenido, composto por duas etapas: aquecimento e manutenção. Esta etapa ocorre a temperaturas em torno de 700°C. Por fim, as barras são retiradas do forno e resfriadas à temperatura ambiente sobre a mesa de resfriamento.

No contexto deste trabalho, os parâmetros variáveis para cada lote são as temperaturas e o tempo de permanência durante as etapas de austenitização e o revenido. No caso da liga AR537AF, a austenitização foi realizada a 910°C com um tempo de 25,68 segundos, o resfriamento na ducha à 80°C e o revenido ocorreu a 715°C por 51,72 segundos. Para a liga AM814BI, os parâmetros foram de 900°C e 57,78 segundos para a austenitização, os mesmos 80°C na ducha e 710°C com um tempo de permanência de 115,5 segundos para o revenido.

Devido às variações naturais de temperatura ao longo do processo, é estabelecida uma tolerância de $\pm 15^\circ\text{C}$. Se a temperatura sair dessa faixa por mais de 5 segundos, as barras localizadas na posição afetada são automaticamente descartadas pela máquina. Este procedimento visa garantir a conformidade com os padrões de qualidade e assegurar que as propriedades desejadas sejam alcançadas durante o tratamento térmico.

4.3.GEOMETRIA DAS BARRAS AVALIADAS

Com base nos resultados dos testes anteriores, foi observado que o princípio da barra contínua não funciona para diâmetros pequenos. Essa situação está relacionada à força exercida para unir as barras, o que às vezes causa sobreposição entre elas.

Para remediar essa situação, decidiu-se realizar testes com um grande e um pequeno diâmetro, para ter uma visão precisa das extremidades, que são as mais críticas. Os diâmetros escolhidos foram $\varnothing 34,8\text{mm}$ e $51,55\text{mm}$. Esses testes eram necessários para garantir que os resultados obtidos pudessem ser generalizados para todos os diâmetros tratados na linha de produção, acima de 30 mm.

O processo de coleta dos corpos de prova incluiu a recuperação de 21 barras consecutivas diretamente na saída do forno, a fim de ter uma avaliação significativa das

características. Após a passagem pelo forno, ainda na mesa de resfriamento, as barras foram numeradas e identificadas na cabeça e na calda, como mostrado na Figura 14. Permitindo, assim que o ensaio fosse realizado na ordem correta de passagem do tratamento.

Figura 14: Barras com a calda identificada numericamente na mesa de espera para serem cortadas



Fonte: De autoria própria

Para o ensaio de dureza, ambas extremidades de cada barra foram cortadas em um comprimento de 5 cm.



Para o ensaio de tração, amostras de 20 cm foram retiradas do centro das barras. Inicialmente, três amostras foram submetidas ao teste para avaliar suas características mecânicas. Diante dos resultados obtidos, optou-se por expandir o teste, retirando seis amostras do lote seguinte. Essa ampliação foi realizada com o intuito de obter uma visão mais abrangente do comportamento mecânico durante o tratamento.



4.4. ENSAIO DE DUREZA

Na sequência, visando garantir uma superfície homogênea e isenta de imperfeições, essencial para a obtenção de resultados de dureza precisos e confiáveis, as amostras passaram por um processo meticuloso de preparação. Para atingir esse estado desejado, a amostra foi submetida a um cuidadoso procedimento de lixamento e polimento. O lixamento desempenha o papel crucial de eliminar quaisquer irregularidades visíveis, como rebarbas, oxidação superficial ou marcas de usinagem. Na ilustração abaixo, é possível observar a ferramenta utilizada para realizar o lixamento, onde diferentes granulações de lixa são utilizadas em conjunto com uma pequena corrente de água a qual ajuda a reduzir o atrito e evitar danos à amostra.

Após essa etapa, passa para o polimento, uma fase crucial para atingir uma superfície espelhada. Este processo não apenas aprimora a estética da amostra, mas também minimiza a rugosidade superficial, contribuindo para resultados de dureza mais precisos. O polimento é realizado em várias etapas, geralmente utilizando lixas finas em conjunto com lubrificantes apropriados para garantir um acabamento de alta qualidade.

Para efetuar as medições, a amostra foi segmentada em oito partes com o auxílio de uma caneta, formando ângulos de aproximadamente 120° , Figura 15.

Figura 15: Pontos na metade do raio da amostra, onde serão realizados o ensaio de dureza



Fonte: De autoria própria

Para realizar as medições, foi usada a ferramenta de medição de dureza da marca Wolpert Testwell, encontrada no laboratório da empresa Ascometal em Hagondange.

Primeiramente, é crucial garantir a devida calibração e conformidade da máquina com padrões desejados. Em seguida, a amostra é devidamente posicionada na máquina. Utilizando um sistema de carga controlada, um penetrador é pressionado contra a superfície da amostra com uma força predefinida. Durante esse processo, a máquina registra a área de impressão deixada pelo penetrador na amostra.

A partir dessas informações, o software da máquina calcula automaticamente a dureza da amostra, expressa em unidades Brinell (HB), além da amplitude, valores mínimos, máximos, média e desvio padrão. Esse método é conhecido por sua confiabilidade e capacidade de fornecer resultados precisos de dureza, sendo particularmente útil para avaliações em metais e ligas.

4.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

Antes do ensaio propriamente dito, as amostras passam por um processo de lixamento para remover imperfeições e garantir uma superfície homogênea. O polimento na sequência visa criar uma superfície uniforme, evitando concentrações de tensão que poderiam impactar nos resultados do teste. Após moldar a amostra com um entalhe central, onde a fratura é esperada, são realizadas marcações para facilitar a medição de deformações durante o ensaio. Essas marcas servem como pontos de referência visual, auxiliando na monitorização do alongamento da amostra. O equipamento utilizado para esse ensaio foi a máquina de ensaio de tração da marca Zwickroell, encontrado na sala de ensaios mecânicos na empresa Ascometal em Hagondange..

A amostra é fixada nas garras da máquina de maneira segura, garantindo uma aplicação uniforme da força. Essas garras são responsáveis por transferir a força gerada na amostra para o sensor. Durante toda a extensão do teste, uma carga controlada é aplicada até que a amostra atinja a ruptura. Os dados, como a carga aplicada e a deformação, são registrados ao longo do ensaio para as análises posteriores.

4.6. METALOGRAFIA

Além das avaliações das propriedades mecânicas, é necessário realizar uma análise da microestrutura para validar a implementação do novo método de alimentação das barras no forno de indução. O objetivo dessa análise microestrutural é assegurar que

o material tenha sido submetido a um tratamento térmico uniforme, principalmente nas extremidades das barras.

Então, após o preparo do corpo de prova da liga 42CrMo4, que envolve os processos de corte, lixamento e polimento para obtenção de uma amostra plana e homogênea, seguiu-se para o ataque químico. Nesse estágio, a amostra foi imersa em solução de Nital 10% por aproximadamente 3 segundos. Essa etapa é crucial para a revelação da microestrutura da amostra, proporcionando uma visualização mais clara das diferentes fases e constituintes sob um microscópio.

Para a análise microestrutural foi utilizado o microscópio óptico da Olympus modelo BX41M, localizado no laboratório na empresa Ascometal em Hagondange. Ele é um microscópio óptico de alta qualidade, que oferece recursos avançados, operação simples, além de estar conectado a um monitor para melhor visualizar a imagem. Ele é ideal para inspeção metalúrgica, pois atende a diversas aplicações, como inspeção de qualidade, pesquisa e desenvolvimento, além de ser útil para ensino e treinamentos. As imagens foram obtidas em aumento de 20, 50, 100x.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seção experimental deste estudo teve como propósito avaliar e certificar a capacidade do processo de produção contínua em proporcionar um tratamento térmico homogêneo. Além disso, buscou-se comparar a microestrutura dos metais antes e após o tratamento térmico. Os métodos de teste empregados para atingir esses objetivos incluíram análises de dureza, ensaios de tração e metalografia. Os resultados obtidos a partir destes experimentos serão apresentados e discutidos nesta seção.

5.1. ENSAIO DE DUREZA

A Figuras 16 e 17, apresentam os resultados da variação da dureza HB para as diferentes barras analisadas. São também apresentados os limites de tolerância estabelecidos pelo cliente, pelos pontos de medição da cabeça e da calda para cada barra, e pela margem de ± 3 sigma. Essa margem é calculada a partir da média dos dados e é somada ou subtraída três vezes o desvio padrão para obter um intervalo de confiança no qual a maioria dos dados deveria estar contida.

Figura 16: Resultados do ensaio de dureza realizado no comprimento de 5cm de cada extremidade nas 21 barras de $\varnothing 34,8\text{mm}$

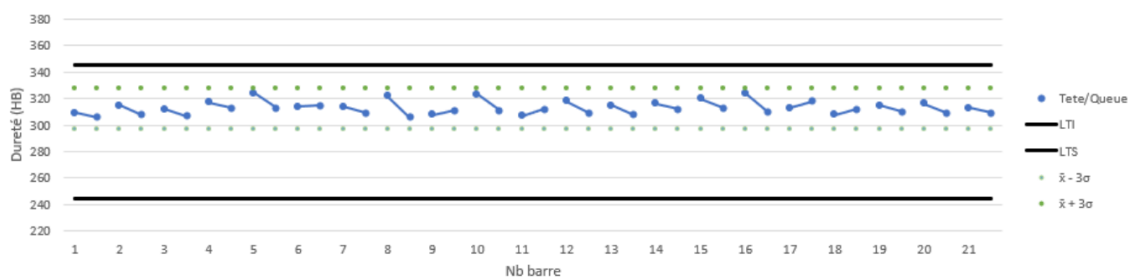
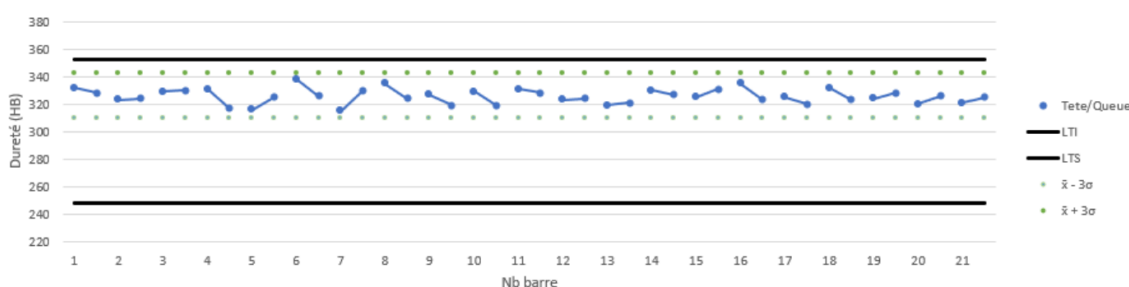


Figura 17: Resultados do ensaio de dureza realizado no comprimento de 5cm de cada extremidade nas 21 barras de $\varnothing 51,55\text{mm}$



Para ambos os diâmetros, observa-se que os pontos estão dentro dos limites tolerados pelo cliente e os 3 sigmas. Além disso, os resultados obtidos corroboram com as afirmações de Callister (2018), que indicou no gráfico da Figura 5 a dureza prevista em um aço com 0,42% de carbono após o processo de revenimento.

No entanto, nota-se que os valores não estão centralizados. Essa divergência é atribuída a uma temperatura mais elevada do que o necessário. Todavia, os resultados são aceitos e considerados satisfatórios, uma vez que a dureza não é a única característica a ser levada em consideração. Assim, o respeito aos valores tolerados é mais crucial do que sua centralização dos resultados.

Com base nos valores medidos, foi possível calcular os índices Cp e Cpk para cada um dos diâmetros. Esses indicadores avaliam se o processo é estatisticamente aceitável ou não. O valor esperado para considerar o processo ideal é $C_p > 1,33$ e aceitável é $C_p > 1$.

Para o diâmetro de 34,8 mm, C_p é 3,3 e C_{pk} é 2,16. Esses valores elevados são explicados devido a ampla faixa de tolerância, 100HB. Um cálculo inverso foi então realizado para determinar a margem de tolerância ideal para obter um C_p aceitável. Assim, para atingir um C_p igual a 1, a faixa de tolerância deveria ser de 30HB, para 1,33 seria de 40HB e para 1,67 seria de 50HB.

Para o diâmetro de 51,55 mm, o qual a margem de tolerância é de 105HB o C_p é de 2,6 e o C_{pk} é de 1,39. Neste caso, para alcançar um C_p igual a 1, a faixa de tolerância deve ser de 40HB, para 1,33 seria de 53HB e para 1,67 seria de 66HB.

5.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Igualmente ao ensaio de dureza, as Figuras 18 e 19, são compostos pelos limites de tolerância estabelecidos pelo cliente, pelos pontos de medição da cabeça e da calda para cada barra, e pela margem de ± 3 sigma.

Figura 18: Resultado dos ensaios de tração em 6 barras de Ø34,8mm realizados no centro da barra

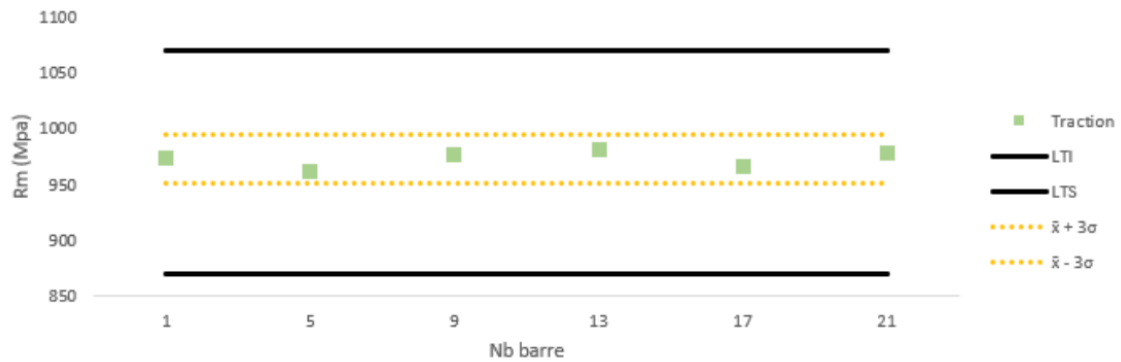
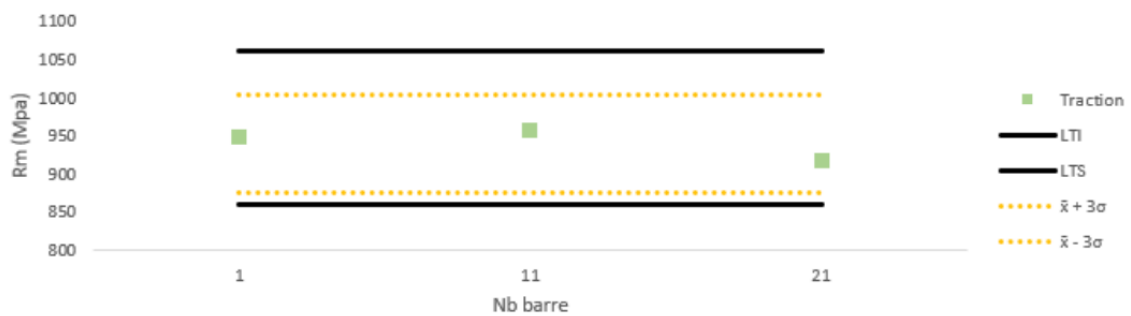


Figura 19: Resultado dos ensaios de tração em 3 barras de Ø51,55mm realizado no centro da barra



No gráfico do diâmetro de 34,8 mm, os valores estão centralizados e homogêneos. O Cp é de 4,5 e o Cpk é de 4,38. Assim como no teste de dureza, esses valores elevados estão associados à ampla faixa de tolerância, 200MPa. Dessa forma, para alcançar um Cp de 1, a margem de tolerância deve ser de 45MPa, para 1,33 seria de 60MPa e para 1,67 seria de 75MPa.

Por outro lado, para o diâmetro de 51,55 mm, os valores não estão tão centralizados quanto no caso anterior, embora permaneçam dentro dos limites de tolerância. Nesse contexto, devido à ampla faixa de tolerância (200MPa) e à quantidade limitada de amostras, os índices Cp e Cpk são inferiores aos obtidos em outros resultados. O Cp é de 1,56 e o Cpk é de 1,25. Para alcançar um Cp igual a 1, a margem de tolerância deveria ser de 129MPa, para 1,33 seria de 171MPa e para 1,67 seria de 214MPa.

Para uma compreensão mais aprofundada sobre os conceitos abordados nesta seção, recomenda-se a consulta do livro 'Controle da qualidade de processo', escrito por (CARPINETTI, 2003).

5.3.METALOGRAFIA

A análise microestrutural realizada no microscópio compara a estrutura da amostra após a laminação, em um comprimento de 5cm da cabeça e da calda e 5cm no centro da barra, em aumento de 50x. Em seguida após o tratamento térmico por indução, nas amostras de mesma posição.

A microestrutura das peças iniciais, após a laminação, apresentada na Figura 20 em aumento de 20x, e na Figura 21 em aumento de 50x é uma microestrutura polifásica. Essa microestrutura está dentro dos parâmetros esperados para este tipo de liga, neste estágio do processo, dada a combinação de diversos fatores envolvidos na laminação.

Figura 20: Microestrutura polifásica da liga 42CrMo4 após a laminação, em amostras de 5cm da cabeça (a), meio (b) e calda (c) no aumento de 20x

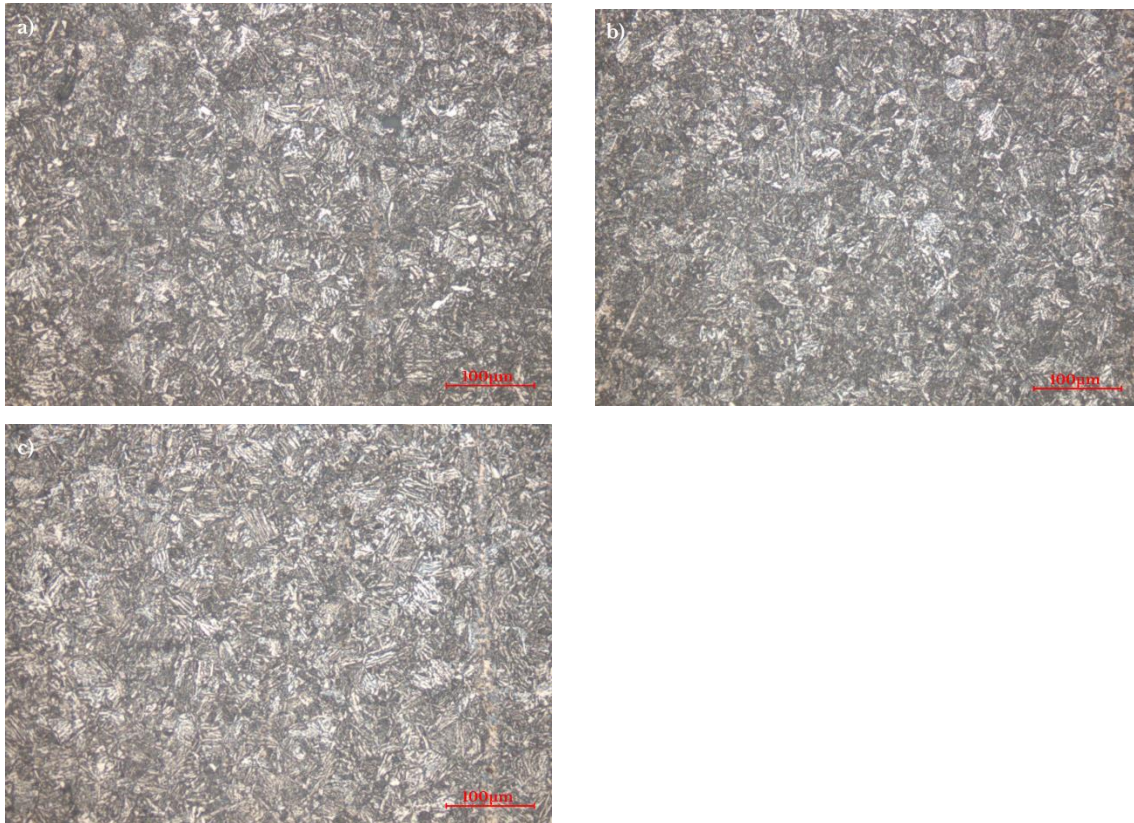
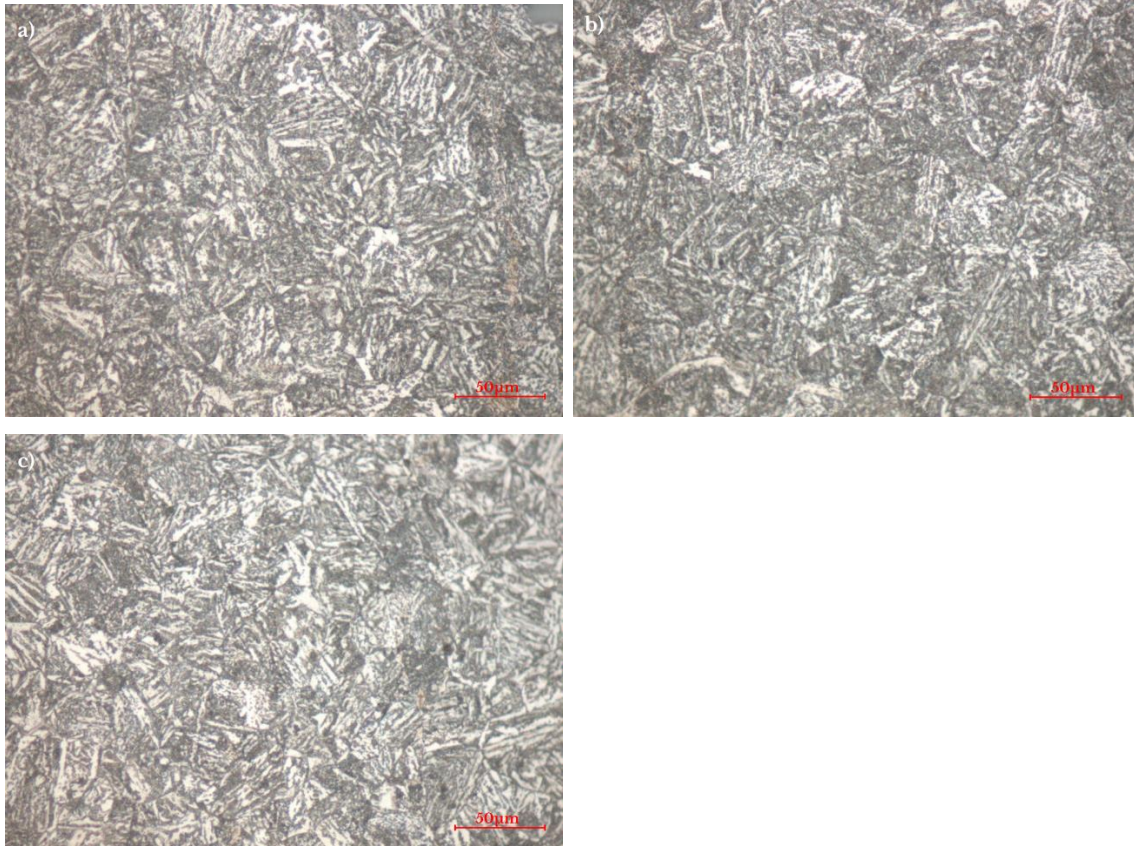


Figura 21: Microestrutura polifásica da liga 42CrMo4 após a laminação, em amostras de 5cm da cabeça (a), meio (b) e 9 calda (c) no aumento de 50x.



Já as amostras revenidas apresentaram microestrutura martensítica, como podemos ver em aumento de 20x na Figura 22 e de 50x na Figura 23. O resultado encontrado também está dentro das exigências da empresa e do cliente para esta liga.

Figura 22: Microestrutura martensítica da liga 42CrMo4 após o tratamento térmico por indução, das amostras de 5cm retidas da cabeça (a), meio (b) e calda (c) no aumento 20x

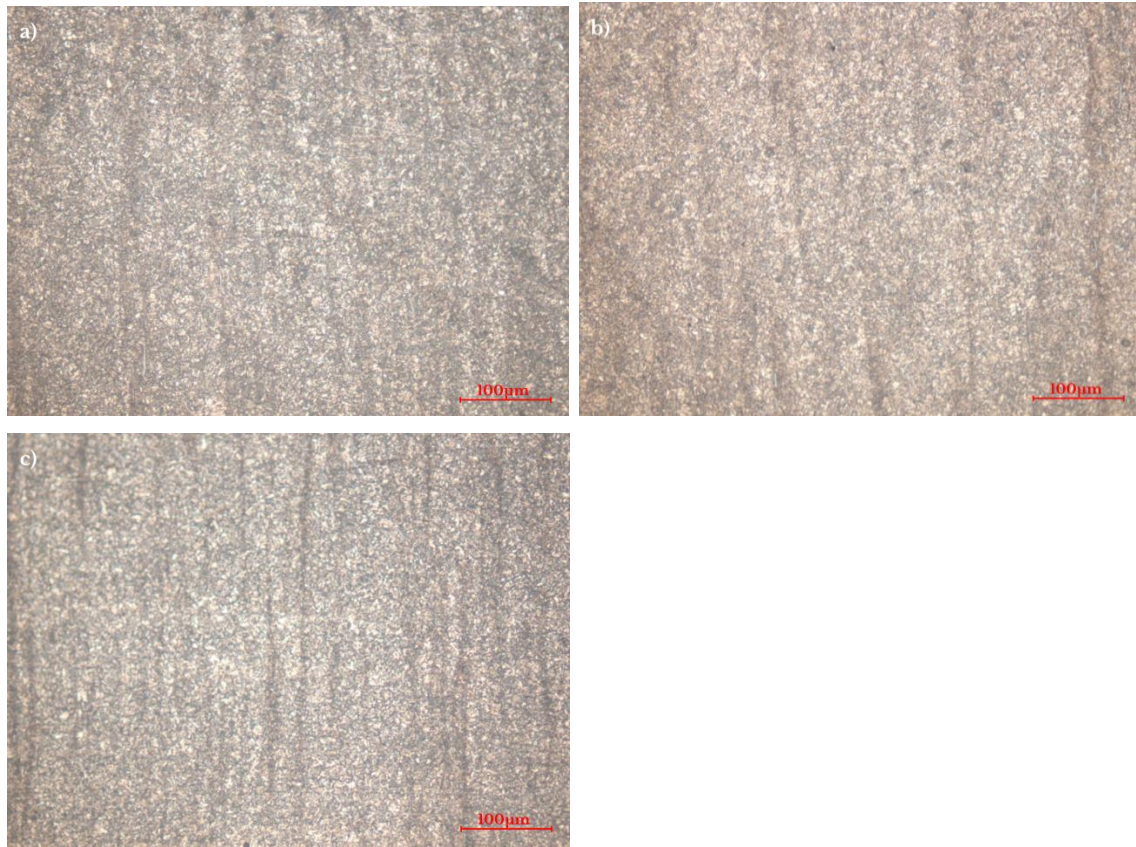
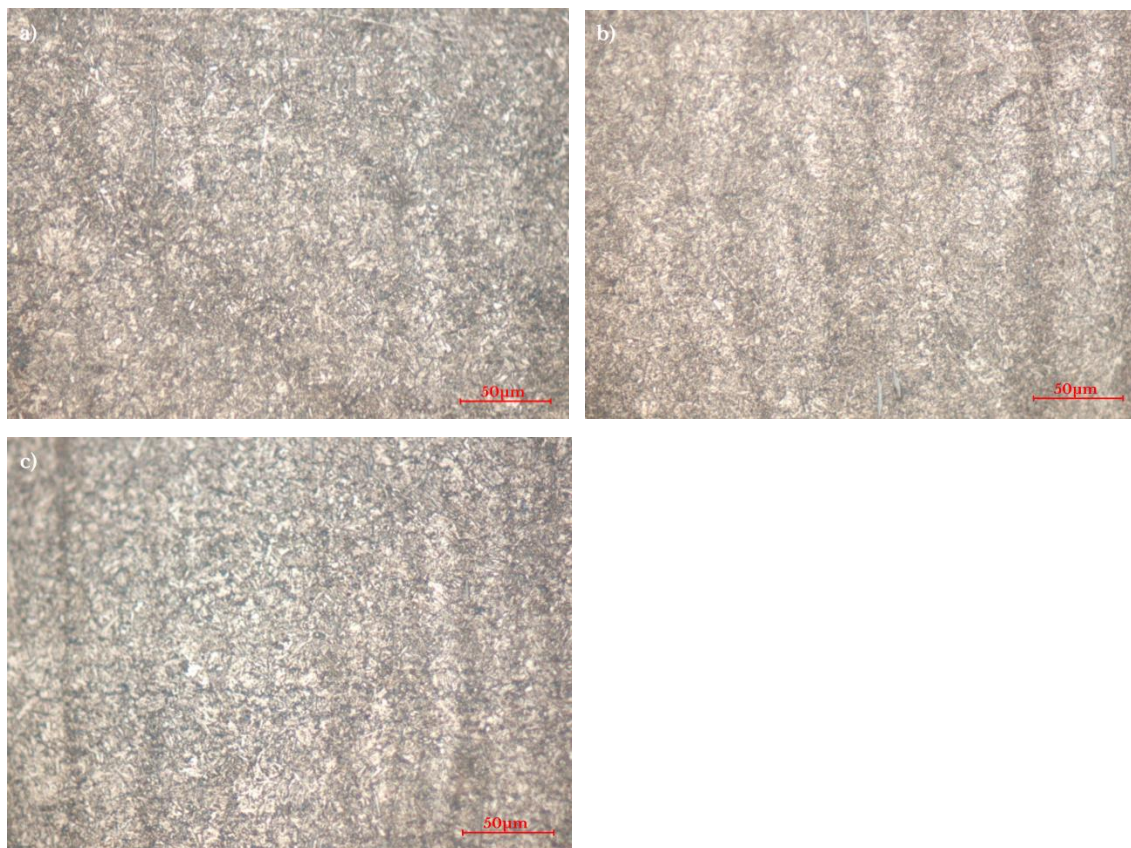


Figura 23: Microestrutura martensítica da liga 42CrMo4 após o tratamento térmico por indução, das amostras de 5cm retidas na cabeça (a), meio (b) e calda (c) no aumento 50x



As análises metalográficas confirmaram que o método de alimentação das barras no forno em modo contínuo proporcionou um tratamento homogêneo em toda a extensão das barras. Observa-se que as amostras se apresentam com estrutura monofásica, em conformidade com as expectativas apresentadas na revisão bibliográfica. Portanto, conclui-se que a transformação da austenita em martensita ocorreu de maneira eficiente. Assim, esse processo garantiu a obtenção das propriedades desejadas para o metal, reforçando a eficácia da abordagem adotada na produção das barras

5.4. EXPECTATIVA DE GANHOS

Os resultados apresentados abaixo são baseados em uma projeção anual a partir dos três primeiros meses de 2023. Os números em toneladas apresentados foram calculados a partir da redução dos tempos perdidos e convertidos em toneladas.

Consideraremos a implementação do novo processo nas barras com diâmetro superior a 30 mm, representando 89% da produção total, bem como a implementação do rastreamento das barras no sistema informático.

Em termos de eficiência operacional, podemos esperar uma redução significativa das interrupções causadas por problemas gerais da serra. Essa redução representará um ganho de 1014 toneladas por ano na produção.

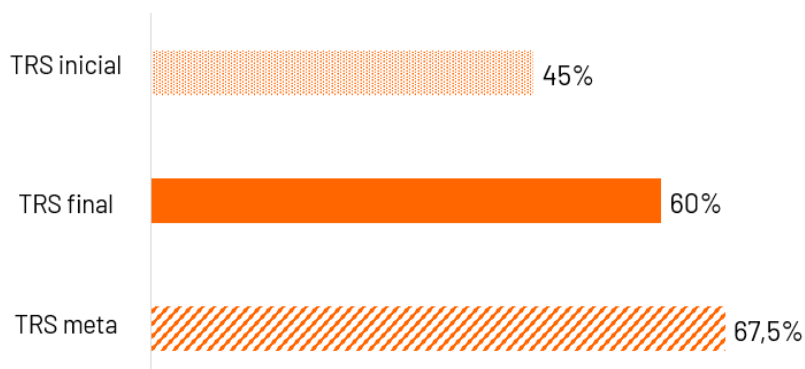
Além disso, o tempo de intervalo entre lotes seria consideravelmente reduzido devido à aceleração da mesa de resfriamento e ao uso do buffer como extensão desta última. Essa otimização resultaria em uma diminuição de 37% do tempo de espera para o próximo lote, aumentando a produção em 734 toneladas por ano.

Por fim, a eliminação da necessidade de cortar as extremidades das barras representaria um ganho adicional de 397 toneladas por ano, visto que não seria mais um material sucateado.

Considerando que a linha opera em média 214 dias por ano, e com três turnos por dia, a nova produção diária seria de 15,5 T/P. Esse aumento de 3,5 toneladas por turno nos permitiria atingir uma taxa de rendimento sintético (TRS) de aproximadamente 60%.

Como ilustrado na Figura 24, a meta de 67,5% do TRS não poderá ser alcançada. No entanto, uma eficiência de 60% já representa significativas melhorias e equipara a produção aos demais fornos da empresa.

Figura 24: Gráfico da taxa de rendimento sintético (TRS) inicial, o TRS atingido e a meta do TRS para atingir uma excelente eficiência



6 CONCLUSÕES

As análises realizadas inicialmente sobre o desempenho de produção do forno revelaram uma necessidade de fazer algumas alterações no modo de funcionamento da linha. Através do estudo realizado nesse presente trabalho, pode-se concluir que:

A implementação do novo método de alimentação de barras no forno por indução será possível, visto que todos os critérios foram validados.

Nos ensaios de dureza, apesar da falta de centralização nos valores devido a uma temperatura mais elevada, os resultados ainda estão dentro dos limites tolerados de 347HB e 247HB com média de 315HB; e de 350HB e 250HB com média de 330HB, foram sendo considerados satisfatórios. A conformidade com os valores estabelecidos é prioritária em relação à centralização dos resultados.

Os ensaios de tração o Ø 34,8 mm apresentou valores centralizados e homogêneos, dentro do limite de 1075Mpa e 875Mpa com a média de 975MPa. Já o Ø 51,55 mm, embora menos centralizado, permanece dentro dos limites de tolerância de 1050Mpa e 850Mpa com média de 925MPa, indicando resultados conclusivos e satisfatórios, apesar da quantidade limitada de amostras.

A análise microestrutural indicou que com o método de produção de barras contínuas as barras receberam o tratamento homogêneo adequado para transformar a austenita em martensita revenida. Permitindo, assim ter as características esperada para o metal.

Tendo todos os critérios validados, a implementação da produção em barras contínuas será possível nos diâmetros acima de 30mm. Essa implementação permitirá que:

A produção aumente de 45% para 60% de eficiência, representando um ganho de 2145 toneladas produzidas por ano.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Melhorar o sistema de rastreamento das barras durante a passagem pela linha de indução.

Implementar o método de produção contínua em todos os diâmetros, 20 a 60mm.

Criar um sistema de sensores para garantir que as barras estão coladas durante todo o processo de tratamento térmico.

8 REFERÊNCIAS

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais – Tradução da 4ª edição norte-americana**. Cengage Learning Brasil, 2019

AYEL, A., & DAVIER, B.; **Le TRS indicateur de la performance: Un guide pratique à l'usage des responsables de production**. Centre technique des industries mécaniques

BLÉTRY, M., **Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux**, 2007, Disponível em: http://mms2.ensmp.fr/mms_paris/experimental/polycop/caracterisation.pdf

CALLISTER, W. D. JR.; RETHWISCH, D. G. **Ciencia e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10. ed. LTC, 2018.

Capabilité Machines et Processus: Notions de base et applications, Disponível em: <https://www.technologuepro.com/cours-controle-quaite/chapitre-1-capabilite-machine-processus.pdf>

CARPINETTI, L. C. R. **Controle da qualidade de processo**. 2º ed. São Carlos

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 7º ed.

CHAPEAUCOU, R. **Techniques d'amélioration continue en production: 33 méthodes et outils pour développer les savoir-faire**. Paris: Dunod, 2003.

CHEREMISINOFF, N. P. 1 - Electromagnetic Induction Heating. Em: CHEREMISINOFF, N. P. (Ed.). **Electrotechnology**. [s.l.] William Andrew Publishing, 1996. p. 1–21.

COMMITTEE, A. S. M. H. **ASM Handbook: Volume 4, Heat Treating**. [s.l.: s.n.].

DO VALE, A. R. M. **Tratamento Térmico**, 2011 Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/09_tratamento_termico.pdf.

GAO, B. et al. Achieving a superior combination of tensile properties and corrosion resistance in AISI420 martensitic stainless steel by low-temperature tempering. **Corrosion Science**, v. 225, 2023.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW), I. I. **Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals.** , 1988

PRABHUDEV, K. H. **Handbook of HEAT TREATMENT OF STEELS.** p.1-160, 1988.

TAYLOR, K. A. **Aging Phenomena in Ferrous Martensites.** , 1985.

THEWLIS, G. Classification and quantification of microstructures in steels. **Materials Science and Technology**, v. 20, p. 124–133, 2004.

VELLING, A. **Iron-Carbon Phase Diagram Explained**, Explicação sobre o diagrama de ferro-carbono, 2020, Disponível em: <https://fractory.com/iron-carbon-phase-diagram/>

WANG, J. et al. Effect of rapid tempering at high temperature on microstructure, mechanical properties and stability of retained austenite of medium carbon ultrafine bainitic steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 28, p. 3144–3154, 2024.