

INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – CAMPUS OURO BRANCO
BACHARELADO EM ENGENHARIA METALURGICA

Jaderson Junior de Souza

**ESTUDO DE CASO DA ANÁLISE DE FALHA DE UM ROLO PUXADOR DE UMA
LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE E VIABILIDADE DE REPARO**

Ouro Branco
2025

JADERSON JUNIOR DE SOUZA

**ESTUDO DE CASO DA ANÁLISE DE FALHA DE UM ROLO PUXADOR DE UMA
LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE E VIABILIDADE DE REPARO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Ouro Branco para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. M.Sc. Heric Henrique Souza e Silva.

Co-orientador: Eng. Fabricio Gomes Pinto.

S729e Souza, Jaderson Junior de.

Estudo de caso da análise de falha de um rolo puxador de uma laminação de tiras a quente e viabilidade de reparo / Jaderson Junior de Souza. – 2024.

53f.: il.col.

Orientador: Heric Henrique Souza e Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2025.

1. Pinch roll. 2. Análise de falha. 3. Análise microestrutural. 4. Laminação. 5. Viabilidade de reparo. I. Souza, Jaderson Junior de. II. Silva, Heric Henrique Souza e. III. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. IV. Título.

CDU: 621

Catálogo: Márcia Margarida Vilaça - CRB-6/2235



INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC (ANEXO IV)

ATA DA DEFESA DE TCC

No dia 13 / 02 / 2025, às 17 : 10 horas, o aluno JADERSON JUNIOR DE SOUZA do curso de ENGENHARIA METALÚRGICA turma 2019.1 do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o () TCC I (X) TCC II e foi APROVADO (aprovado/reprovado) com a nota 85%, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC. Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 24 / 02 / 2025.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua nota será considerada zero e a sua defesa será anulada. Também está ciente de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes da defesa:

DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO

Eu, Jaderson Junior de Souza, estudante do curso Engenharia Metalúrgica do IFMG – Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG – Campus Ouro Branco, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro**, que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso que ora apresento.

Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de Falsidade Ideológica:

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante: Pena — reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte." Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Assinatura do aluno: Jaderson Junior de Souza

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO

Orientador(a): Nome: HERIC HENRIQUE SOUZA E SILVA Assinatura: [Assinatura]
Membro 2: Nome: CARLOS EDUARDO REIS DE CARVALHO Assinatura: [Assinatura]
Membro 3: Nome: VANESSA GRACIANA FIAIA LIMA Assinatura: [Assinatura]
Membro 4: Nome: _____ Assinatura: _____
Membro 5: Nome: _____ Assinatura: _____
Aluno: Nome: JADERSON JUNIOR DE SOUZA Assinatura: [Assinatura]

Aos meus pais, Nival e Maria.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder bom ânimo, força, perseverança e capacidade para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha noiva Thauane Gonçalves pelo apoio incondicional e por não me deixar desistir.

Aos professores do IFMG pela parceria, paciência, compreensão e aprendizado.

Ao orientador Heric Silva pela solicitude em sempre ajudar, o constante aprendizado, a amizade, paciência e compreensão.

Ao meu co-orientador Fabricio Gomes pela amizade, paciência, solicitude em dar conselhos e ensinamentos e por não ter medido esforços em ajudar.

Agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

No contexto atual de intensa concorrência na indústria siderúrgica global, é essencial alcançar a busca pela sustentabilidade econômica. O foco deste trabalho é avaliar uma falha por quebra em ponta de eixo, que ocorre em Rolos Puxadores, “*Pinch Rolls*”, que foram reparados de uma Laminação de Tiras a Quente (LTQ). Com a utilização da metodologia de Análise das Causas Raíz(es) de Falha (*Root Cause Failure Analysis – RCFA*), destacou-se como causa principal da quebra, a fratura por fadiga da ponta de eixo do *Pinch Roll*, que ocorreu de forma frágil, conseqüente da propagação das trincas na camada superficial recuperada. A análise microestrutural revelou trincas que estão associadas a fragilidade da estrutura martensítica presente na zona termicamente afetada (ZTA), pelo processo de soldagem mal sucedido ao qual a peça foi submetida. Com base nos dados analisados pontuou-se a viabilidade para o reparo do componente mediante ao procedimento de recuperação por reparo por solda.

Palavras chave: análise de falha, análise microestrutural, custo, laminação, *Pinch Rolls*, reparo, rolos, viabilidade.

ABSTRACT

In the highly competitive global steel industry, achieving economic sustainability is paramount. This study investigates a failure involving shaft end breakage in Pinch Rolls, which are critical components repaired for a Hot Strip Mill (HSM). Through the application of Root Cause Failure Analysis (RCFA), the primary cause of the failure was identified as a brittle fracture of the shaft end, initiated by crack propagation in the recovered surface layer. Microstructural analysis revealed that the cracks were associated with the brittleness of the martensitic structure in the heat-affected zone (HAZ), resulting from an inadequate welding process. Based on the findings, the study highlights the feasibility of repairing the component using a properly designed procedure, thus contributing to improved reliability and cost-effectiveness in industrial operations.

Keywords: failure analysis, microstructural analysis, cost efficiency, hot strip mill, Pinch Rolls, repair feasibility, industrial sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Laminador Quádruplo Reversível com Fornos Bobinadeira - <i>Steckel</i> : (1) Cadeira Quádruplo; (2) Fornos <i>Steckel</i> ; (3) Bobinadeiras - Dromos; (4) Guias; (5) Conjunto de <i>Pinch Rolls</i>	18
Figura 2 - Desenho esquemático de um laminador de tiras a quente - Processo	19
Figura 3 - Processo de Laminação <i>Steckel</i> - Esquema de passes sendo, “s” passes de desbaste; “r” atuação dos <i>Pinch Rolls</i> para encaminhamento ao Dromo; P tira toda bobinada em um dos Fornos <i>Steckel</i> ; F e T fase de bobinamento ou fase de acabamento.	19
Figura 4 - Esquemático da disposição e construção de cilindros de laminação em uma LTQ.....	20
Figura 5 - Conjunto de cilindros de trabalho de um Laminador <i>Steckel</i>	21
Figura 6 - Aplicação do conjunto de <i>Pinch Rolls</i> em uma Laminação de Tiras a Quente.	22
Figura 7 - Conjunto de <i>Pinch Rolls</i> , a esquerda <i>Pinch Roll</i> Inferior e a direita <i>Pinch Roll</i> Superior.	22
Figura 8 - Escopo da Metalurgia da Soldagem.....	25
Figura 9 - Formato da poça de fusão esquemática (a) formato elíptico e (b) formato em gota.....	26
Figura 10 - Esquema de alterações microestruturais na região afetada	28
Figura 11 - Processos de soldagem.	28
Figura 12 - Fratura por fadiga de um <i>Pinch Roll</i> Inferior.....	31
Figura 13 - Exemplificando os Por quês do RCFA.	32
Figura 14 - Principais passos da RCFA.....	33
Figura 15 - Ponta de eixo quebrada do <i>Pinch Roll</i> Inferior.	34
Figura 16 - Amostra da ponta de eixo do <i>Pinch Roll</i> analisada.	37
Figura 17 A e B - Sendo A a esquerda, desenho técnico demonstrando posição do raio de 30 na qual ocorreu a quebra na ponta de eixo do <i>Pinch Roll</i> e B a direita, foto demonstrando a situação real da quebra no físico.	38
Figura 18 A e B - Sendo A a esquerda, detalhe da superfície de fratura em região do início da ruptura em escala de 4 mm e B a direita em escala de 2 mm.	39
Figura 19 - Superfície da ponteira mostrando trinca perpendicular a ruptura (setas).	39

Figura 20 A e B - A a esquerda, representa a região de início da ruptura, antes do ataque químico e detalhe. Seta vermelha indica início da ruptura e setas pretas, trincas. B a direita, evidencia trincas internas e superficiais.	40
Figura 21 A e B - A a esquerda, demonstrar detalhes da estrutura martensítica em região com trincas e B a direita demonstrar a ZTA adjacente a ruptura.	40
Figura 22 - Estrutura em região com trinca perpendicular a ruptura.	41
Figura 23 A e B - A a esquerda, estrutura do metal base ampliada 50 vezes, B estrutura do metal base ampliada 200 vezes.	41
Figura 24 - Estrutura da seção longitudinal em região de início da ruptura (mesma região das fig. anteriores), mostrando trincas próximas a ruptura e indicações de valores de dureza.	43
Quadro 1 - Composição do aço SAE 4140.....	23
Quadro 2 - Composição tubo EN 10025 - S355J2G3.....	23
Quadro 3 - Resultados de composição química.....	42
Quadro 4 - Resultados de microdureza HV - Valor obtido a partir do resultado de dureza média, conforme ASTM A370 tabela 3.	42
Quadro 5 - RCFA Quebra do <i>Pinch Roll</i> Inferior.....	43
Quadro 6 - Estudo de viabilidade de reparo do <i>Pinch Roll</i>	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

AWS - *American Welding Society*

BQ - Bobina a quente

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

END - Ensaio Não Destrutivo

FBTS - Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem

HAZ - *Heat Affected Zone*

HSM - *Hot Strip Mill*

ISO - *International Organization for Standardization*

LTQ - Laminação de Tiras a Quente

MASP - Método de Análise e Solução de Problemas

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MIG - *Metal Inert Gas*

RCFA - *Root Cause Failure Analysis*

SAE - *Society of Automotive Engineers*

TPM - *Total Productive Maintenance*

TQM - *Total Quality Management*

USA – *United States of America*

ZAC - Zona Afetada pelo Calor

ZF - Zona Fundida

ZTA - Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1.	Objetivo Geral	15
2.2.	Objetivos Específicos	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1.	Processo de Laminação.....	16
3.2.	Processo de Laminação de Tiras a Quente	16
3.3.	Rolos e Cilindros de Laminação	19
3.3.1	<i>Pinch Roll</i>	21
3.3.2	Procedimento de reparo de rolos e cilindros de laminação.....	23
3.3.3	Soldagem	24
3.3.3.1	Metalurgia da Soldagem.....	25
3.3.3.2	Processos de Soldagem.....	28
3.3.4	Fratura por fadiga.....	30
3.3.5	Metodologia de análise de falhas	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Amostra.....	34
4.2	Caracterização da amostra	35
4.2.1	Análise visual	35
4.2.2	Análise microestrutural	35
4.2.3	Análise química e microdureza <i>Vickers</i>	36
4.3	Análise de falha pela metodologia <i>RCFA</i>	36
4.4	Viabilidade econômica	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Caracterização da amostra	37
5.1.1	Análise visual	37

5.1.2	Análise microscópica	38
5.1.3	Análise química e microdureza <i>Vickers</i>	42
5.2	Análise de falha pela metodologia RCFA	43
5.3	Viabilidade econômica	44
6	CONCLUSÃO	46
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	ANEXOS.....	52
	Anexo A - RCFA - Quebra do <i>Pinch Roll</i> Inferior	52
	Anexo B - Relatório RCFA - Quebra do <i>Pinch Roll</i> Inferior	53

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, as siderúrgicas que possuem uma Laminação de Tiras a Quente (LTQ), enfrentam um cenário de alta demanda de bobinas laminadas a quente. Nesse cenário, a confiabilidade do processo de produção e estabilidade dos equipamentos, se tornam elementos fundamentais para um custo de transformação final viável, e assim favorecem a competitividade no mercado. Isso significa que paradas de produção por quebras prematuras prejudicam a saúde econômica do empreendimento.

Ao abordar a questão da confiabilidade, deve-se ressaltar a existência de componentes e equipamentos críticos cujo mau funcionamento não pode ser tolerado, uma vez que, o tempo necessário para restabelecer suas funcionalidades é significativo, e ocasiona uma considerável redução na produção da planta. Entre esses equipamentos, destaca-se o conjunto de *Pinch Rolls*, ou conjunto de Rolos Puxadores, no qual há um histórico de quebra, quando reaproveitado via reparo. Esse caso é proveniente de uma planta siderúrgica situada no perímetro do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

Segundo Blau (2010), desgaste e altas temperaturas geram condições severas que os componentes de engenharia devem suportar em diversas aplicações, um exemplo são os rolos aplicados no processo de laminação, no qual se pode destacar os *Pinch Rolls* como exemplo. Atualmente, os grandes desafios encarados pelas indústrias de produção de consumíveis de solda e empresas prestadoras de serviços de recuperação de rolos, estão diretamente ligados no desenvolvimento de novas ligas de consumíveis, que permitam um melhor desempenho e desenvolvimento de novos procedimentos que garantam a maior qualidade do revestimento aplicado (RODRIGUES, 2017).

De acordo com Rodrigues (2017), o procedimento de recuperação de rolos por processos de soldagem é crucial para a viabilidade de processos. Para que uma recuperação de rolos por processos de soldagem, como por exemplo, a do *Pinch Roll*, seja satisfatória de pontos de vista de qualidade e financeiro, métricas devem ser observadas durante o processo de recuperação. Ponto importante que deve ser observado será o procedimento de recuperação, no qual estarão descritos todo o passo a passo de como será realizado a execução do mesmo, assim como material utilizado, temperatura de pré-aquecimento e interpasse, consumíveis caso utilizados

e também o procedimento de soldagem a ser utilizado. Ensaios não destrutíveis (END) como ultrassom e líquido penetrante validarão a viabilidade do procedimento executado, e com o procedimento validado, o rolo retorna como peça sobressalente a ser utilizado novamente na produção.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar o modo de falha da quebra de ponta de eixo do conjunto de Rolos Puxadores “*Pinch Rolls*” de uma Laminação de Tiras a Quente, de uma siderúrgica multinacional localizada em Minas Gerais, e a viabilidade de recuperação dos mesmos.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Caracterizar a amostra obtida de um “*Pinch Roll*” Inferior, Rolo Puxador, que falhou por quebra da ponta de eixo, utilizando estudo mediante análise visual, microscopia óptica, análise química e microdureza *Vickers*;
- b) Investigar o motivo da ocorrência da falha utilizando a ferramenta Análise das Causas Raíz (es) de Falha (*Root Cause Failure Analysis – RCFA*);
- c) Analisar a viabilidade econômica da utilização de Rolos Puxadores reparados/recuperados aplicados em uma Laminação de Tiras a Quente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processo de Laminação

De acordo com Helman e Cetlin (2012), denomina-se laminação, o processo mecânico de passagem de uma peça ou produto que será laminado, podendo ser uma placa, bloco, tarugo entre outros, entre dois cilindros que giram geralmente um no sentido horário e o outro no sentido anti-horário, de forma a reduzir a área de uma secção transversal. Segundo Schaeffer (2004), a laminação, além de conferir a redução da secção de blocos, barras, placas, entre outros produtos laminados, e também promover seu alongamento no comprimento, confere também a melhoria das propriedades dos materiais (ductilidade, resistência mecânica, estrutura superficial, por exemplo).

Conforme Piubelli (2017) durante a realização do processo de laminação não há perda de massa dos materiais que estão sendo conformados. O processo de laminação ocorre de duas maneiras, por meio de trabalho a quente, chamado também de laminação a quente ou pelo processo de laminação a frio. Quando o processo é nomeado laminação a quente, deve-se a temperatura que o material atinge durante o processo ser maior que sua temperatura de recristalização, assim sua estrutura é refinada em grãos equiaxiais recristalizados de menor tamanho, de acordo com Kiminami *et al.* (2013), por outro lado, na laminação a frio, a temperatura que o material atinge no processo não chega a sua temperatura de recristalização.

Para que ocorra o processo de laminação, é necessário maquinário próprio, projetado e destinado para tal finalidade, que é nomeado laminador. Os laminadores são projetados e dimensionados de acordo com a finalidade do produto que será laminado e produto final desejado.

3.2. Processo de Laminação de Tiras a Quente

Conforme Lino *et al.* (2016) o engenheiro americano Abram Peters Steckel foi o idealizador do laminador tipo *Steckel*, onde entrou em operação comercial no ano de 1932, na *Youngstown Sheet & Tube Company's Brier Hill Works*, em *Ohio, USA*. Kramer *et al.* (1997) pontua que a principal diferença tecnológica que difere os métodos tradicionais para laminação de tiras a quente e a tecnologia de laminação

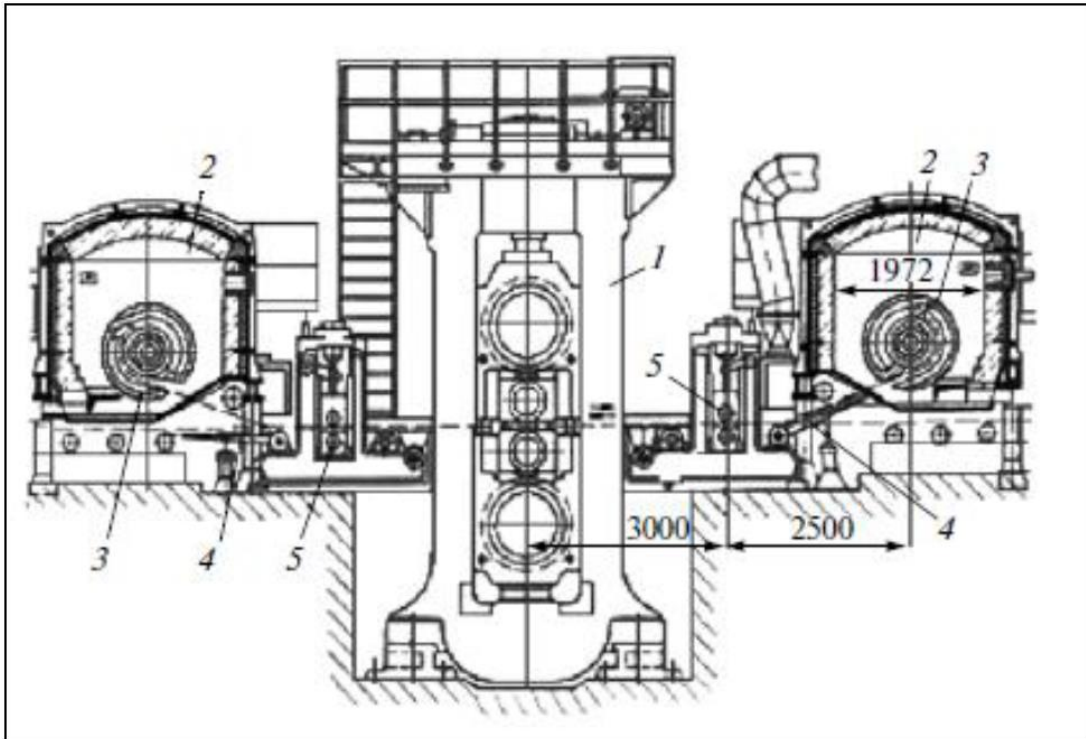
com laminadores *Steckel*, é o processo de laminação final que é feito com uma cadeira, ou até duas no caso do *Twin Stand*, reversíveis e equipadas com dois fornos bobinadeiras ou fornos *Steckel*, localizados na entrada e na saída do laminador. Estes fornos bobinadeiras têm a função de garantir a temperatura ideal do material laminado e acomodá-los, uma vez que, não existe espaço físico para o recebimento do material que sofreu redução em sua espessura e conseqüentemente o alongamento em sua extensão.

Os laminadores *Steckel* foram pensados para serem uma solução econômica para a produção de laminados a quente, podendo ser lucrativos quando utilizados para produção de aços carbono e especiais, quando a produção for limitada e os lotes de pedidos forem pequenos. Neste processo a preparação do esboço deve ser realizada em um número mínimo de passes assegurando assim que uma máxima temperatura de esboço seja atingida (LINO *et al.* 2016).

Segundo Souza (2010), para o processo de Laminação de Tiras a Quente convencional em uma planta siderúrgica, tem inicialmente aços reaquecidos até temperaturas elevadas, promovendo a austenitização da matriz. Logo em seguida, as placas são submetidas à seqüência de deformações, que envolvem as etapas de desbaste e de acabamento, e posteriormente resfriadas, definindo assim, suas características mecânicas. Após ser laminado a quente, o material pode seguir para a expedição final ou para a laminação a frio para o atendimento de clientes de diversos segmentos, como exemplo, da chamada linha branca (eletrodomésticos), linha automotiva, construção civil e tubos de grande diâmetro.

A Laminação de Tiras a Quente tem como o produto final a bobina a quente ou BQ, este produto pode passar ou não pelo laminador acabador, (processo de laminação à frio) ou ir diretamente para o cliente. A partir da bobina fabricada na LTQ, derivam-se uma série de produtos que podem ser fabricados, tais como podem ser empregadas em fabricação naval, fabricação automotiva, fabricação de eletrodomésticos, entre outras finalidades. A Figura 1 representa uma visão geral dos equipamentos principais do laminador *Steckel*.

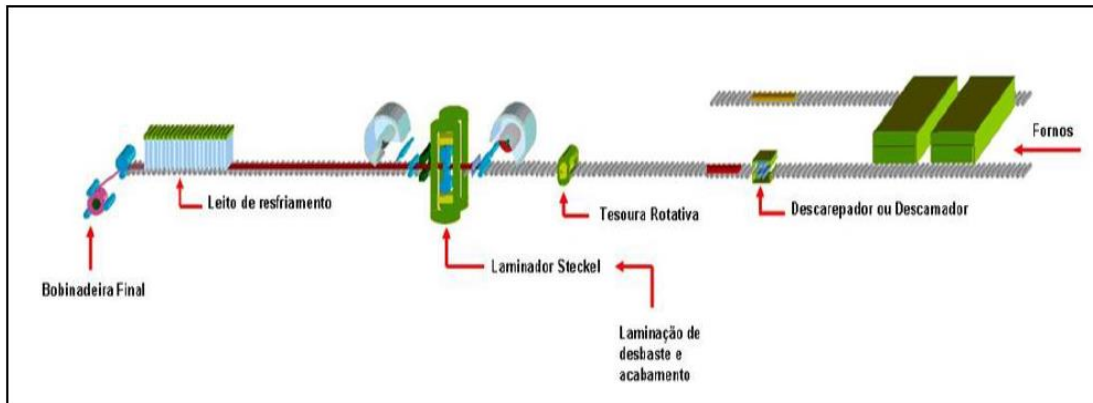
Figura 1 - Laminador Quádruplo Reversível com Fornos Bobinadeira - *Steckel*: (1) Cadeira Quádruplo; (2) Fornos *Steckel*; (3) Bobinadeiras - Dromos; (4) Guias; (5) Conjunto de *Pinch Rolls*.



Fonte: Adaptado de Lino *et al.* (2016, p.145).

Segundo Lino *et al.* (2016) o processo de laminação por um Laminador *Steckel* pode ser descrito por etapas: Após o material sair do Forno de Reaquecimento de Placas, o esboço é desbastado e enviado para a Tesoura de Pontas para a eliminação de defeito que geralmente aparece nas extremidades devido ao escoamento irregular do material devido desbaste. Após descarepação, o material é submetido aos esforços de laminação entre os cilindros de trabalho onde também é conduzido aos Fornos *Steckel* representado na Figura 1 como (2), pelas Mesas de Rolos, *Pinch Rolls* (5), e *Deflector Roll* (4), onde, os sistemas de automação entram por lógica e determinam a atuação dos Dromos (3), para captação da ponta e início de bobinamento do material para laminação *Steckel*. O início do processo de captação da ponta do material é realizado de forma lenta, após, é iniciada a laminação da fase *Steckel*, todos os equipamentos são acelerados de forma sincronizada para a velocidade ideal de laminação. Quando o passe termina, os equipamentos fazem o posicionamento e se preparam para fazer a mesma sistemática em sentido reverso. Isto se repete até se chegar à espessura desejada, quando o material é enviado para o bobinamento final na Bobinadeira. O processo de laminação *Steckel* é ilustrado abaixo pelas Figura 2 e Figura 3.

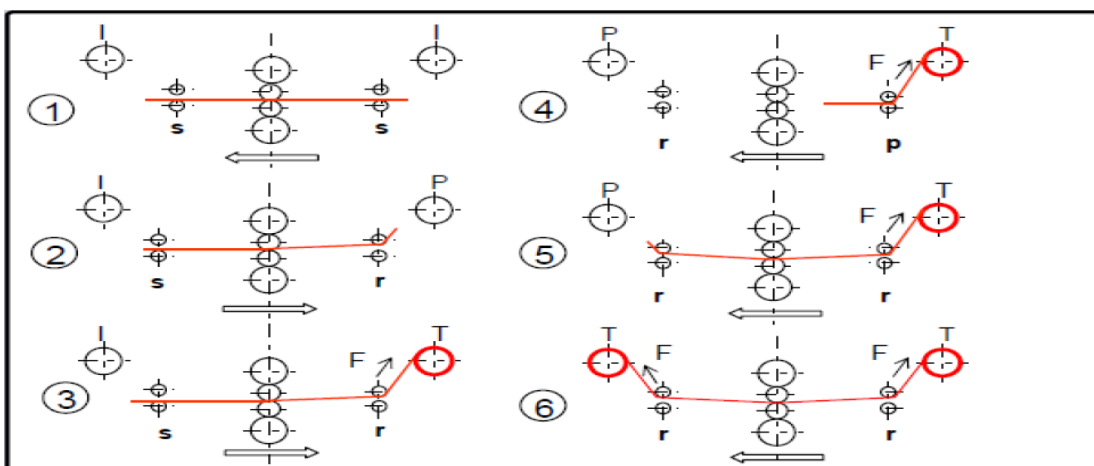
Figura 2 - Desenho esquemático de um laminador de tiras a quente - Processo



Fonte: Lino *et al.* (2016, p.148).

A Figura 3 representa detalhadamente o processo de entrada e saída da tira dos dromos e o processo de reversão onde, em 1 a tira é conduzida através do laminador, em 2 a tira é defletida e direcionada ao dromo, em 3 é iniciado o bobinamento, em 4 é finalizado o passe e a movimentação da tira é interrompida, em 5 e em 6 os passos 1, 2 e 3 são repetidos com a tira se movimentando para o sentido inverso implicando assim na conferência das tolerâncias dimensionais desejadas pelo processo de laminação.

Figura 3 - Processo de Laminação *Steckel* - Esquema de passes sendo, “s” passes de desgaste; “r” atuação dos *Pinch Rolls* para encaminhamento ao Dromo; P tira toda bobinada em um dos Fornos *Steckel*; F e T fase de bobinamento ou fase de acabamento.



Fonte: Adaptado de Lino *et al.* (2016, p.146).

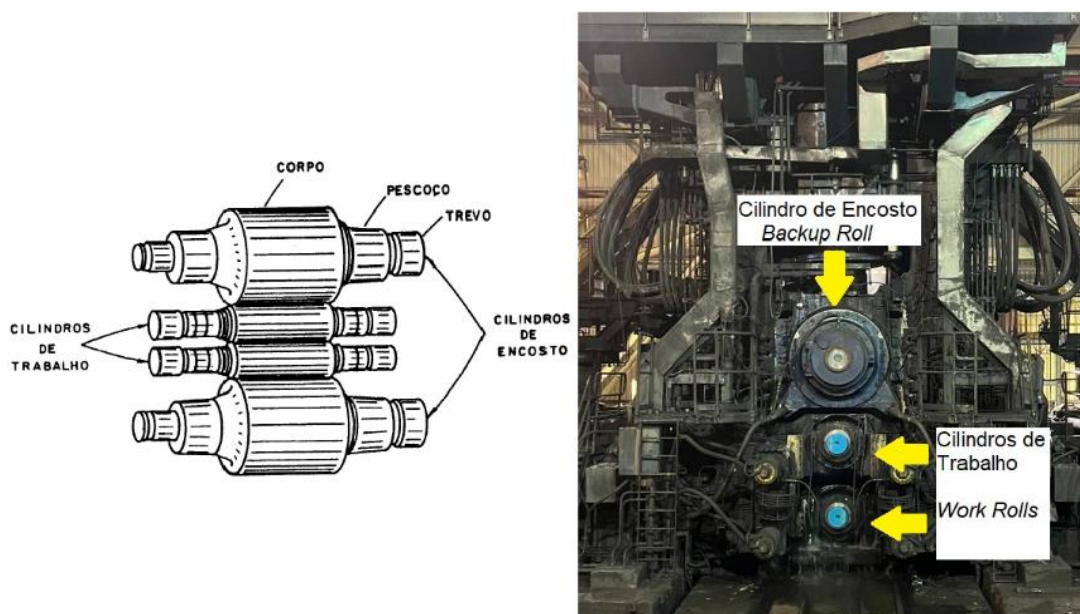
3.3. Rolos e Cilindros de Laminação

Os rolos e cilindros de laminação estão em contato direto com o produto ou material laminado, e são os responsáveis por conferir forma, aspecto e direcionar o

material laminado durante o processo. A diferença entre rolos e cilindros é a aplicação, ambos são utilizados como caminho do material laminado e tem a função de transportar o mesmo através da força motriz fornecida por seus acionamentos, e encaminhá-lo ao longo do processo de laminação. Os rolos são geralmente utilizados para fim de transporte e algumas vezes para realização e apoio em tensionamento de tiras quando se refere ao processo de Laminação de Tiras a Quente por exemplo. Os cilindros de laminação são compostos de três partes principais: - Mesa: região do cilindro onde ocorre o contato com o material a ser laminado – pode ser lisa ou com canais; - Pescoços (ponta de eixo): região dos cilindros onde se encaixam os mancais; - Trevos ou garfos de acionamento: serve de ligação do cilindro com os eixos de força, por meio de uma luva. Os cilindros de laminação são sustentados por mancais nas gaiolas, ou cadeiras laminadoras (CHIAVERINI, 1986b).

Os rolos de mesas e *Pinch Rolls* (Rolos Puxadores) se assemelham em suas constituições, os mesmos são formados basicamente pela mesa, onde ocorre o contato com o material no qual está sendo processado, a ponta de eixo, onde são montados os mancais que geralmente um lado livre e outro fixo, e acoplamentos que fazem a função de unirem os rolos ao acionamento quando acionados. Alguns rolos contém a presença de sistemas de refrigeração ou lubrificação incorporados aos mesmos. A Figura 4 ilustra a disposição dos cilindros laminação e construção.

Figura 4 - Esquemático da disposição e construção de cilindros de laminação em uma LTQ.



Fonte: Adaptado de Bresciani *et al.* (2011, p. 21).

Conforme Rizzo (2005), os cilindros de laminação, além dessas funções

citadas anteriormente, tem a função primordial de dar forma e aspecto ao material, sendo divididos em duas vertentes, os cilindros de trabalho “*work rolls*”, que são aqueles que entram em contato direto com o material laminado, e, portanto, sofrem as maiores solicitações de temperatura e desgaste. Por outro lado os cilindros de encosto “*backup rolls*” são aqueles que não entram em contato com o material laminado, mas sim com o cilindro de trabalho, com a função de apoiar o cilindro de trabalho impedindo a flexão, em termos de comparação, os cilindros de encosto são geralmente maiores que os cilindros de trabalho. A Figura 5 demonstra conjuntos de cilindros de trabalho “*work rolls*” empregados em uma LTQ.

Figura 5 - Conjunto de cilindros de trabalho de um Laminador *Steckel*.



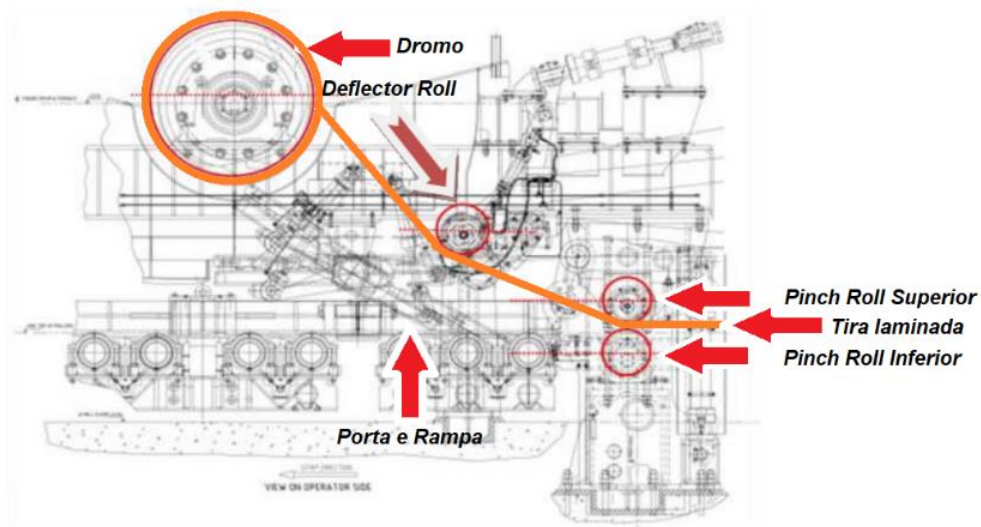
Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

Segundo Mourão (2007), os rolos e cilindros de laminação tem papel primordial no processo de laminação, sendo a principal parte do laminador, eles podem também afetar diretamente a qualidade do produto e a produtividade da laminação, conseqüentemente influenciam também diretamente no custo.

3.3.1 *Pinch Roll*

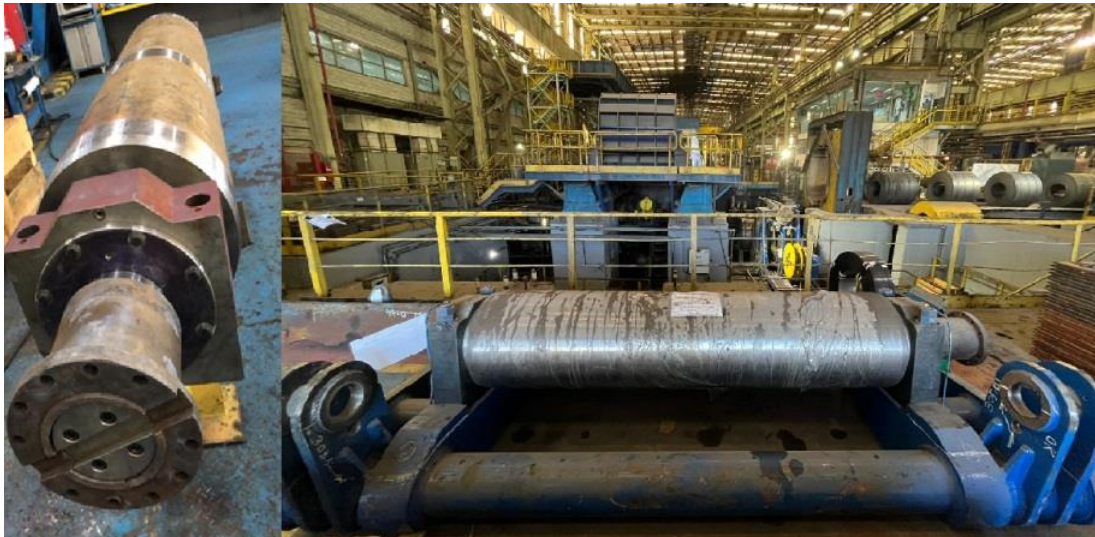
Segundo Blazevic (1990), os Rolos Puxadores ou *Pinch Rolls*, tem a função de encaminhar o topo da tira até o dromo, gerando a tensão necessária e adequada para o início da laminação de acabamento da bobina. As Figuras 6 e 7 demonstram sobre a aplicação e disposição do conjunto de *Pinch Rolls* em uma LTQ.

Figura 6 - Aplicação do conjunto de *Pinch Rolls* em uma Laminação de Tiras a Quente.



Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2013).

Figura 7 - Conjunto de *Pinch Rolls*, a esquerda *Pinch Roll Inferior* e a direita *Pinch Roll Superior*.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

Segundo Tecco e Stekly (1997), o Rolo Puxador (*Pinch Roll*) se enquadra na classe dos rolos laminadores intermediários, e são equipamentos que se tornam críticos devido seu estado superficial para o acabamento do produto final, exigindo uma maior resistência ao desgaste. O *Pinch Roll* estudado é constituído de uma ponta de eixo fabricada em aço SAE (*Society of Automotive Engineers*) 4140, sendo que sua mesa é fabricada de tubo referenciado a norma DIN (*Deutsches Institut für Normung*) 1630 – L355 EN 10025 - S355J2G3, a superfície da mesa tem a dureza de

50 HRC proveniente da deposição de material por processo de soldagem e posterior tratamento (SOUZA, 1989) e (DMI, 2020). Citadas as normas, as composições e constituições principais de ambas, estão representadas pelos Quadro 1 e Quadro 2.

Quadro 1 - Composição do aço SAE 4140.

SAE-AISI	Composição química dos aços com molibdênio (em %)							
	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,035	0,04	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25

Adaptado de Souza (1989, p. 68).

Quadro 2 - Composição tubo EN 10025 - S355J2G3.

Placas de alta resistência EN 10025 S355J2G3 - Padrão de composição											
Nota	Elementos químicos	C** máx.	Sim máx.	Mn máx.	P máx	S máx	Cr máx.	Máx .	Ni máx.	Cr+Mo+Ni máx.	Ao mínimo.
	% em massa	0,22	0,55	1,6	0,035	0,035	0,3	0,08	0,3	0,48	0,02
S355J2G3	Desvio permitido	0,02	0,03	0,04	0,05	0,005	0,05	0,03	0,05	-	-0,005

Adaptado de DMI, (2020).

3.3.2 Procedimento de reparo de rolos e cilindros de laminação

Geralmente, os cilindros de laminação são produzidos com ponta de eixo em ferro fundido nodular e mesa (em sua maioria dos casos) de ferro fundidos resistentes ao desgaste, obtidos por dupla fusão e centrifugação, pelo processo de fabricação, e após desmoldagem, passam por um tratamento térmico de alívio de tensões estando em seqüência disponíveis para o processo de usinagem (PERNAMBUCO, 2014).

O processo de aproveitamento de cilindros de laminação condiz com a sua vida útil, é realizado usinagem e retificação de acordo com o desgaste apresentado, para aproveitamento em uma campanha posterior. Chegando enfim, em um ponto que os mesmos não conseguem ser mais aproveitados por motivos dimensionais, então são descartados. Por outro lado, para os rolos de laminação, o procedimento de recuperação após desgaste é elaborado segundo a particularidade de cada rolo, considerando propriedades e projeto original. Esse reparo é executado por meio da deposição de material através de soldagem, após procedimento, ocorre a validação de sua integridade por meio de Ensaio Não Destrutivo (END). Em seguida, são

realizados o alívio de tensões e, se necessário, algum tratamento térmico ou termoquímico específico. Após essas etapas, ocorre o controle de qualidade, no qual a validação é feita por meio de diversos ensaios não destrutivos (como líquido penetrante, ultrassom, partículas magnéticas, raio-x, ensaios de dureza, entre outros) para garantir a conformidade do reparo antes de ser disponibilizado para uso, (RODRIGUES, 2017).

O procedimento de reparo deve ser tratado com rigor, pois, é a partir dele que o rolo irá estar novamente apto para o processo de produção, e quando mal feito ou falho, implicará em prejuízos relacionados a custo e qualidade para o processo. Por este motivo, a busca por aprimoramento e novas tecnologias é incessante, devido a necessidade de um reparo plausível de confiabilidade.

3.3.3 Soldagem

Processos de soldagem são adotados na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas, para corte, entre outros. O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional. Por outro lado, apesar desta simplicidade, não se pode esquecer que a soldagem pode ser muitas vezes um processo “agressivo” para o material, no qual envolve em geral, a aplicação de uma elevada densidade de energia, o que pode levar a alterações microestruturais e de propriedades importantes dentro e próximo da região que será soldada (MODENESI *et al.* 2012).

Para Messler (1999), pode-se definir soldagem em seu contexto mais amplo, como um processo no qual materiais do mesmo tipo ou classe fundamental, são reunidos se tornando um, através da formação de produtos químicos primários e consequentemente, secundários. Ligações essas, através da combinação de calor e pressão.

Segundo a *AWS American Welding Society, AWS* (1999) soldagem é a “operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão ou de metal de adição”.

Conforme a norma *ISO (International Organization for Standardization) Standard R 857* (1958), a soldagem é abordada como “uma operação na qual a

continuidade é obtida entre peças para montagem, por diversos meios”. Essas definições para soldagem, embora variadas, apresentam semelhanças nos aspectos essenciais, quando se considera a ideia central do processo, sendo, portanto, equivalentes.

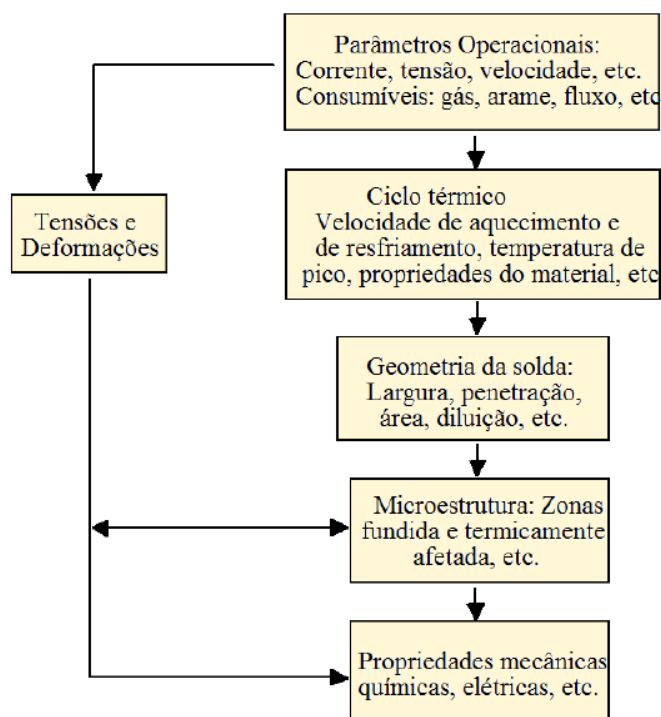
3.3.3.1 Metalurgia da Soldagem

Para a garantia de uma fabricação ou recuperação de sucesso, é necessário entender sobre a influência da soldagem na microestrutura e propriedades dos componentes. Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992) a soldagem se dá como um processo térmico no qual provoca uma série de alterações metalúrgicas na região da peça que se submeteu a tal processo na qual foi afetada pelo calor. Entre os fatores que podem influenciar a qualidade da solda pode-se citar: a solidificação da poça de fusão, a física do arco elétrico, a transformação de fases no estado sólido e a transferência de energia via calor na soldagem.

A qualidade da solda é influenciada pela física do arco elétrico, que é um fator crítico na soldagem. A microestrutura e geometria da solda, da zona afetada pelo calor (ZAC) ou também denominada zona termicamente afetada (ZTA), é diretamente afetada pela intensidade do arco elétrico e sua estabilidade. O monitoramento da corrente elétrica e da tensão de soldagem é muito importante para garantia da transferência de energia via calor uniforme e adequada para a solda (ARRUDA, 2023).

Conforme Ulutan *et al.* (2011), com o objetivo de diminuir o desgaste dos equipamentos e aumentar a resistência mecânica dos mesmos, a aplicação do revestimento duro em reparos de rolos é bastante usual, fazendo-se necessária para o aumento da vida útil dos equipamentos e também a redução das paradas de manutenção e processos que são empregados. Uma seleção correta do material que será depositado permite transformar materiais que usualmente não poderiam ser recuperados em recuperáveis, aumentar a resistência e promover melhorias estruturais para as propriedades desejadas. A Figura 8 apresenta o escopo para a Metalurgia da Soldagem.

Figura 8 - Escopo da Metalurgia da Soldagem

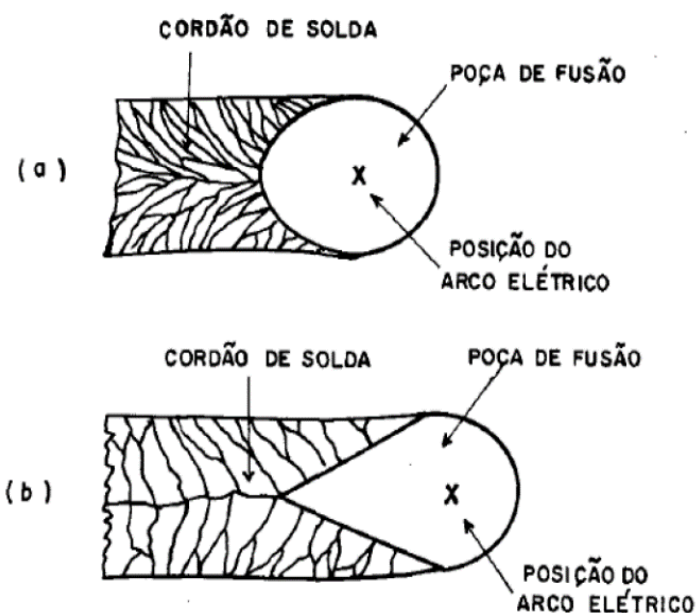


Fonte: Modenesi *et al.* (2012, p. 20).

Outro fator que influencia diretamente na qualidade do produto do processo de soldagem, ocorre na região onde acontece a fusão do metal, denominada também de zona fundida (ZF), ou região de solidificação da poça de fusão. Nela, as temperaturas são elevadas o suficiente para que aconteça a completa fusão do metal de base e do metal de adição. Wainer, Brandi e Mello (1992) afirmam que a taxa de resfriamento da poça de fusão, influencia a formação de cristais, no qual podem afetar as propriedades mecânicas da solda. Fatores como a perda de elementos químicos voláteis durante a soldagem e contaminação por gases, podem afetar a composição química da poça de fusão. Problemas como trincas e fissuras na solda podem ser gerados a partir da variação percentual de massa dos elementos químicos, tanto adição quanto volatilização.

De acordo com o apresentado na Figura 9, quando há a solidificação do cordão em forma de elipse (a), estima-se que as velocidades de soldagem e resfriamento tendem a ser similares. Já em (b) tem-se a condição de a velocidade de solidificação ser inferior a velocidade de soldagem, quando o cordão se solidifica em formato de gota.

Figura 9 - Formato da poça de fusão esquemática (a) formato elíptico e (b) formato em gota.



Fonte: Wainer, Brandi e Mello, (1992, p. 383).

Por fim, o outro fator importante na metalurgia da soldagem que influencia na qualidade da solda, é a transformação de fase no estado sólido. No decorrer da etapa de resfriamento da solda, a microestrutura passa por várias transformações de fase, abrangendo a solidificação, a formação de ferrita e austenita e a precipitação de fases secundárias.

Como representado na Figura 10, a zona termicamente afetada (ZTA) é a região imediatamente próxima a zona fundida (ZF), e que passou por uma elevação de temperatura excessiva durante o processo de soldagem, mas sem que tenha ocorrido a fusão do metal. Nessa região, as temperaturas são elevadas ao suficiente para a transformação de fase no estado sólido, logo, ocorrem uma série de alterações microestruturais.

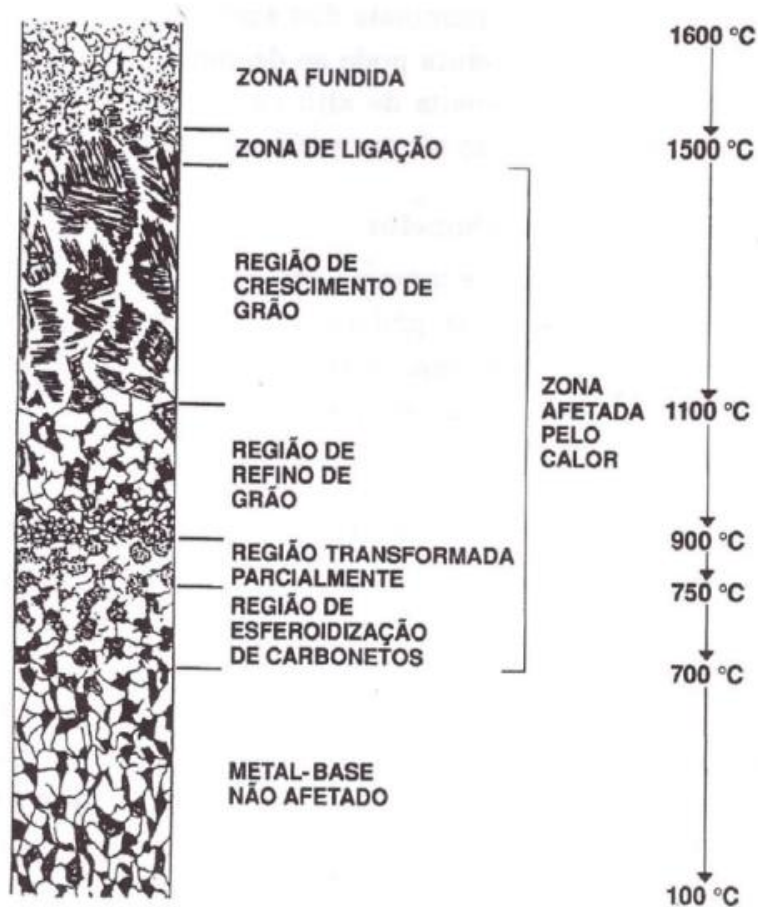
Segundo Kou (2003), as três regiões que se distinguem na zona afetada pelo calor são:

- Zona de ligação: é a região de transferência entre a zona fundida e a zona afetada pelo calor. É uma região no qual sua temperatura máxima, não atinge a temperatura de fusão do material, mas atinge uma temperatura suficiente para a fusão parcial do material e também para possibilitar a alteração da caracterização microestrutural.
- Região de crescimento de grãos: é a região onde a temperatura máxima se torna inferior à região da zona de ligação. Com a temperatura atingida,

há o favorecimento do crescimento dos grãos originários do metal de base.

- Região de refino de grãos: é a região na qual a temperatura inferior à região de crescimento de grãos. Local onde há a ocorrência de um fenômeno de refinamento e proporção de ductilidade elevada devido a temperatura.

Figura 10 - Esquema de alterações microestruturais na região afetada pelo calor durante a soldagem.

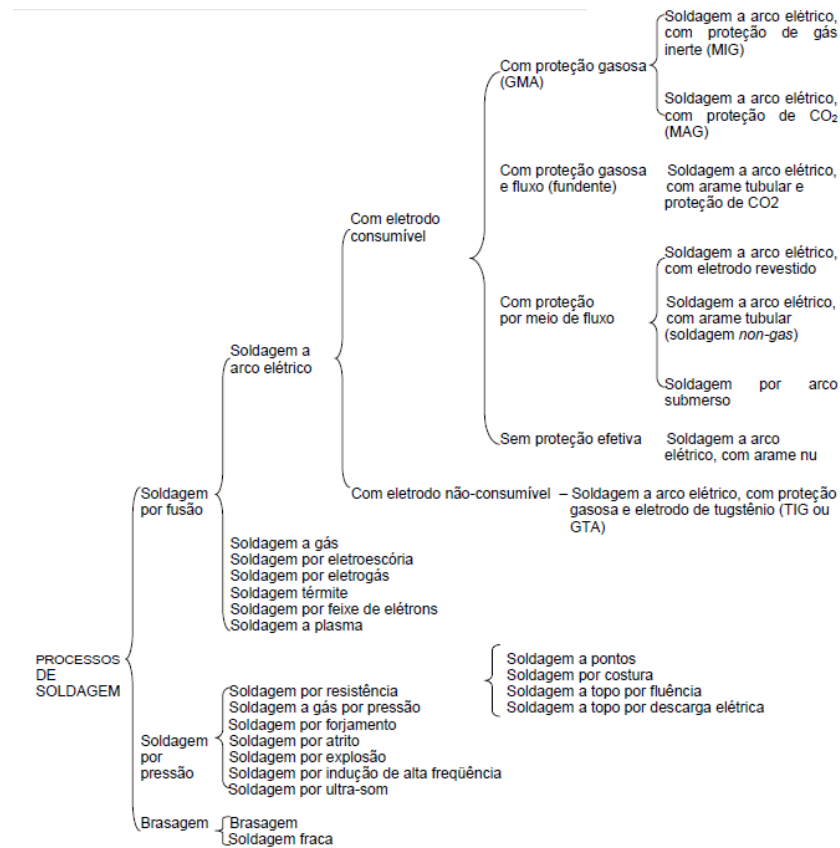


Fonte: Wainer, Brandi e Mello, (1992, p. 420).

3.3.3.2 Processos de Soldagem

Na Figura 11 está descrito de maneira detalhada os processos de soldagem.

Figura 11 - Processos de soldagem.



Fonte: FBTS, (2000).

No tocante a fabricação e reparo de rolos e cilindros de laminação, de acordo Tecco e Stekly (1997) citam que os quatro processos de soldagem mais usuais neste meio são:

- Arco submerso: este processo é amplamente utilizado, sendo eficiente na produção de depósitos de alta qualidade, com acabamento superior e elevada taxa de deposição, sendo indicado para aços-C ferríticos e/ou martensíticos que necessitam de proteção contra a absorção de nitrogênio. Uma prática utilizada envolve o uso de arames tubulares e fluxo neutro, substituindo os arames sólidos com fluxos ativos, o que resulta em depósitos uniformes, independentemente de variações no diâmetro dos rolos ou no comprimento do arco, e aumenta significativamente as taxas de deposição.
- Soldagem por fita: é o processo responsável por menos de 5% do mercado e com tendência de diminuição, suas vantagens incluem baixa diluição e alta taxa de deposição, especialmente com o uso de fitas tubulares. Contudo, essas vantagens são comprometidas pela dificuldade de acomodar pequenos diâmetros de rolos e, no caso das fitas sólidas, pela

limitada variedade de ligas disponíveis no mercado, o que requer o uso de fluxos ligados.

- c. Soldagem *MIG (Metal Inert Gas)*: Com adição de arame frio (fio sólido), que atualmente representa menos de 5% do mercado e também está em declínio, foi inicialmente projetado para aumentar a taxa de deposição e reduzir a penetração no revestimento de rolos de lingotamento contínuo. No entanto este método apresentou problemas como alta incidência de falta de fusão e dificuldades no posicionamento do arame frio, sendo recomendado que seja substituído pelo arco aberto.
- d. Arco aberto: este processo que é aplicável essencialmente com arames tubulares é o mais simplificado entre os quatro processos citados. O mesmo dispensa consumíveis como fluxos externos e gás. Sua utilidade tem sido limitada a depósitos inoxidáveis austeníticos e martensíticos, apesar de existir a probabilidade de deposição de ligas ferrosas.

3.3.4 Fratura por fadiga

O estudo do fenômeno fadiga é de relevante importância quando se necessita o entendimento sobre projetos de peças sujeitas a tensões cíclicas, as quais no mundo industrial são cada vez maiores. Chiaverini (1986a) menciona sobre a importância dos estudos relacionados ao fenômeno fadiga para a indústria e mecânica geral que cerca de 90% de rupturas das peças em serviço, ocorre por esse fenômeno.

A “fadiga” é, pois, um fenômeno que ocorre quando um membro sob tensão de uma máquina ou estrutura começa a falhar sob a ação de uma tensão muito menor que a equivalente à sua resistência estática, se a tensão é de natureza cíclica ou alternada (CHIAVERINI, 1986a, p.178).

Souza (1982) defende que o rompimento de um metal por fadiga, ocorre quando a tensão cíclica sofrida pelo mesmo apresenta uma flutuação suficientemente considerável e é maior que um valor característico de cada metal, no qual é denominado limite de fadiga, onde pode ser mensurado mediante um ensaio de fadiga.

Chiaverini (1986a) cita que falhas por fadiga, considerando a existência de tensões cíclicas, podem ocorrer devido ao fato da distribuição de um cristal a outro não ser uniforme. Tais anomalias, associadas à existência de pontos de “origem de tensões”, tais como: rebaixos, cantos vivos, inclusões, porosidades, entre outras

anomalias encontradas em superfícies soldadas, principalmente na zona termicamente afetada (ZTA), desde que aliados à existência de esforços alternados e repetidos, podem dar início a formação de pequenas fissuras, com as quais alinhadas a sucessivas e repetidas tensões, se expandem com o tempo, a partir dos focos onde surgiram, atingindo assim, toda a secção. Por essa razão, denomina-se as falhas por fadiga também de “fraturas progressivas”. A Figura 12 representa uma falha por fadiga em um Rolo Puxador de uma Laminação de Tiras a Quente.

Figura 12 - Fratura por fadiga de um *Pinch Roll* Inferior.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

3.3.5 Metodologia de análise de falhas

Segundo Kardec e Nascif (2019), o termo confiabilidade na manutenção ou processo, do inglês *Reliability*, teve origem nas análises de falha em equipamentos eletrônicos para uso militar durante a década de 1950, nos Estados Unidos. As denominadas ferramentas da qualidade para aumento da confiabilidade são técnicas que visam analisar, mensurar, definir e propor melhorias e soluções para problemas

que interferem e prejudicam o desempenho de um dado processo. Dentre essas técnicas, podemos citar a Análise das Causas Raíz (es) de Falha (*Root Cause Failure Analysis* - RCFA), na qual é um método ordenado de buscar as causas dos problemas e determinar as ações apropriadas para evitar sua reincidência. Esse método é originário dos “5 Porquês” associado com o TPM/TQM (*Total Productive Maintenance / Total Quality Management*), (KARDEC e NASCIF, 2019).

Segundo Sharma e Sharma (2010), a Análise de Causa Raiz da Falha (RCFA) é uma ferramenta de confiabilidade que busca evitar a ocorrência de futuras falhas, através da definição e solução das causas raízes dos eventos ocorridos. A RCFA se trata de um método de análise de falhas sempre utilizado para equipamentos críticos que são considerados gargalos no processo produtivo (PINTO e XAVIER, 2001).

A RCFA pode ser abordada e representada de diversas formas e, por isso, o passo a passo de sua elaboração, normalmente, difere de modelo para modelo e autor para autor, porém, sua concepção abrange uma linhagem semelhante, uma receita, no qual sua metodologia é baseada no questionamento em que cada etapa deve sempre responder a esta questão: Por quê? A técnica recomendada é que se faça tantas vezes a pergunta até que a questão não faça mais sentido, conforme ilustra a Figura 13 (KARDEC e NASCIF, 2019).

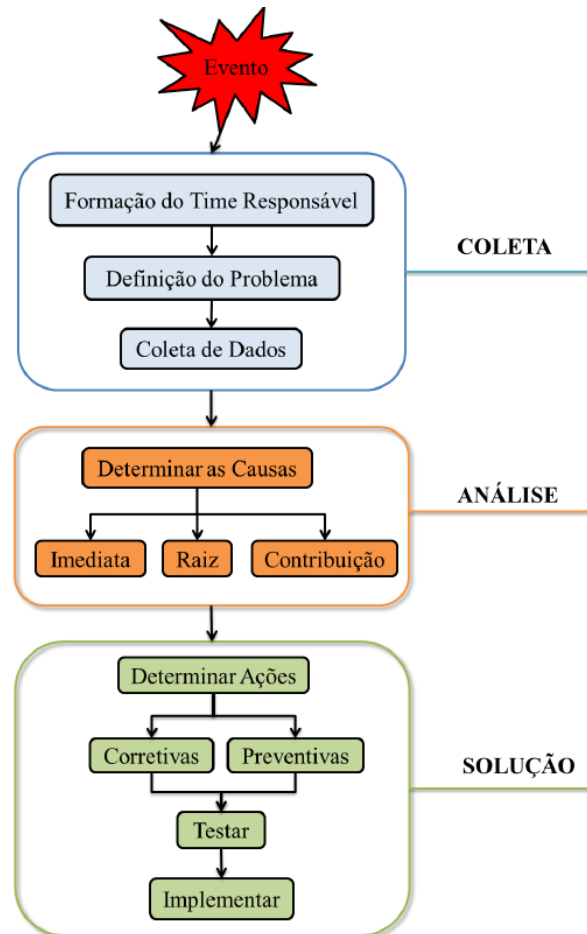
Figura 13 - Exemplificando os Por quês do RCFA.

Análise das Causas - Raízes de Falha (Root Cause Failure Analysis - RCFA)	
Metodologia	
RCFA baseia-se no questionamento : POR QUÊ?	
Exemplo:	
Pergunta	Resposta
Por que a bomba a falhou?	O selo falhou.
Por que o selo falhou?	Desgaste excessivo das faces de vedação.
Por que ocorreu o desgaste?	Houve superaquecimento.
Por que houve superaquecimento?	Falta de água de refrigeração.
Por que faltou água?	O operador se esqueceu de abrir a válvula.
Por que ele se esqueceu?	Ele é novo na área e não tinha operado, ainda, uma bomba deste tipo.
Por que ele não tinha operado esse tipo de bomba?	O seu treinamento não contemplou esse tipo de bomba.
Causa Raíz: Falha de treinamento adequado do operador.	
Plano de ação: Treinamento formal.	

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif, (2019, p.191).

Ransom (2007) propõe uma RCFA composta pela sequência de etapas mostradas na Figura 14.

Figura 14 - Principais passos da RCFA.



Fonte: Adaptado de Ransom, (2007).

Toda análise de RCFA deve ser documentada para servir de referência, apoio à decisões de melhorias e modificações futuras, seja como memória para revisão da situação que já ocorreu (KARDEC e NASCIF, 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é um estudo de caso no qual tem por objetivo analisar uma falha comum que ocorre em recuperações de Rolos Puxadores “*Pinch Rolls*” utilizados em uma Laminação de Tiras a Quente. Foi realizado estudo e análises de uma amostra retirada de um *Pinch Roll* que veio a falhar, e com os resultados disponíveis, foi verificado que há a viabilidade da recuperação destes rolos, com o objetivo da otimização do processo e redução de custos. A Figura 15 retrata a real situação da falha que foi analisada, no caso, a quebra da ponta de eixo do *Pinch Roll* Inferior de um Laminador *Steckel*.

Figura 15 - Ponta de eixo quebrada do *Pinch Roll* Inferior.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

4.1 Amostra

Foi coletada uma amostra da ponta de eixo do *Pinch Roll* Inferior com o

auxílio de serra fita hidráulica automática, da fabricante *Baileigh*, modelo trifásico de referência 1001260, com motor de 5HP, para posterior preparação metalográfica.

4.2 Caracterização da amostra

Na etapa de caracterização da amostra retirada, que foi realizada no laboratório de ensaios físico-químicos de uma siderúrgica de Minas Gerais e no laboratório de metalurgia do Instituto Federal de Minas Gerais, campus Ouro Branco, foram utilizados os seguintes métodos e ensaios: análise visual, microscopia óptica, microdureza.

4.2.1 Análise visual

Foi realizada a análise visual da amostra obtida a partir da comparação de seu aspecto visual com resultados discutidos na literatura. Chiaverini (1986a) cita que falhas por fadiga, considerando a existência de tensões cíclicas, podem ocorrer devido ao fato da distribuição de um cristal a outro não ser uniforme. Tais anomalias, associadas a existência de pontos de “origem de tensões”, tais como: rebaixos, cantos vivos, inclusões, porosidades, entre outras anomalias encontradas em superfícies soldadas, principalmente na zona termicamente afetada (ZTA) no caso da amostra analisada, desde que aliados à existência de esforços alternados e repetidos, podem dar início a formação de pequenas fissuras, com as quais alinhadas a sucessivas e repetidas tensões, se expandem com o tempo, a partir dos focos onde surgiram, atingindo assim, toda a secção. Por essa razão, denomina-se as falhas por fadiga também de “fraturas progressivas”.

4.2.2 Análise microestrutural

Para a análise da problemática, entre os métodos foram utilizados a análise visual da amostra. Para a revelação da estrutura do material foi realizado o ataque químico com nital 3%, após o seccionamento da amostra e preparação metalográfica. Para a microscopia óptica foi utilizado o microscópio óptico modelo *Axio Imager. M2m*, em conjunto com o *software* analisador de imagens *AxioVision SE64 Rel. 4.9.1*.

4.2.3 Análise química e microdureza *Vickers*

Os valores de referência para o ensaio de microdureza *Vickers* foram adotados conforme norma *ASTM (American Society for Testing and Materials) A370*. Para esta etapa foi utilizado o microdurômetro, modelo HMV-2T (344-04152-12), fabricado pela *Shimadzu Corporation*, no Japão.

A análise química foi realizada pelo laboratório físico-químico da Aciaria de uma siderúrgica situada em Minas Gerais, por espectrometria óptica. O valor estimado de limite de resistência foi calculado a partir do valor médio de microdureza.

4.3 Análise de falha pela metodologia *RCFA*

A metodologia utilizada para a realização da análise de falha da problemática ocorreu pelo método de Análise das Causas Raíz (es) de Falha (*Root Cause Failure Analysis – RCFA*) . Sendo o mesmo utilizado para a chegada em uma causa raiz para tal falha apresentada.

4.4 Viabilidade econômica

Foi realizado o estudo de viabilidade econômica de reparo do rolo em questão. Com fatos e dados e embasado em política interna de uma siderúrgica situada em Minas Gerais, tem-se como viável a recuperação de um equipamento de grande porte, quando o seu custo de reparo orce até 80% do valor referente a um novo. Quando ultrapassado tal valor estipulado, o equipamento se torna inviavelmente e economicamente irreparável, sendo o mesmo alienado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da amostra

5.1.1 Análise visual

Foi analisada uma extremidade rompida da ponta de eixo do *Pinch Roll* Inferior de um Laminador tipo Steckel, o ideal para uma análise completa, é ter as duas extremidades conforme retrata a Figura 16.

Figura 16 - Amostra da ponta de eixo do *Pinch Roll* analisada.



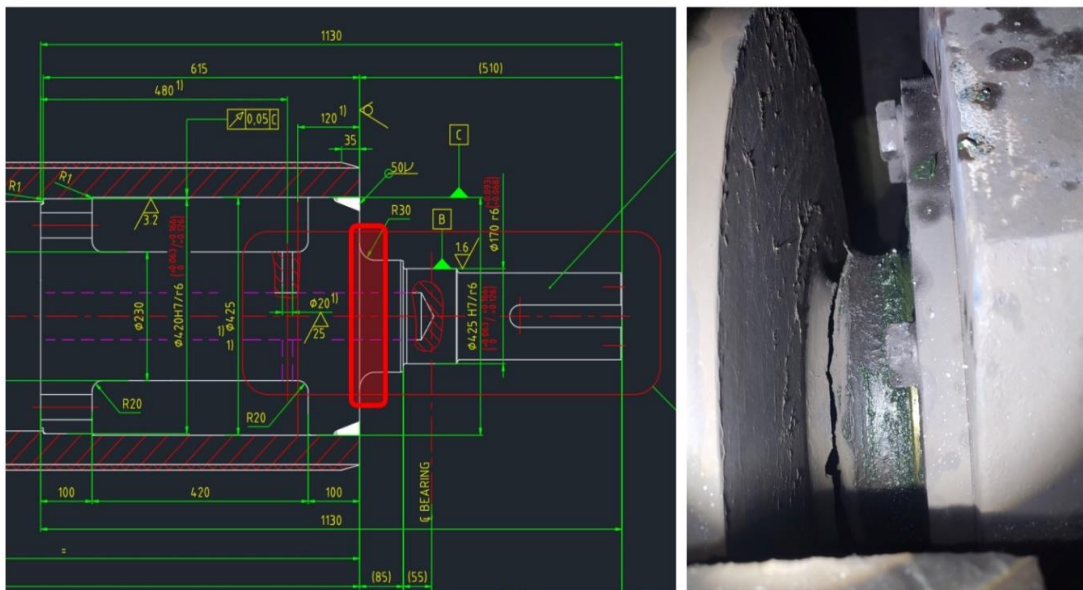
Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

A Figura 16 também retrata a superfície da fratura, onde a mesma apresenta-se oxidada, impossibilitando sua caracterização via MEV.

Por inspeção e análise visual é possível relatar que a ponta de eixo do *Pinch Roll* rompeu na região do raio (30°) conforme a Figura 17. A ruptura teve início por processo de fadiga, caracterizado pelo aspecto liso da fratura. Segundo Modenesi *et al.* (2012), a fadiga é um fenômeno progressivo que se inicia em regiões localizadas, onde há existência em geral, de uma concentração de tensões originária, por exemplo, de descontinuidades resultantes do projeto, do processo de fabricação ou recuperação, como é o caso. Esse processo ocorreu em uma faixa bem superficial (aproximadamente 2,0 mm), em quase toda a circunferência da fratura, devido a

esforços cíclicos rotacionais. O restante da fratura se deu de forma frágil, instantânea, caracterizada pelo aspecto grosseiro da superfície de fratura. As informações acima são constatadas pela Figura 17 A e B.

Figura 17 A e B - Sendo A a esquerda, desenho técnico demonstrando posição do raio de 30 na qual ocorreu a quebra na ponta de eixo do *Pinch Roll* e B a direita, foto demonstrando a situação real da quebra no físico.



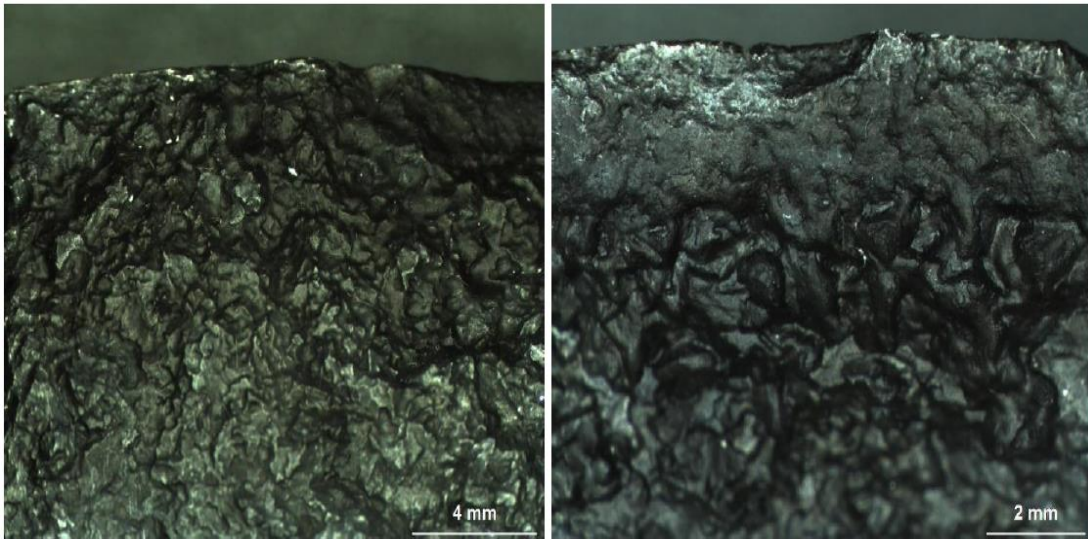
Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

5.1.2 Análise microscópica

A microestrutura do material é constituída por perlita com ocorrências de ferritas, sendo maioria ferritas poligonais, característica de estrutura normalizada. Há estrutura característica de solda na região superficial da ponteira, provavelmente resultante de recuperação por processo de soldagem realizada na peça. O metal de solda apresenta dureza elevada em relação ao metal base, e na zona termicamente afetada, houve formação de estrutura martensítica, com valores de dureza muito altos. Segundo Modenesi *et al.* (2012) devido ao processo de soldagem, a ZTA sofre alterações microestruturais por alto pronunciadas, que mudam a sua microestrutura original. Alterações estas são relativamente descontroladas, podendo portanto, prejudicar as propriedades do material nesta região. O que ocorre no caso estudado.

Na análise microscópica podemos observar pela Figura 18 A e B detalhes da superfície da fratura estudada.

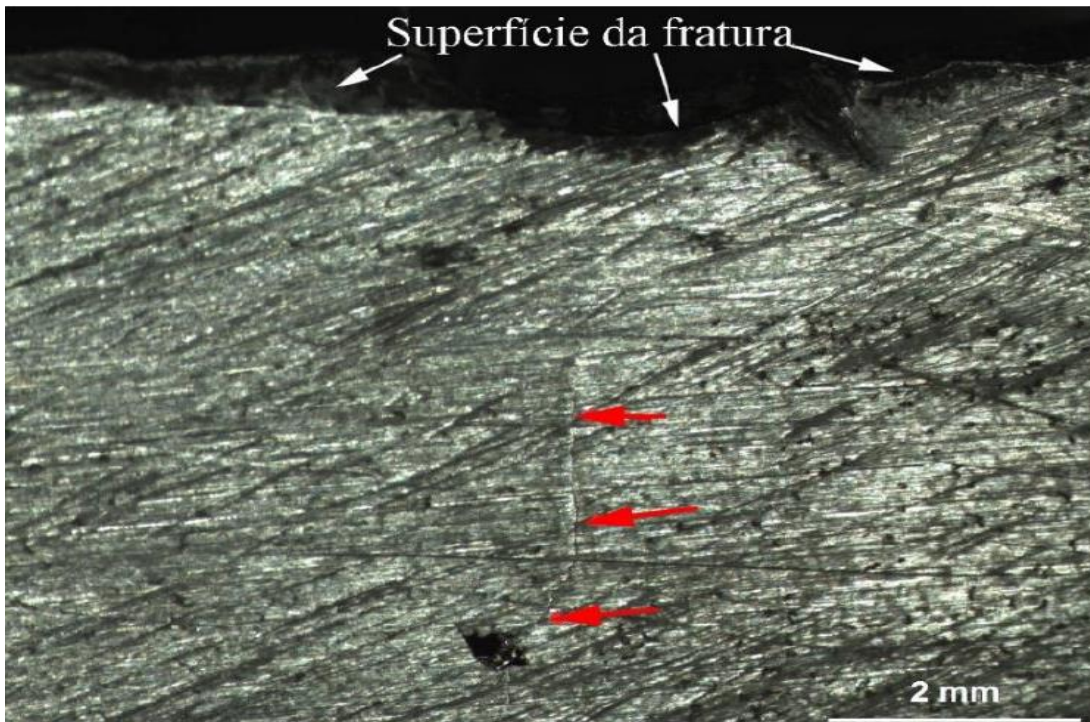
Figura 18 A e B - Sendo A a esquerda, detalhe da superfície de fratura em região do início da ruptura em escala de 4 mm e B a direita em escala de 2 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

Conforme Figura 19 notam-se trincas na superfície da peça, próximas e em sentido perpendicular a ruptura.

Figura 19 - Superfície da ponteira mostrando trinca perpendicular a ruptura (setas).

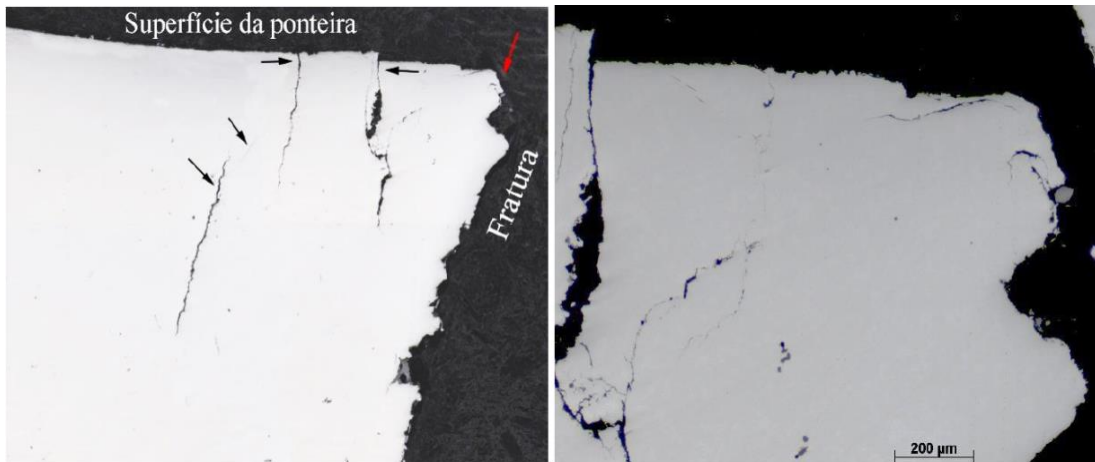


Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

A ruptura iniciou em região com estrutura martensítica, onde observam-se várias trincas, indicando fragilidade do material.

A Figura 20 A e B, representa o início da ruptura na ponta de eixo estudada, sendo denotada pela seta em vermelho. Pontua-se vários pontos de trincas internas e também aflorando que são indicadas pelas setas em preto.

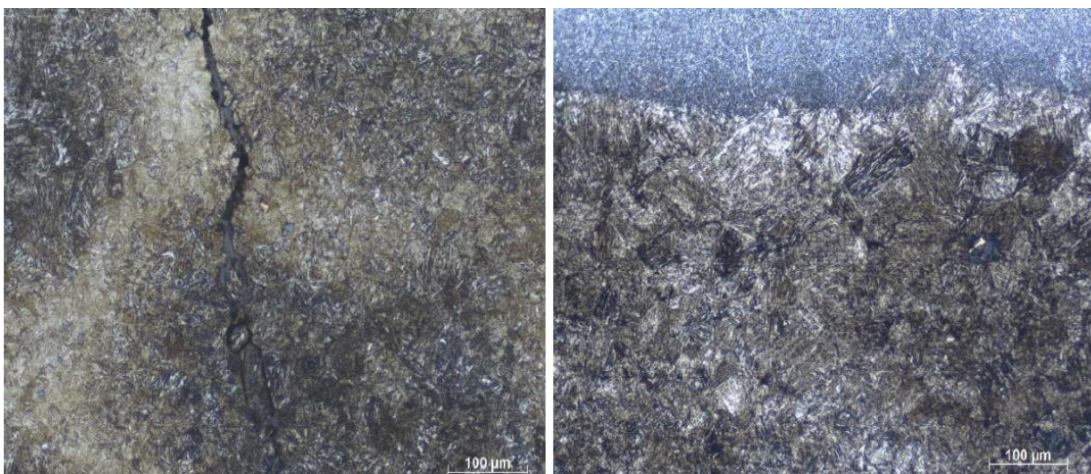
Figura 20 A e B - A a esquerda, representa a região de início da ruptura, antes do ataque químico e detalhe. Seta vermelha indica início da ruptura e setas pretas, trincas. B a direita, evidencia trincas internas e superficiais.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

Na Figura 21 A e B, onde em A é observado trincas na região da ZTA com uma grande formação de martensita e em B é demonstrado a ZTA adjacente onde foi localizada a ruptura da ponta de eixo.

Figura 21 A e B - A a esquerda, demonstrar detalhes da estrutura martensítica em região com trincas e B a direita demonstrar a ZTA adjacente a ruptura.

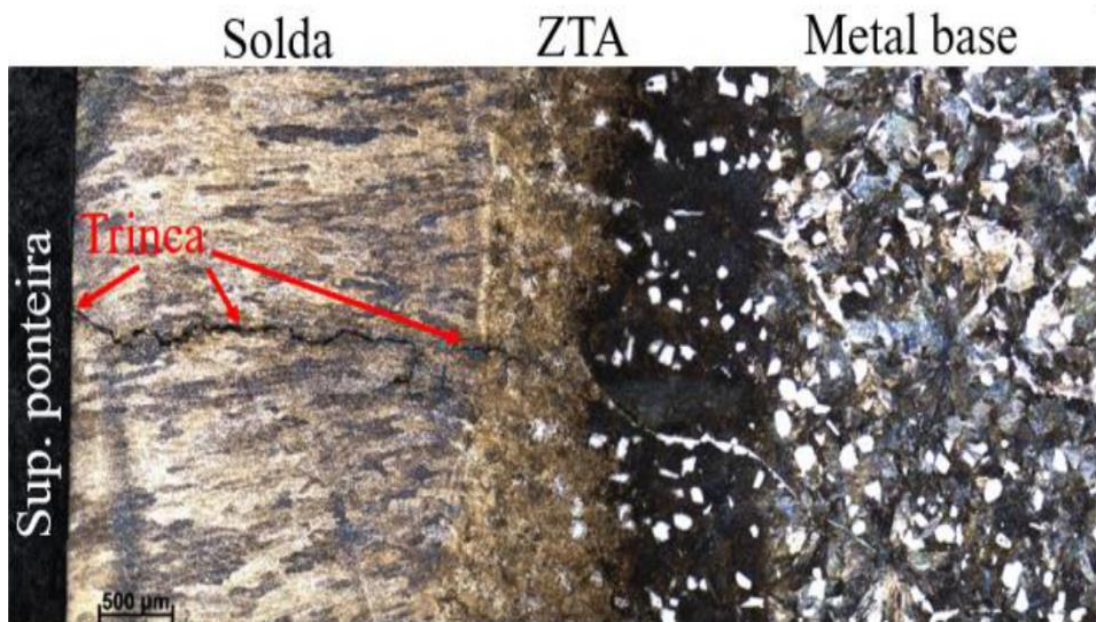


Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

A Figura 22 representa o contraste entre o metal base da ponta de eixo, a ZTA, a deposição de solda (revestimento) e a superfície da ponta de eixo, onde pode-

se observar a presença de trinca denotada pelas setas em vermelho.

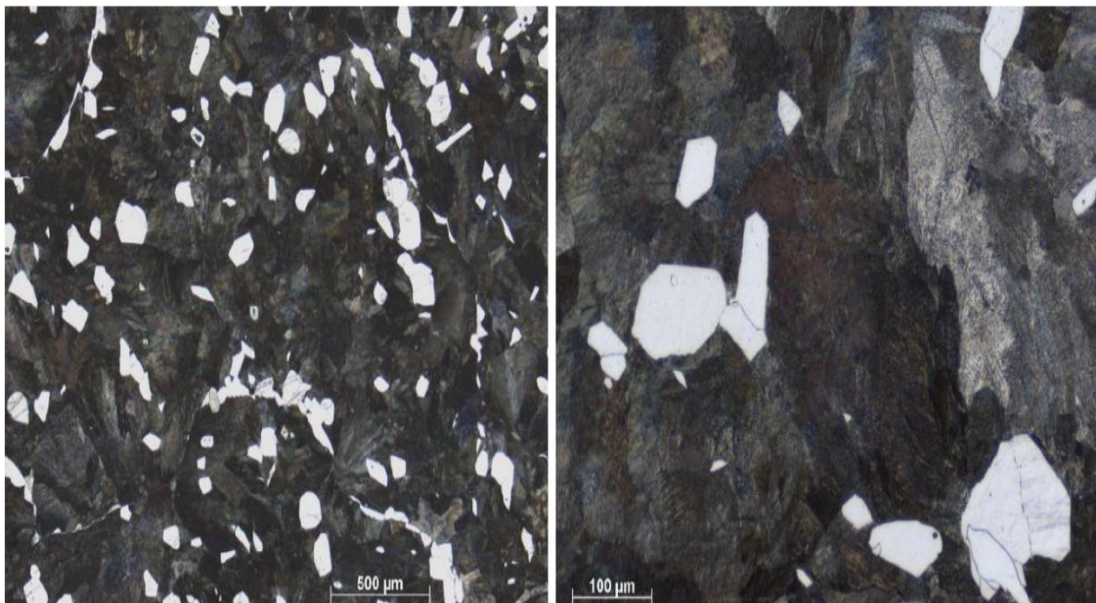
Figura 22 - Estrutura em região com trinca perpendicular a ruptura.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

A Figura 23 A e B representa a real estrutura do metal base da ponta de eixo, sendo identificado em sua composição, perlita com ocorrências de ferritas, sendo em sua maioria ferritas poligonais, característica de estrutura normalizada.

Figura 23 A e B - A a esquerda, estrutura do metal base ampliada 50 vezes, B estrutura do metal base ampliada 200 vezes.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

5.1.3 Análise química e microdureza *Vickers*

O *Pinch Roll* estudado quando novo, é constituído de uma ponta de eixo fabricada em aço SAE (*Society of Automotive Engineers*) 4140, sendo que sua mesa é fabricada de tubo referenciado a norma DIN (*Deutsches Institut für Normung*) 1630 – L355 EN 10025 - S355J2G3, a superfície da mesa tem a dureza de 50 HRC proveniente da deposição de material por processo de soldagem e posterior tratamento.

Na análise realizada foi constatada que a ponta de eixo do *Pinch Roll* estudado foi confeccionada em aço ligado, com composição química similar a especificada pela norma SAE 4140. Constatou-se também que a recuperação do rolo foi falha, não seguindo os parâmetros estipulados pelo projeto, pois, quando comparado a um rolo novo, a média de dureza avaliada na ZTA e superfície do mesmo estão completamente fora dos padrões de dureza estipulados, sendo que a superfície de um rolo novo deve apresentar a dureza de aproximadamente 513 HV (40 HV para mais ou para menos) e foram encontrados valores muito abaixo para área recuperada com deposição de solda e muito acima para a área da ZTA da ponta de eixo analisada. Os resultados da análise química realizada estão descritos no Quadro 3. No Quadro 4 são apresentados os valores de microdureza Vickers do material, bem como o valor estimado de limite de resistência calculado a partir do valor médio de microdureza.

Quadro 3 - Resultados de composição química.

Resultados		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Alt
			0,36	0,79	0,46	0,029	0,008	0,97	0,17	0,29	0,02	0,015
SAE 4140	Min.	0,38	0,75	0,15	-	-	0,80	-	0,15	-	--	--
	Máx.	0,43	1,00	0,35	0,030	0,030	1,10	0,25	0,25	0,35	--	--

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

Quadro 4 - Resultados de microdureza HV - Valor obtido a partir do resultado de dureza média, conforme ASTM A370 tabela 3.

Resultados Metal base	Média	Limite de Resistência	Resultados solda	Resultados ZTA
236 – 220 – 204	220	715 MPa*	370 – 363 – 372	671 – 660 – 656

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

No Quadro 4, para a análise do limite de resistência foi utilizado a média dos valores obtidos na microdureza para se chegar ao resultado no qual está em “*”.

A Figura 24 demonstra a variação de dureza entre a estrutura básica, a

ZTA e a superfície da ponta de eixo. Pela análise realizada constatou-se que a ponta de eixo foi recuperada por um processo no qual não é automatizado e procedimentado, devido à disposição de vários passes de solda não uniformes e conseqüentemente a variação abrupta de dureza em mesma região da ZTA, contribuindo assim para a falha que ocorreu.

Figura 24 - Estrutura da seção longitudinal em região de início da ruptura (mesma região das fig. anteriores), mostrando trincas próximas a ruptura e indicações de valores de dureza.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

Segundo Blau (2010), valores referentes a dureza de um revestimento possibilitam uma avaliação prévia da variação das propriedades mecânicas do material soldado, sendo estas correlacionadas aos parâmetros do processo de soldagem.

5.2 Análise de falha pela metodologia RCFA

Segundo Kardec e Nascif (2019), a RCFA pode ser abordada e representada de diversas formas, porém, sua concepção abrange uma linhagem comum. A elaboração da RCFA foi baseada no modelo apresentado pelos autores em questão, a fim de se chegar a uma causa raiz, identificada como falta de padronização de um procedimento de reparo detalhado para recuperação do *Pinch Roll*, conforme apresetado pelo Quadro 5.

Análise das Causas - Raízes de Falha (Root Cause Failure Analysis - RCFA)	
Metodologia	
RCFA baseia-se no questionamento : POR QUÊ?	
Falha: Quebra do Pinch Roll Inferior	
Pergunta	Resposta
Por que houve a quebra do Pinch Roll?	A região da ponta de eixo do Pinch Roll Inferior avariou/quebrou.
Por que a ponta de eixo avariou/quebrou?	Falha na Zona Termicamente Afetada (ZTA) devido descontinuidade da solda.
Por que ocorreu a falha/quebra na ZTA?	Procedimento de reparo do rolo ineficiente.
Por que o procedimento de reparo do Pinch Roll foi ineficiente?	Falta de padronização de um procedimento de reparo detalhado para recuperação do Pinch Roll.
Causa Raíz: Falta de padronização de um procedimento de reparo detalhado para recuperação do Pinch Roll.	
Plano de Ação: Elaborar procedimento de reparo detalhado para recuperação do Pinch Roll.	

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024).

Conforme análise RCFA realizada chegou-se a conclusão, causa raíz, que o motivo da quebra do *Pinch Roll* Inferior foi a falta de um procedimento padronizado que descrevesse o passo a passo de como é realizado o reparo por solda, a recuperação do rolo. A falta de um procedimento de reparo bem elaborado e rico em detalhes gerou uma interpretação de que a recuperação do *Pinch Roll* poderia ser realizada de qualquer forma, implicando em uma solda de má qualidade que gerou a fragilidade da estrutura martensítica presente na zona termicamente afetada (ZTA).

Segundo Arruda (2023), a física do arco elétrico, é um fator crítico na soldagem que influencia diretamente a qualidade da solda. A microestrutura e geometria da solda, da ZTA, é diretamente afetada pela intensidade do arco elétrico e sua estabilidade, parâmetros como estes, corrente elétrica e tensão de soldagem são muito importantes para garantia da transferência de energia via calor uniforme e adequada para a solda. Com o procedimento de recuperação do *Pinch Roll* detalhado e bem elaborado, frizando parâmetros e como deve ser realizado a recuperação, o risco de quebras similares ao ocorrido conseqüentemente iria ser abolido.

O documento de Análise das Causas Raíz (es) de Falha (*Root Cause Failure Analysis - RCFA*) completo, relativo a quebra do *Pinch Roll* Inferior se encontra nos anexos deste trabalho.

5.3 Viabilidade econômica

Foi realizado um estudo de viabilidade econômica fomentando a comparação de valores de um *Pinch Roll* reparado, versus um novo, para aplicação

no processo de laminação. Isto, para destacar a importância ou não da recuperação de um deste componente uma vez avariado, demonstrando ganhos monetários para a manutenibilidade do processo. Otimizando assim custos e contribuindo para a competitividade do negócio, uma vez que, se implica no custo de transformação e consequentemente no preço final do produto.

No Quadro 6 estão listados os dados de comparação dos dois tipos de *Pinch Rolls* utilizados no processo, o novo e o reparado, evidenciando assim que a recuperação do *Pinch Roll* pelo procedimento correto é melhor tanto em termos de qualidade, quanto monetariamente para o processo. O valor de reparo em comparação ao de um equipamento novo em percentual está na casa de 33%, sendo que o valor base de viabilidade praticado por uma grande planta siderúrgica situada em Minas Gerais é de até 80% do valor de um equipamento novo, implicando assim na viabilidade positiva de recuperação do *Pinch Roll*.

Não é possível comparar a vida útil do rolo reparado com um rolo novo pois, a troca é realizada preventivamente por tempo, a fim de garantir a qualidade do material laminado no processo. A viabilidade se confirma devido o rolo recuperado durar o tempo previsto, até a sua troca programada.

Quadro 6 - Estudo de viabilidade de reparo do *Pinch Roll*

Estudo de Viabilidade de Reparo - <i>Pinch Roll</i>		
Descrição	Valor em unidade monetária	Proporção de correlação
Custo rolo pinch roll inferior novo (Valor de referência, último rolo comprado)	406000 UNI	100%
Custo de recuperação do rolo pinch roll inferior (Valor de referência, último rolo reparado)	134000 UNI	33%
Valor de viabilidade de reparo considerado por multinacional relação rolo reparado x novo em %	80%	
Valor de relação de um rolo reparado x novo em %	33%	
Logo, o reparo por procedimento correto é viável economicamente para o processo.		

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024). . .

6 CONCLUSÃO

A ponteira foi fabricada em aço médio teor de carbono, microligado e sua composição é similar a especificada pela norma SAE 4140. A microestrutura do material é constituída por perlita com ocorrências de ferritas, sendo maioria, ferritas poligonais, característica de estrutura normalizada. Há estrutura característica de solda na região superficial da ponteira, provavelmente resultante de recuperação por processo de soldagem realizada na peça. O metal de solda apresenta dureza elevada em relação ao metal base, e na zona termicamente afetada, houve formação de estrutura martensítica, com valores de dureza muito altos.

A ruptura teve início por processo de fadiga, em região do raio da peça, devido a esforços cíclicos rotacionais aos quais a peça estava exposta. Nessa região são observadas várias trincas tanto internas, quanto aflorando na superfície da ponteira, trincas que estão associadas a fragilidade da estrutura martensítica presente na zona termicamente afetada pelo processo de soldagem ao qual a peça foi submetida. A maior parte da fratura ocorreu de forma frágil, consequentes da propagação das trincas na camada superficial.

Diante da análise de viabilidade de recuperação dos *Pinch Rolls*, foi constatado que a recuperação é viável para o processo quando ocorrida de forma sistemica e padronizada, seguindo o procedimento correto de reparo. Outro ponto observado foi o de que, a recuperação dos rolos quando realizada de maneira correta, é uma fonte economicamente viável para o processo, uma vez que o processo de recuperação dos rolos fica na casa de 1/3 do valor quando comparado ao de compra de um rolo novo.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Há como sugestão a continuidade no aprofundamento de estudos para a aplicação de análise estrutural por elementos finitos visando compreender o comportamento do *Pinch Roll* em trabalho de laminação, pontuando assim, possíveis pontos de fragilidade ainda não identificados, visando a adoção de planos de ação que mitigariam falhas precoces, tendendo a aumentar ainda mais a confiabilidade do equipamento estudado e do processo no qual ele está inserido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Welding process advanced**. Miami, Flórida, Estados Unidos da América, 1999.

ARRUDA, Nicolas Freitas de. **Metalurgia da Soldagem**. 1. ed., Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2023. 52 p.

BLAU, Peter J. Elevated-temperature tribology of metallic materials. **Tribology International**, v. 43, n. 7, p. 1203-1208, 2010.

BLAZEVIC, D. T., **Operação de laminador de tiras a quente**, trad. Vol. 1, Olympia Fields, Illinois, 1990.

BRESCIANI FILHO, Ettore *et al.* (coord.). **Conformação plástica dos metais: 1ª parte: metalurgia da conformação plástica: 2ª parte: mecânica da conformação plástica**. 2. ed. Campinas: UNICAMP, 1985. 234 p.

BRESCIANI FILHO, Ettore *et al.* (coord.). **Conformação Plástica dos metais**. 6. ed. São Paulo, 2011. 254 p. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>. Acesso em 28 de julho de 2024.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: estrutura e propriedades das ligas metálicas : volume I**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education, 1986a. xiv. 266 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento: volume II**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986b. xv. 315 p.

DMI, Dinesh Metal Industries. **EN 10025 S355J2G3 Tubo Sem Costura**. Mumbai, Índia, 2020. Disponível em: <https://www.dmitubes.com/en-10025-2-s355j2g3-structural-steel-plate.html>. Acesso em 07 ago. 2024.

FBTS, Fundação Brasileira de Tecnologia e Soldagem. **Curso de Inspetor de**

Soldagem – Terminologia. Rio de Janeiro, Rev. 2000.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais.** 2. ed. São Paulo: Artliber, c2012. 260 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), Organização Internacional de Normalização. **Standard R857**, 1958.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica.** 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2019. 560 p. ISBN 978-85-414-0362-7.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício de; OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos.** São Paulo, SP: Edgar Blücher, 2013. 235 p.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy.** 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003. 466 p.

KRAMER S, Knepp G, Rosenthal D. **Technology and Performance of Modern Steckel Mills.** Iron and Steel Engineer, 1997, p.17-26.

LINO, João Júnio Pereira *et al.* **Os benefícios da utilização da estratégia tapering na redução das cargas de laminação nas pontas da tira em laminadores steckel.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 13, n. 3, p. 279-287, 2016.

MESSLER, Robert W.. **Principles of Welding : Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy.** 1. ed. New York: John Wiley, 1999.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 2012. 209 p. Disponível em: <<https://maiscursoslivres.com.br/cursos/auxiliar-de-servicos-gerais-metalurgicos-apostila04.pdf>>. Acessado em 26 de maio de 2024.

MOURÃO, Marcelo Breda (coord.). **Introdução à siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007. 428 p.

PERNAMBUCO, Luiz Rodrigo Alegre. **Avaliação da usinabilidade de cilindros para laminação de tiras a quente**. 110 p. 2014. Dissertação de mestrado: (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/a6965c25-e59e-4a4a-9adf-be2b9c802928/content>>. Acesso em: 09 de junho 2024.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N.. **Manutenção: função estratégica**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PIUBELLI, Felipe. **Influência da taxa de deformação por laminação nas propriedades mecânicas na liga de alumínio 1100**. p. 59. 2017. Monografia: (Curso de Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9221/1/PB_DA_MEC_2017_2_09.pdf>. Acesso em: 16 de maio 2024.

RANSOM, D. L.; **A practical guideline for a successful root cause failure analysis**. Proceedings of the Thirty-Sixth Turbomachinery Symposium, p.149-155, 2007.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos processos siderúrgicos**: (Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos; Área: Conhecimentos Básicos). São Paulo: ABM, 2005. 150 p.

RODRIGUES, Enilson dos Anjos. **Recuperação de rolos de laminação**. 54º Seminário de Laminação e Conformação, São Paulo, SP, vol. 54, num. 1, p. 108-113, outubro, 2017.

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação mecânica**. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 167 p.

SHARMA, R. K. e SHARMA, P.; **Methodology and Theory System Failure Behavior and Maintenance Decision Making Using RCA, FMEA and FM**. Journal of Quality in Maintenance Engineering. v.16, n. 1, p. 64-88, 2010.

SOUZA, A.L.; BORGES, J.M., SCHUWARTEN, W.J.; PEREIRA, M.M., SIVEIRA, J.H.D.. **Laminação de Tiras a Quente da Gerdau**. 50º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos Internacional, 2013: p. 369-380.

SOUZA, Altair Lucio de. **Estudo da tensão média de escoamento de aços laminados em tiras a quente**. 53 p. 2010. Dissertação de mestrado: (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Tecnológica Federal de Minas Gerais. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8R9Q4Z>>. Acesso em: 09 de junho, 2024.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 130 p.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 286 p.

TECCO, D. G.; STEKLY, J. J. K.. **Avanços e perspectivas para o revestimento por soldagem de rolos para lingotamento contínuo e laminação a quente**. 52o. Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2o. Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, 1997, São Paulo. 52o. Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2o. Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1997.

ULUTAN, Mustafa et al. Microstructure and Wear Behavior of TIG Surface-Alloyed AISI 4140 Steel. **Tribology Transactions**, v. 54, n. 1, p. 67-79, 2011.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (coord.). **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 494 p.

ANEXOS

Anexo A - RCFA - Quebra do *Pinch Roll* Inferior

Análise das Causas - Raízes de Falha (Root Cause Failure Analysis - RCFA)	
Metodologia	
RCFA baseia-se no questionamento : POR QUÊ?	
Falha: Quebra do <i>Pinch Roll</i> Inferior	
Pergunta	Resposta
Por quê houve a quebra do <i>Pinch Roll</i> ?	A região da ponta de eixo do <i>Pinch Roll</i> Inferior avariou/quebrou.
Por quê a ponta de eixo avariou/quebrou?	Falha na Zona Termicamente Afetada (ZTA) devido descontinuidade da solda.
Por quê ocorreu a falha/quebra na ZTA?	Procedimento de reparo do rolo ineficiente.
Por quê o procedimento de reparo do <i>Pinch Roll</i> foi ineficiente?	Falta de padronização de um procedimento de reparo detalhado para recuperação do <i>Pinch Roll</i> .
Causa Raíz: Falta de padronização de um procedimento de reparo detalhado para recuperação do <i>Pinch Roll</i> .	
Plano de Ação: Elaborar procedimento de reparo detalhado para recuperação do <i>Pinch Roll</i> .	

Anexo B - Relatório RCFA - Quebra do *Pinch Roll* Inferior

Análise das Causas - Raízes de Falha (Root Cause Failure Analysis - RCFA)			
ANÁLISE DAS CAUSAS-RAÍZES DE FALHA (RCFA)			
Empresa: Siderúrgica "G"		Local: Minas Gerais	Data: 03/03/2024
Cliente: Manutenção Mecânica		Sistema:	
Planta: Laminação de Tiras a Quente			
Falha: Quebra do <i>Pinch Roll</i> Inferior			
Equipamento(TAG): <i>Pinch Roll</i> Inferior			
Por que houve a quebra do <i>Pinch Roll</i> ?		Impacto da Falha	
Falha: Futura	Ocorrida	Perda de Produção:	5125 toneladas
Preencha os campos abaixo se a falha já ocorreu		Parada de Unidade?: Sim	<input type="checkbox"/> Não
Falta de padronização de um procedimento de reparo detalhado para recuperação do <i>Pinch Roll</i> .		Total Horas Paradas:	41
Por que o	Hora: 21:49	Parada Equipamento?: Sim	<input type="checkbox"/> Não
Colaboradores que podem descrever a ocorrência:		Impacta Segurança?: Sim	<input type="checkbox"/> Não
Adriano - Plantonista do turno		Meio Ambiente?: Sim	<input type="checkbox"/> Não
William - Inspetor		Custo Total da Falha:	6900000,00 UNI
Causa Raiz: Falta de padronização de um procedimento de reparo detalhado para recuperação do <i>Pinch Roll</i> .		Custo Melhoria Estim.:	
Rep___ Manut___ Projeto___ Mater___ Outras___		Prazo Execução:	
Plano de Ação: Elaborar procedimento de reparo detalhado para recuperação do <i>Pinch Roll</i> .		NPR:	
Tipo de Falha			
Mec___ Quebra___ ZTA___ Outro___			
Descrição da possível falha ou falha ocorrida - Citar equipamentos envolvidos			
PROBLEMA - Ruído anormal seguido de falha e perda de condição do <i>Pinch Roll</i> Inferior de Entrada.			
CAUSA E AÇÃO - Foi realizado posicionamento e bloqueio para iniciar troca do <i>Pinch Roll</i> Inferior de Entrada, devido quebra da ponta de eixo do rolo lado acionamento, ocasionando o mesmo a não tracionar mais o material, não dando condições para prosseguir o com o processo de laminação.			
Causas-Raízes:			
Zona térmica afetada (ZTA) em função da descontinuidade no processo de soldagem durante o reparo do <i>Pinch Roll</i> Inferior.			
Recomendações:			
Deverá ser criado um procedimento que contemple detalhadamente, todos os passos para uma recuperação confiável do rolo. O memos devem trazer em seu corpo, informações como, tipo de procedimento de soldagem, parâmetros utilizados, temperaturas de pré-aquecimento e pós soldagem, como será realizado o procedimento de alívio de tensões, ensaios não destrutivos utilizados antes de realizar o procedimento e após a recuperação do rolo atestando a qualidade da recuperação.			
Acompanhamento das Recomendações			
Ação: Criar roteiro padrão de reparo/procedimento de recuperação dos <i>Pinch Rolls</i> Inferior e Superior.		Responsável: Engenheiro responsável	
Data Receb.: 05/03/2024	Prev. Conclusão: 31/06/2024	Data Conclusão: 31/08/2024	
Ação: Realizar ensaio não destrutivo nos rolos reservas que estão na área, e identificando anormalidades, os mesmos deverão ser enviados para reparo conforme procedimento criado.		Responsável: Inspetor responsável	
Data Receb.: 05/03/2024	Prev. Conclusão: 31/06/2024	Data Conclusão: 31/06/2024	
Ação: Realizar a substituição dos outros 3 <i>Pinch Rolls</i> em operação (2 <i>Pinch Rolls</i> Superiores e 2 <i>Pinch Rolls</i> Inferiores) por sobressalente novo, não instalando os sobressalentes que foram reparados sem procedimento até que os mesmos sejam adequados.		Responsável: Inspetor responsável	
Data Receb.: 05/03/2024	Prev. Conclusão: 31/12/2024	Data Conclusão: 26/12/2024	
Custo Real Melhoria (UNI): 272000,00	Aprovação:	Data: 06/01/2025	