

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* OURO BRANCO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

ODAIR ALVES DE JESUS

**ESTUDO DE FALHA E COMPARAÇÃO DE LINGA DE CORRENTE ATUANDO  
COMO ELEMENTO MECÂNICO DE LAMINADORES DE PERFIS ESTRUTURAIS  
REVERSÍVEIS**

OURO BRANCO  
2025

ODAIR ALVES DE JESUS

**ESTUDO DE FALHA E COMPARAÇÃO DE LINGA DE CORRENTE ATUANDO  
COMO ELEMENTO MECÂNICO DE LAMINADORES DE PERFIS ESTRUTURAIS  
REVERSÍVEIS**

Projeto apresentado ao Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Ouro Branco, como requisito parcial à aprovação na disciplina: Trabalho de Conclusão de Curso I.

Orientador: Prof. Dr. José Alberto da Cruz Junior

OURO BRANCO  
2025

J58e Jesus, Odair Alves de.

Estudo de falha e comparação de linga de corrente atuando como elemento mecânico de laminadores de perfis estruturais reversíveis / Odair Alves de Jesus. – 2025.

66f.: il.col.

Orientador: José Alberto da Cruz Junior.

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

1. Linga de corrente. 2. Comparação. 3. Falha. 4. Análise. I. Jesus, Odair Alves de. II. Junior, José Alberto da Cruz. III. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. IV. Título.

CDU: 622

DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC (ANEXO IV)

ATA DA DEFESA DE TCC

No dia 17/02/2025, às 18:00 horas, o aluno Odair Alves de Jesus do curso de Eng. Metalúrgica turma 2020 do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o ( ) TCC I  TCC II e foi Aprovado (aprovado/reprovado) com a nota 10,00, 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, Odair Alves de Jesus, estudante do curso Bacharelado Eng. MET. 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: Odair Alves de Jesus

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO

Orientador(a): Nome: Prof. Alberto da Paes Junior Assinatura: [Assinatura]

Membro 2: Nome: Vanessa Graciana de Almeida Assinatura: [Assinatura]

Membro 3: Nome: Carlos Eduardo Reis de Carvalho Assinatura: [Assinatura]

Membro 4: Nome: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Membro 5: Nome: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Aluno: Nome: Odair Alves de Jesus Assinatura: [Assinatura]

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e perseverança, ao qual me capacita para superar todas as dificuldades e diversidades da vida.

A minha digníssima esposa, Paloma, e aos meus filhos, Rebeca e Rafael, que são a minha fortaleza, meu refúgio, meu oásis e o meu melhor projeto.

Ao meu orientador, Prof. Dr. *José Alberto da Cruz Junior*, pelos ensinamentos, disponibilidade e por acreditar na realização deste trabalho.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para este projeto.

“Determinando tu algum  
negócio, ser-te-á firme, e a luz  
brilhará em teus caminhos.”

Jó 22:28

## RESUMO

Este trabalho consiste na análise das possíveis falhas de lingas de corrente, amplamente utilizadas no setor industrial, especialmente em aplicações de elevação de cargas com variação de peso e forma. As lingas também são empregadas como elementos mecânicos em diversas máquinas. Neste estudo, será analisada a falha de uma linga de corrente específica, utilizada como componente mecânico em laminadores reversíveis de perfis estruturais do tipo X/H. Essa linga é responsável pela sustentação do cilindro horizontal superior, utilizado em uma siderúrgica, onde foi submetida a condições adversas, como calor, umidade e ciclos constantes de tensão. O objetivo foi avaliar a viabilidade de substituir a linga de Grau 8 pela de Grau 10. Foi realizada a caracterização da superfície de fratura da linga de Grau 8. Além disso, foram comparadas as lingas de Grau 8 e Grau 10, bem como suas respectivas normas de fabricação. As análises realizadas para comparação incluíram: tensões por meio de cálculos analíticos, inspeção visual, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura – MEV/EDS (espectroscopia por energia dispersiva), análise química via espectrômetro ótico e dureza Vickers – HV 100gf. Essas análises foram essenciais para determinar a causa real da falha da linga e propor soluções para evitar a reincidência ou mitigar o problema. Este componente mecânico é de extrema importância para a estabilidade do processo contínuo de laminação de perfis estruturais.

**PALAVRAS-CHAVE:** linga de corrente, comparação, falha, análise.

## **ABSTRACT**

This study aims to analyze the possible failures of chain slings, widely used in the industrial sector, especially in applications involving lifting loads with varying weights and shapes. Slings are also used as mechanical elements in several machines. In this study, the failure of a specific chain sling, used as a mechanical component in reversible rolling mills of X/H structural profiles, will be analyzed. This sling is responsible for supporting the upper horizontal cylinder, used in a steel mill, where it was subjected to adverse conditions, such as heat, humidity and constant stress cycles. The objective was to evaluate the feasibility of replacing the Grade 8 sling with a Grade 10 sling. The fracture surface of the Grade 8 sling was characterized. In addition, the Grade 8 and Grade 10 slings were compared, as well as their respective manufacturing standards. The analyses performed for comparison included: stresses through analytical calculations, visual inspection, optical microscopy, scanning electron microscopy - SEM/EDS (energy dispersive spectroscopy), chemical analysis via optical spectrometer and Vickers hardness - HV 100gf. These analyses were essential to determine the real cause of the sling failure and propose solutions to prevent recurrence or mitigate the problem. This mechanical component is extremely important for the stability of the continuous rolling process of structural profiles.

**KEYWORDS:** chain sling, comparison, failures, analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fases progressivas de laminação (passes) do perfil I. ....	19
Figura 2 - Grupo de laminadores tandem - laminador desbastador (A); laminador acabador do flange (B); laminador acabador (C). ....	19
Figura 3 - Disposição dos cilindros de laminação do laminador universal reversível. ....	20
Figura 4 - Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados (a) barras, com diversas seções transversais (quadrada, redonda e chata); (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) tubo quadrado; (f) tubo redondo. ....	21
Figura 5 - Elementos que compõem a corrente de aço G8 e G10 estudadas. ....	23
Figura 6 - Representação da composição química. ....	23
Figura 7 - Elos cortados e em processo de conformação e soldagem. ....	24
Figura 8 - Esboço do diâmetro na solda do tipo 1. ....	25
Figura 9 - Esboço do diâmetro na solda do tipo 2. ....	26
Figura 10 - Diagrama Fe - Fe <sub>3</sub> C. ....	27
Figura 11 - Tratamento térmico por indução. ....	29
Figura 12 - Diagrama Espinha-de-Peixe método 6Ms. ....	31
Figura 13 - Método 6Ms. ....	31
Figura 14 - Curvas de Wöhler para: a) material que apresenta limite de fadiga; b) material que não apresenta limite de fadiga. ....	33
Figura 15 - Laminador acabador de perfil estrutural reversível do tipo X/H, objeto de estudo (linga corrente G8) se encontra na vista frontal, próxima ao centro da imagem, apresentado na imagem na cor: “preta” (elos) e cor “vermelha” (anelões). ....	36
Figura 16 – Diferentes pontos de rompimentos da linga G8 – A, B, C, D, E. ....	37
Figura 17 - Local da falha. Imagem reporta partes metálicas do laminador, assim como da linga corrente de aço G8, severamente agredida por oxidação. ....	39
Figura 18 - Apontamento do elo falho da linga de corrente G8 - A, B, C. ....	39
Figura 19 – Desenho técnico do sistema de fixação e atuação de trabalho das lingas de correntes de elos. Conectadas a uma parte do laminador "travessa/chapéus" ...	41
Figura 20 - Cilindro hidráulico do lado acionamento em corte - A. ....	42
Figura 21 - Elementos do sistema representativo do sistema e Diagrama de corpo livre. ....	45

Figura 22 - Primeira amostra fraturada do aço G8 – A e B.....	50
Figura 23 - Segunda amostra fraturada do aço G8 – A, B e C. ....	51
Figura 24 - Terceira amostra fraturada do aço G8 – A e B. ....	52
Figura 25 - Microscopia óptica do aço G8 com ampliação de 500x, ataque químico nital 3%.....	53
Figura 26 - Microscopia óptica do aço G10 com ampliação de 500x, ataque químico nital 3%.....	53
Figura 27 – Espectro representativo do produto de corrosão presente no interior das tricas e nos pites – aço G8. ....	54
Figura 28 - MEV aço G8, ataque nital 3%, ampliação de 7500x.....	55
Figura 29 - Espectro caracterizando o produto de corrosão - aço G10. ....	55
Figura 30 - MEV aço G10, ataque nital 3%, ampliação de 7500x. ....	56
Figura 31 - Diagrama da falha da linga corrente G8.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Prejuízo financeiro anual causado pelas falhas da linga G8.....	37
Tabela 2 - Variação da pressão de trabalho.....	43
Tabela 3 - Resultado do cálculo das reações dos apoios/pinos da travessa que é igual a tensão sofrida pelas lingas de correntes. ....	46
Tabela 4 - Comparações das lingas correntes - capacidade nominal x valor calculado. ....	49
Tabela 5 - Valores quantitativos do produto de corrosão presente no interior das trincas e nos pites - aço G8. ....	54
Tabela 6 - Dados quantitativos de produto de corrosão - aço G10.....	55
Tabela 7 - Comparação química dos aços G8 e exigências químicas da norma ABNT ISO 3076.....	57
Tabela 8 - Resultado composição química aço G10 e Norma DIN PAS 1060.....	58
Tabela 9 - Comparação química entre os aços G8 e G10. ....	58
Tabela 10 - Resultado de dureza HV e Limite de resistência a tração conforme norma e manual do fabricante. ....	59

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudo de falha em correntes de compensação para elevadores.....	35
Quadro 2 - Amostras de lingas de correntes de aço do tipo elos. ....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$  - Mícron

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Al - Alumínio.

ASTM - American Society for Testing and Materials.

AWS - American Welding Society.

B - Boro.

Bt - Bilhões de toneladas.

C - Carbono.

Ca - Cálcio.

Cr - Cromo.

DIN - Deutsches Institut Fur Nurmung.

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva.

EN - Norma Europeia.

Fe - Ferro.

FMEA - Mean time between failures (análise de modos e efeitos de Falha)

IFMG - Instituto Federal de Minas Gerais

ISO - International Organization for Standardization.

MEF - Método de elementos finitos.

MIG - Metal Inert Gás.

Mm - Milímetro.

Mn - Manganês.

MO - Microscopia óptica

Mo - Molibdénio.

NBR - Normas Brasileiras.

Ni - Níquel.

NM - Número.

NR - Normas Regulamentadoras.

P - Fósforo.

PAS - Publicly Available Specification.

RPN - Risk Priority Number (número de prioridade de risco).

RUD - Carl Rieger Und Friedrich Dietz.

S - Enxofre.

Si – Silício.

SKF - Suenska Kullager Fagriken.

Ti - Titânio.

TIG - Tungsten Inert Gás.

TRC - Transformação de resfriamento contínuo.

TTT - Tempo, temperatura e transformação.

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UNESP - Universidade Estadual Paulista.

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 - OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
2.1 - Objetivos geral.....	17
2.2 - Objetivos específicos .....	17
<b>3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
3.1 - Laminação de perfis estruturais.....	18
3.2 - Elementos mecânicos.....	21
3.3 - Fabricação das lingas de correntes.....	22
3.4 - Tratamentos térmicos das lingas de correntes .....	28
3.5 - Análise de modos e efeitos de falhas .....	29
3.6 - Fadiga mecânica .....	32
<b>4 - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
4.1 - Caracterização do objetivo da pesquisa.....	36
4.2 - Análise das tensões.....	40
4.3 - Análise visual .....	46
4.4 - Microscopia óptica.....	47
4.5 - Análise química – MEV/EDS.....	47
4.6 - Análise química via espectrômetro óptico .....	48
4.7 - Ensaio de dureza Vickers .....	48
<b>5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>49</b>
5.1 - Análise das tensões.....	49
5.2 - Análise visual .....	50
5.3 - Microscopia óptica.....	52
5.4 - Análise química – MEV/EDS.....	53
5.5 - Análise química via espectrômetro óptico .....	57

5.6 - Ensaio de dureza Vickers .....	59
5.7 - Diagrama de Ishikawa .....	60
<b>6 - TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>61</b>
<b>7 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>63</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

O aço, é uma liga de ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até 2,11% de carbono e outros elementos adicionados propositalmente ou devido aos processos de fabricação (CHIAVERINI, 1996). Este material está presente de forma onipresente no cotidiano da humanidade, em aplicações que muitas vezes passam despercebidas como em uma bicicleta, uma panela, uma simples agulha, um computador, em máquinas agrícolas ou em elementos mecânicos diversos como uma linga corrente de elos. A produção mundial de aço bruto, por exemplo, atingiu 1,892 Bilhões de toneladas em 2023, representando um aumento de 0,43% em relação ao ano anterior. Em 2024, a produção mundial de aço bruto alcançou 1,881 Bt., representando uma retração de aproximadamente 0,59%. As variações para 2025 ainda são incertas, a depender da recuperação econômica global, mas o Brasil destacou-se com um crescimento de 5,5% na produção de aço bruto em 2024, totalizando 33,7 milhões de toneladas, o que reflete a importância contínua do aço no desenvolvimento nacional e global (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023).

O aço possui uma vasta gama de aplicações, abrangendo desde utilidades domésticas, transporte e construção civil até embalagens, setor energético, agrícola e artístico. No setor industrial, em particular, o aço desempenha um papel crucial na operação de equipamentos complexos e na sustentação de cargas, como é o caso dos laminadores de perfis estruturais reversíveis. Neste contexto, a linga de corrente se destaca como um componente essencial, sendo construída com aço de alta resistência para suportar grandes tensões e resistir ao desgaste. Sua robustez e flexibilidade são fundamentais para o transporte e a sustentação de cargas, contribuindo significativamente para a eficiência da produção.

Entretanto, a falha prematura de uma linga de corrente pode resultar em interrupções graves na produção, anomalias nos produtos laminados e elevados custos de manutenção e reparo, além de comprometer a segurança dos operadores (SMITH et al. 2020). O estudo das falhas dessas lingas torna-se, portanto, imprescindível, especialmente diante de eventos repetidos de rompimento de lingas de corrente Grau 8 em intervalos curtos de tempo, que têm causado instabilidade no processo de laminação do caso estudado neste trabalho.

De acordo com Ragab *et al.* (1994), a corrosão é uma das principais causas de falhas em lingas de corrente, enquanto Moreira *et al.* (2012) destacam que entre 80% e 90% das falhas dos materiais ocorrem por fadiga. Os pontos de contato entre os elementos de ligação e as partes soldadas são particularmente suscetíveis a falhas, porém, no caso específico das lingas em questão, os rompimentos dos elos e dos elementos de ligação da linga, ocorreram em pontos variados.

Diante disso, o estudo da falha das lingas de corrente torna-se essencial para garantir a estabilidade na produção dos perfis estruturais, que é parte integrante da produção de aços acabados. Será realizado análises das tensões, análise visual, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura – MEV/EDS, análise química via espectrômetro ótico e dureza Vickers – HV 100gf. Além disso, será realizado a comparação entre as lingas G8, G10 e a suas normas de fabricação, afim de verificar viabilidade da substituição da linga G8 pela linga G10. Segundo Norton (2013), a seleção adequada de elementos mecânicos pode reduzir custos, aumentar a confiabilidade e prolongar a vida útil dos sistemas.

## **2 - OBJETIVOS**

### **2.1 - Objetivos geral**

O objetivo é analisar a fratura da linga G8, identificar falhas em sua aplicação nos laminadores, comparar os aços G8 e G10 com suas normas de fabricação, além de propor a substituição da linga G8 pela G10 em perfeitas condições ou superior como a G12.

### **2.2 - Objetivos específicos**

- 1) Analisar a causa da falha da linga de corrente G8 e seus elementos de ligação, através de análise de tensões, análise visual, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura – MEV/EDS, análise química via espectrômetro óptico e dureza Vickers – HV 100gf.
- 2) Confrontar os resultados obtidos dos ensaios, com as normas técnicas e catálogo do fabricante quando disponível.
- 3) Direcionar as medidas tratativas tanto físicas quanto administrativas com base nos resultados obtidos nas análises e comparações.

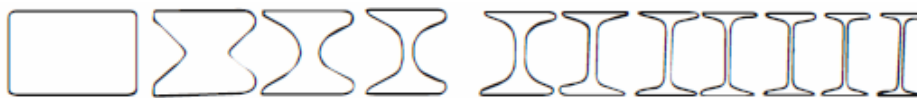
### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 - Laminação de perfis estruturais

Para avaliar as lingas de corrente é preciso compreender um pouco sobre o processo de laminação onde a mesma é utilizada. Nesta etapa será descrito sobre o processo de laminação de forma objetiva e suas aplicações.

Conforme Horacio *et al.* (2010) a laminação consiste na passagem de uma peça entre dois cilindros que giram em sentidos opostos, de forma a reduzir a área de uma seção transversal. Durante a laminação, raramente passa-se o material somente uma vez entre os cilindros de laminação, pois a redução da área almejada normalmente não pode ser conseguida em um só passe (Figura 1). Assim o equipamento de laminação deve ser capaz de submeter o material a uma sequência de passes. A laminação pode ser realizada a quente ou a frio. A laminação é realizada a quente, onde o bloco, tarugo ou *beam blank* transpõem pelo forno atingindo uma temperatura de encharque de aproximadamente 1200°C. Em seguida são extraídos do forno por braços extratores, passam por descarepador (para remoção de óxidos de ferro “carepa”). A diante seguem por uma sucessão de laminadores e passes, conforme a família laminada, sendo dois desbastadores dispostos por cilindros horizontais duplos reversíveis com diversos canais de laminação. Conforme a necessidade faz se o corte de pontas ou calda (utiliza serras circulares automatizadas), na sequência a barra passa por um grupo de três laminadores universais reversíveis do tipo X/H (Figura 2) obtendo a forma final de boa qualidade dimensional e alta produtividade. Nesta etapa a linga de corrente tem grande importância, pois ela realiza a sustentação dos cilindros horizontais, fixando-os em contato com o prato (elemento mecânico, atuante como batente) dos “chapéus” superiores, suportada por outros elementos mecânicos, como: a travessa, cilindros hidráulicos, pinos e parafusos de fixação.

Figura 1 - Fases progressivas de laminação (passes) do perfil I.



Fonte: Estrutura de aço (WALTER, 2010).

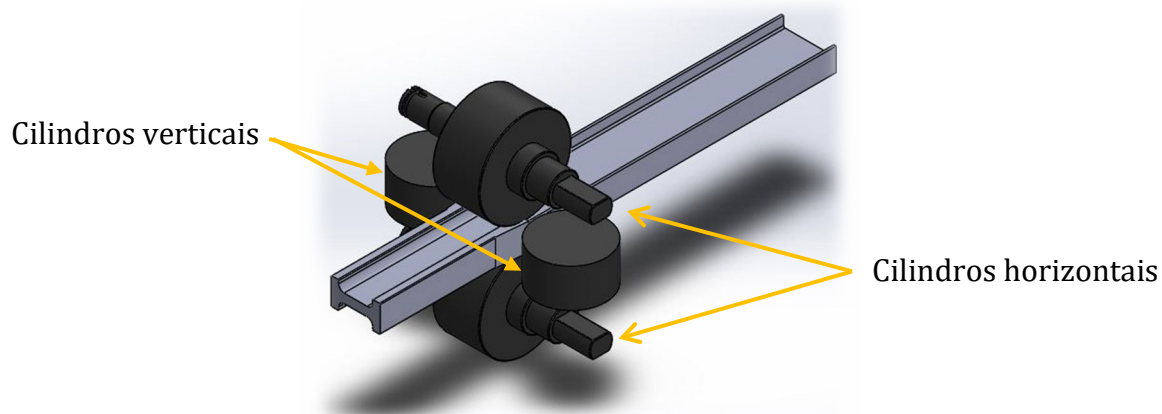
Figura 2 - Grupo de laminadores tandem - laminador desbastador (A); laminador acabador do flange (B); laminador acabador (C).



Fonte: Autoria própria.

Há vários tipos de laminadores, o laminador no caso observado é do tipo universal que dispõe de dois pares de cilindros de trabalho (Figura 3) com eixos horizontais e verticais (HORACIO *et al.*, 2010), dispostos em uma cadeia de laminação, onde através de movimentos mecânicos diversos de conjuntos de eixos, parafusos especiais, acoplamentos, lingas de correntes, sistemas hidráulicos e sistemas pneumáticos, acionados sistematicamente (automação) são realizados posicionamentos em diversos GAP'S para modelar os tarugos, blocos e *beam blank* em sucessivos passes nos perfis desejados como: I, W e H (HP) (Figura 4).

Figura 3 - Disposição dos cilindros de laminação do laminador universal reversível.

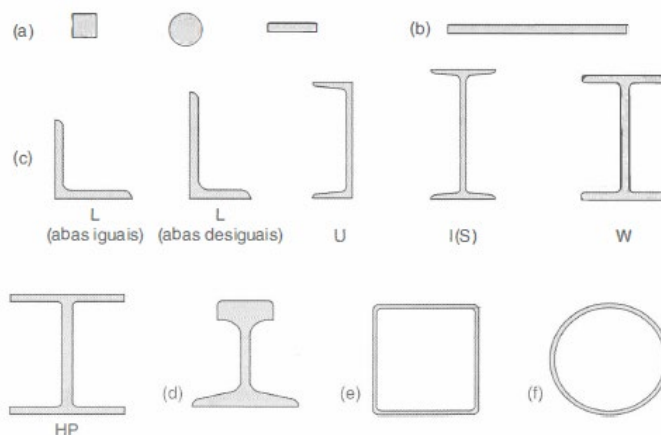


Fonte: Autoria própria.

As lingas de corrente G8 e G10 analisadas neste trabalho realizam a sustentação do cilindro horizontal superior, tendo como batente o chapéu superior, ambos são pressionados por um cilindro hidráulico de forma constante.

O perfil estrutural, fabricado em aço é essencial para a indústria mecânica em geral é, em específico, para a montagem de estruturas metálicas que requerem resistência e suporte adequado para cargas verticais. Sua forma geométrica (Figura 4) confere a resistência necessária para suportar e distribuir os carregamentos. Dentre as diversas aplicações do Perfil Estrutural, pode-se destacar a sua utilização em: construção, máquinas e equipamentos, implementos rodoviários e ferroviários. (GERDAU MAIS, 2024).

Figura 4 - Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados (a) barras, com diversas seções transversais (quadrada, redonda e chata); (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) tubo quadrado; (f) tubo redondo.



Fonte: Estrutura de aço (WALTER, 2010).

### 3.2 - Elementos mecânicos

De forma sucinta e direta serão abordados a fabricação, aplicação e importância dos elementos mecânicos, devido a linga de corrente estar sendo utilizada como um elemento mecânico é de suma importância obter este conhecimento, para entendimento deste trabalho.

A fabricação dos elementos mecânicos é um processo que envolve diversas técnicas e métodos, dependendo do tipo de elemento e sua aplicação. Segundo Kalpakjian e Schmid (2014), a usinagem é uma das técnicas mais comuns, onde o material é removido de uma peça bruta para criar a forma desejada. Técnicas como torneamento, fresagem e retificação são amplamente utilizadas na produção de componentes como engrenagens, eixos e parafusos. Além da usinagem, outros processos como fundição, forjamento e estampagem também são críticos. A fundição permite a criação de peças complexas a partir de moldes, enquanto o forjamento melhora a resistência do material ao submetê-lo a altas tensões e temperaturas (GROOVER, 2015).

Os elementos mecânicos têm ampla aplicação em diversos setores da engenharia e da indústria. As engrenagens, por exemplo, são essenciais na

transmissão de potência em sistemas mecânicos, sendo utilizadas em automóveis, máquinas industriais e dispositivos eletrônicos (JONES, 2001). Rolamentos são críticos para reduzir o atrito em sistemas rotativos, melhorando a eficiência e a vida útil dos equipamentos. Os eixos e acoplamentos permitem a transmissão de movimento e força entre diferentes partes de uma máquina, sendo fundamentais em sistemas de transmissão e em motores (SHIGLEY; MISCHKE, 2001).

A importância dos elementos mecânicos reside em sua capacidade de garantir a funcionalidade e a eficiência dos sistemas mecânicos. Segundo Norton (2013), a seleção adequada de elementos mecânicos pode reduzir custos, aumentar a confiabilidade e prolongar a vida útil dos sistemas. Além disso, a inovação em materiais e técnicas de fabricação tem permitido o desenvolvimento de componentes mais leves e resistentes, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência energética. Por exemplo, a utilização de materiais compósitos e ligas metálicas avançadas tem melhorado significativamente o desempenho de aeronaves e automóveis, reduzindo o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes (ASHBY, 2010).

As lingas de corrente neste estudo têm por finalidade a sustentação dos cilindros superiores e a transmissão de movimento, onde transmitem o movimento do cilindro hidráulico para o conjunto: cabeçote, mancais e cilindros.

### **3.3 - Fabricação das lingas de correntes**

Há uma diversidade de tipos de correntes utilizadas na indústria, como: correntes de rolos, correntes de esteiras, correntes de engrenagens, correntes de rolos de agulha, correntes de transmissão e correntes de elos; cada uma projetada para atender uma necessidade específica (ENCÓPEL, 2024). Neste trabalho será focado na corrente de aço de elos (Figura 5 – a), ilustrando as partes que compõem a corrente de aço estudada.

Figura 5 - Elementos que compõem a corrente de aço G8 e G10 estudadas.



Fonte: Adaptado de RUD (2024).

A fabricação das lingas de corrente de aço tem início com a seleção criteriosa da matéria-prima, especialmente no que diz respeito à composição química (Figura 6). Essa etapa é fundamental, pois está diretamente relacionada ao grau de qualidade e ao limite de resistência da corrente de aço. Os elementos de liga desempenham um papel crucial para alcançar o nível de qualidade desejado, já que, conforme destacado por RUD (2024), “uma corrente é simplesmente tão forte quanto o seu elo mais fraco”. O aço utilizado deve possuir propriedades específicas para garantia de resistência, durabilidade e segurança. Como afirmam Callister e Rethwisch (2012), os aços com teores adequadas de carbono e outros elementos de liga são os mais indicados para aplicações que exigem alta resistência mecânica e resistência à fadiga.

Figura 6 - Representação da composição química.

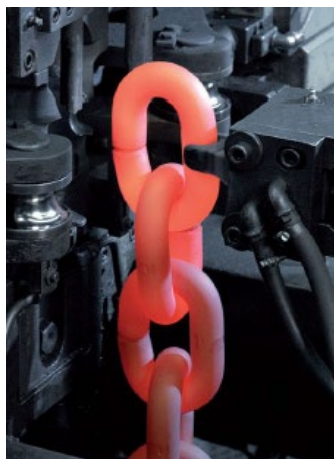


Fonte: Adaptado de RUD (2024).

As normas NBR 15516-01:2008, NBR 15516-02:2008, NBR 3076:2012, (DIN PAS 1061:2007) e (ASTM A391/A391M) indicam quais elementos químicos de liga que são obrigatórios. Conforme a norma NBR 3076:2012 o aço utilizado é produzido pelo processo elétrico ou por um processo de adição de oxigênio, deve estar totalmente acalmado e fabricado em conformidade em um processo de desoxidação adequado para fornecer um tamanho de grão austenítico padrão.

Após a seleção do material, o aço é cortado em pedaços menores, que serão posteriormente forjados ou conformados para formar os elos da corrente (Figura 7). Este processo pode envolver o uso de prensas hidráulicas, máquinas modeladoras e martelos de forja para moldar o aço na forma desejada, tendo processos automatizados ou sob ações humanas manuais. O processo de forjamento melhora a microestrutura do aço, aumentando sua resistência. Segundo a norma (ASTM A391/A391M), o forjamento deve ser realizado em temperaturas controladas para evitar defeitos estruturais.

Figura 7 - Elos cortados e em processo de conformação e soldagem.



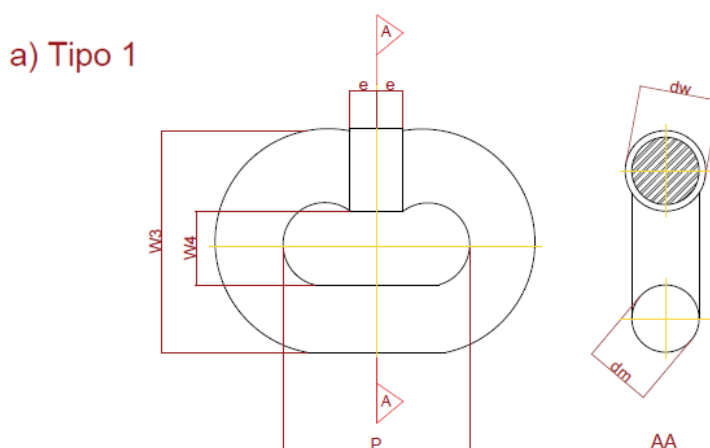
Fonte: Adaptado de RUD (2024).

Os elos forjados ou conformados são então soldados ou não para formar a corrente. A soldagem deve ser realizada de maneira que as juntas tenham resistência igual ou superior ao resto do elo. Para isso, são usados processos de soldagem a arco, como a soldagem TIG ou MIG. De acordo com a AWS D1.1/D1.1M (Código de Soldagem Estrutural – Aço), é fundamental que os soldadores sejam qualificados e que o procedimento de soldagem seja rigorosamente seguido para garantir a

integridade da corrente. Segundo a norma NBR 3076:2012, o diâmetro máximo na solda (Figura 8 e Figura 9) não pode exceder o seguinte:

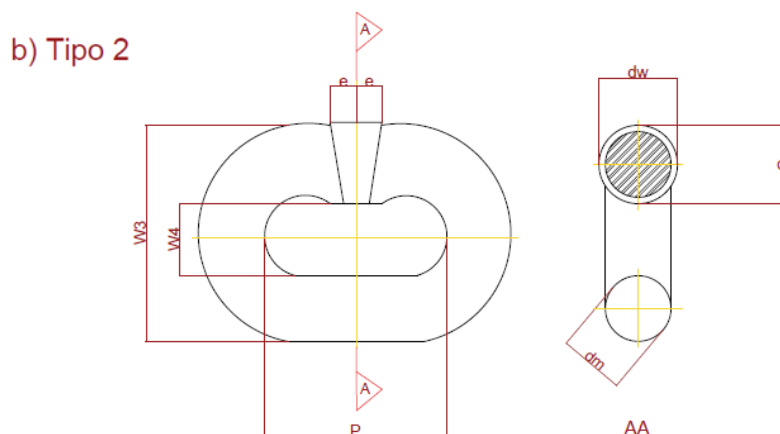
- a) Tipo 1: o diâmetro máximo na solda não pode exceder 10% acima do diâmetro nominal em qualquer direção; eliminando problemas funcionais, como dobras ou travamentos, limitando, consideravelmente, o excesso de solda acima de 10% do diâmetro nominal (Figura 8).
- b) Tipo 2: diâmetro máximo na solda não pode exceder 10% acima do diâmetro nominal em qualquer direção perpendicular ao plano do elo e 25% em outros planos (Figura 9). Garantindo a ausência desses riscos, limitando o excesso de solda além dos 10% permitido, conforme o tipo 1, a apenas certas áreas do elo (Figura 8 e Figura 9), fornecendo, assim, folga onde necessário.

Figura 8 - Esboço do diâmetro na solda do tipo 1



Fonte: Adaptado pelo autor, extraído da norma NBR 3076:2012.

Figura 9 - Esboço do diâmetro na solda do tipo 2



Fonte: Adaptado pelo autor, extraído da norma NBR 3076:2012.

### Legenda

P - Passo (comprimento interno do elo);

dm - Diâmetro medido do material, exceto na região da solda;

dw - Diâmetro medido do material na região da solda (tipo 1) ou dimensão da solda perpendicular ao plano do elo (tipo 2);

e - Comprimento afetado pela soldagem;

W1 - Largura interna do elo fora da região da solda (tipo 2);

W2 - Largura externa do elo na região da solda (tipo 1 e tipo 2);

W3 - Largura interna do elo na região da solda (tipo 1).

O comprimento cuja dimensão é afetada pela soldagem, não pode estender-se em cada lado do centro do elo mais do que 0,6 vez do diâmetro nominal,  $d_m$ , do material (Figura 8 e Figura 9).

O tratamento térmico é uma etapa crucial na fabricação das lingas de corrente de aço. Ele envolve processos como têmpera e revenimento, que aumentam a dureza e a resistência à fadiga da corrente. Callister e Rethwisch (2012) destacam que a têmpera rápida seguida de um revenimento controlado pode proporcionar uma combinação ideal de dureza e ductilidade. Conforme a norma NBR 3076:2012 as



aprovadas são então certificadas de acordo com as normas internacionais e nacionais, garantindo a conformidade com os padrões de segurança e desempenho.

### **3.4 - Tratamentos térmicos das lingas de correntes**

O tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, metais e ligas metálicas, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (CHIAVERINI, 1996).

Conforme Chiaverini (1996) os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes:

- a) Remoção de tensões (oriundas de esfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa);
- b) Aumento ou diminuição da dureza;
- c) Aumento de resistência mecânica;
- d) Melhora da ductilidade;
- e) Melhora da usinabilidade;
- f) Melhora da resistência ao desgaste;
- g) Melhora das propriedades de corte;
- h) Melhora da resistência a corrosão;
- i) Melhora da resistência ao calor;
- j) Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

A simples enumeração dos objetivos evidencia claramente a importância e a necessidade do tratamento térmico da linga de corrente independente do seu grau, afim de lhe atribuir propriedades mecânicas específicas para sua aplicação como elemento mecânico de sustentação de cargas axiais e atrito entre os elementos que compõe uma linga de corrente, como: elo, anelão, conectores, encurtadores, ganchos, anel elástico, travas e pinos.

O objetivo no tratamento térmico das lingas de corrente é obter a fase martensita revenida, onde após a conformação do tarugo, barra, fios máquinas, ou componentes acabados, solda dos elos ou não, ela é aquecida geralmente por

indução elétrica (Figura 11) de forma controlada até o material obter a temperatura do campo da austenítico em sequência é realizado a têmpera (que é o resfriamento rápido do aço) e em seguida o revenimento (usado para eliminar a maioria dos inconvenientes produzidos pela têmpera, além de aliviar ou remover as tensões internas, corrigindo as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando a sua ductilidade e resistência ao choque) (CHIAVERINI, 1996). No controle do resfriamento aplica-se os diagramas TTT (Tempo – Temperatura - Transformação) e TRC (Transformação por Resfriamento Contínuo) de forma a obter a microestrutura da martensita revenida, resultando em um material de alta dureza e resistência, principalmente a tração e atrito.

Figura 11 - Tratamento térmico por indução.



Fonte: Discovery Channel (2024).

### 3.5 - Análise de modos e efeitos de falhas

A Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA, do inglês *mean time between failures*) é uma metodologia sistemática para identificar, analisar e priorizar possíveis modos de falha em produtos, processos ou sistemas. O objetivo do FMEA é avaliar o impacto de cada falha potencial e determinar as ações corretivas necessárias para mitigar os riscos associados. Segundo Juran e Godfrey (1999), o FMEA é uma ferramenta essencial para melhorar a confiabilidade e segurança em processos de fabricação, sendo amplamente utilizado em indústrias.

A importância do FMEA reside na sua capacidade de prevenir falhas antes que elas ocorram, reduzindo custos associados a reparos e manutenções. Conforme Stamatis (2003), o FMEA é crucial para garantir a qualidade e a confiabilidade de produtos, identificando pontos fracos em fases iniciais de desenvolvimento.

O FMEA é aplicado em diversas etapas do ciclo de vida de um produto ou processo, desde o design até a produção e manutenção. O processo começa com a identificação dos modos de falha potenciais, seguido pela análise das causas e efeitos dessas falhas. Em seguida, cada modo de falha é avaliado em termos de severidade, ocorrência e detecção, resultando em um número de prioridade de risco (RPN, do inglês *Risk Priority Number*). Esse RPN auxilia na priorização das falhas que devem ser tratadas primeiro, garantindo um enfoque nas áreas mais críticas.

As falhas mecânicas ocorrem por diversas situações ou combinação de situações, como: fadiga, sobrecarga, desgaste, corrosão, esforços mecânicos, temperatura, danos causados por hidrogênio, fluência e alterações metalúrgicas. Neste tópico será apresentado o diagrama Ishikawa para aplicação na análise da falha da linga de corrente G8, considera-se neste caso falhas comportamentais na aplicação de padrões de ajustes.

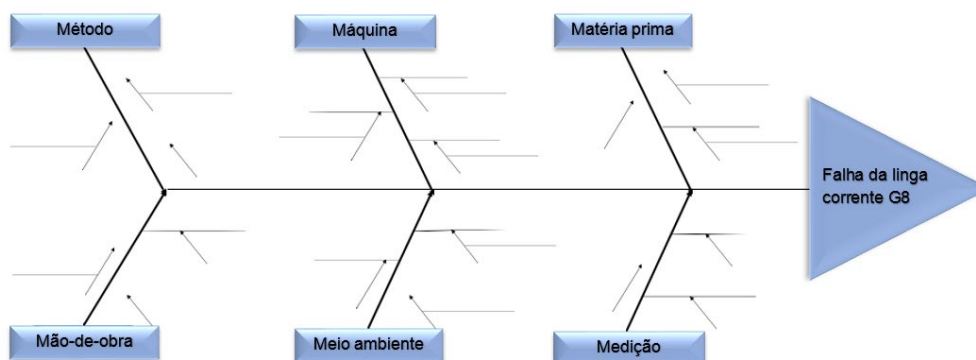
O FMEA pode ser eficazmente complementado pelo Diagrama de Ishikawa (Figura 12). Enquanto o FMEA identifica e prioriza os modos de falha, o Diagrama de Ishikawa ajuda a explorar e categorizar as causas potenciais dessas falhas, proporcionando uma visão mais clara das raízes dos problemas. Essa análise integrada permite uma abordagem mais estruturada para identificar as causas raiz das falhas e desenvolver ações corretivas eficazes.

O Diagrama de Causa e Efeito, também chamado de Diagrama de Ishikawa, ou ainda Diagrama “Espinha-de-Peixe”, será aplicado de forma analítica para que seja identificado a causa raiz na falha da linga de corrente G8. Nas discussões será comparado com os ensaios de forma a averiguar sua eficácia.

O Diagrama de Ishikawa foi criado pelo professor Kaoru Ishikawa da Universidade de Tóquio em 1943. Esse instrumento visa facilitar o processo de identificação das principais causas de problemas a serem resolvidos e os fatores/causas que levam a determinados resultados que se deseja obter, através de representação gráfica (SILVA, 2008; MACEDO, 2010). Ou seja, o Diagrama de

Ishikawa é facilitador da identificação das principais causas que podem gerar o efeito (SEBRAE, 2005; FERREIRA, 2012).

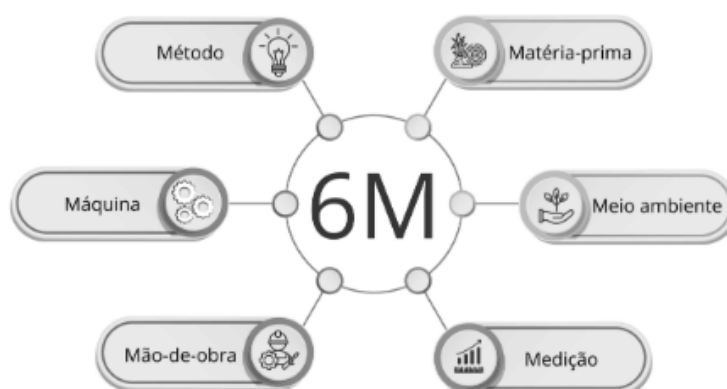
Figura 12 - Diagrama Espinha-de-Peixe método 6Ms.



Fonte: Autoria própria.

Conforme José Souza (2019) as espinhas dorsais representam as causas primárias. As mesmas são provenientes de algum modelo utilizado. Não obstante, existem vários modelos que podem preencher essa parte. O modelo mais tradicional agrega as causas primárias em 6 grupos, também chamado de 6Ms ou método 6Ms (Figura 13) a saber: (M1) Método; (M2) Máquina; (M3) Matéria Prima; (M4) Mão-de-obra; (M5) Meio ambiente; e (M6) Medição.

Figura 13 - Método 6Ms



Fonte: José Souza (2019).

Como o problema central nem sempre fica explícito no início, faz-se necessário a construção visual do diagrama. Definição importante para construção do diagrama (causa/efeito), segundo José Souza (2019) então, observa-se: causa, segundo o dicionário, é aquilo que faz com que algo exista ou aconteça. Origem, motivo, razão. O efeito, por sua vez, é aquilo que é produzido por uma causa. Consequência, resultado.

Sendo assim o problema é descrito na cabeça do esqueleto/diagrama do “peixe”. Após isso, traça-se uma linha horizontal que parte do problema para a esquerda. Desta linha horizontal são desenhadas linhas diagonais, tanto para cima quanto para baixo, nas quais estarão destacadas as causas primárias e secundárias do problema a ser solucionado (FERREIRA, 2012; SEBRAE, 2005).

A construção do diagrama normalmente é associada a técnica dos 5 porquês, ferramenta desenvolvida pelo engenheiro químico Taiichi Ohno. A técnica dos cinco porquês consiste na repetição da pergunta: “por que”? em relação ao problema que está sendo analisado até que se chegue à causa-raiz do problema. Associado ao diagrama espinha de “peixe” e a técnica dos cinco porquês, está conectado as ações, em que para cada causa-raiz dos 4Ms ou 6Ms, propõem-se uma ação. Essas ações são executadas por pessoas ou setores responsáveis, conforme: gravidade, urgência e tendência.

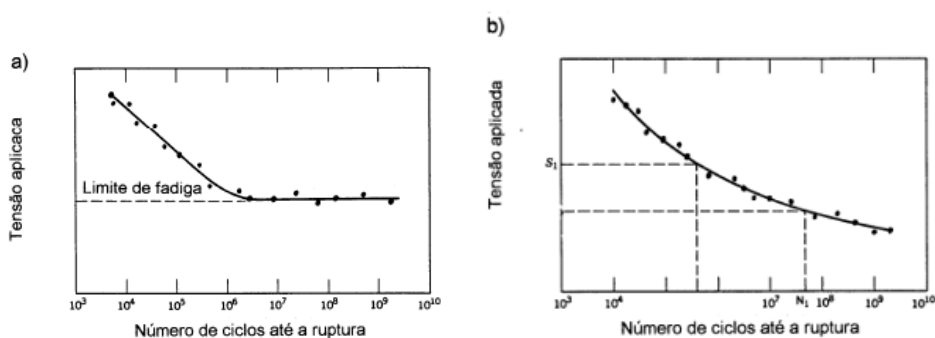
### **3.6 - Fadiga mecânica**

Conforme Angelo Padilha (1997) a falha por fadiga ocorre quando um material é submetido a carregamento cíclico. Em geral, quanto maior for o limite de resistência do material maior será sua resistência à fadiga. Por outro lado, quando um corpo de prova ou componente é submetido a esforços dinâmicos, repetidos ou flutuantes, o mesmo pode romper-se com uma carga muito inferior ao limite de resistência do material. A falha por fadiga geralmente ocorre de forma repentina e catastrófica. Pontes, aeronaves e numerosos componentes de máquinas estão sujeitos à falha por fadiga. O termo fadiga é utilizado porque a falha geralmente ocorre após longos períodos de tempo após solicitação cíclica. Praticamente todos os tipos de materiais estão sujeitos à falha por fadiga. A ruptura por fadiga é de natureza frágil,

mesmo em metais dúcteis. As trincas de fadiga iniciam-se em defeitos superficiais ou próximos da superfície. Estes defeitos podem ser estruturais, tais como inclusões ou arranhões, mas também podem surgir durante o processo de deformação.

Os resultados do ensaio de fadiga são em geral representados na forma de curvas de tensão aplicada versus número de ciclos até a ruptura (curvas de Wöhler). Alguns materiais não se rompem por fadiga se a tensão aplicada for menor que um determinado valor, denominado limite de fadiga. Outros materiais não apresentam esta tensão limite. A Figura 14 apresenta os dois tipos de comportamento mencionados.

Figura 14 - Curvas de Wöhler para: a) material que apresenta limite de fadiga; b) material que não apresenta limite de fadiga.



Fonte: ANGELO PADILHA, 1997.

Segundo André Pelliccione et al. (2014), fadiga é uma transformação estrutural permanente, gradual e localizada que acontece em materiais sujeitos a ciclos de tensões e deformações, podendo resultar em trincas ou quebras após um número suficiente de ciclos. Trincas por fadiga são ocasionadas pela combinação de tensões cíclicas, tensões de tração e deformação plástica. Caso algum destes três elementos não esteja presente, não ocorrerá o surgimento nem a propagação da trinca. O processo de fadiga consiste em três estágios:

- a) Dano de fadiga inicial, levando à nucleação e início da trinca;
- b) Crescimento cíclico progressivo da trinca (propagação) até que a seção transversal não trincada do componente não resista aos carregamentos impostos.

c) Ruptura final e repentina da seção transversal remanescente.

Conforme André Pelliccione (2014), essas tensões podem ser provenientes de carregamentos cíclicos mecânicos e/ ou térmicos e, geralmente, ocorrem abaixo da tensão limite de escoamento do material.

A superfície de fratura por fadiga possui aspecto macroscópico característico chamado de marcas de praia. As marcas de praia emanam do local de nucleação da trinca. A aparência de ondas ocorre devido à alteração de variáveis do ciclo de tensões (pico de tensão, amplitude, frequência, etc.). Essas marcas, que nunca se cruzam, indicam a posição da trinca em um determinado instante. As trincas continuam se propagando até atingir o tamanho crítico para sobrecarga frágil ou colapso plástico.

Entretanto, marcas de praia não são exclusivas de fadiga, podendo se formar em qualquer propagação descontínua de uma trinca, por exemplo, trincas provocadas por corrosão sob tensão ou hidrogênio. A indicação exclusiva de fadiga são as chamadas estrias, visíveis apenas no microscópio eletrônico de varredura (ANDRÉ PELLICCIONE et al. 2014).

Fraturas por fadiga frequentemente apresentam múltiplos pontos de nucleação, particularmente sob altas tensões, resultando em aspecto característico, chamado marcas de catraca. Desses pontos de nucleação, originam-se marcas de praia que à medida que se propagam podem se unir, formando uma única frente de propagação (ANDRÉ PELLICCIONE et al. 2014).

O Quadro 1 apresenta uma síntese do artigo estudo de falha em correntes de compensação para elevadores, conforme Carlos Zanella (2017).

Quadro 1 - Estudo de falha em correntes de compensação para elevadores.

<b>Estudo</b>	<b>Problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Resultados</b>
Estudo de Falha em Correntes de Compensação para Elevadores	Falhas em correntes de compensação de elevadores, registradas entre 2016 e 2017, que causam riscos graves.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analisar a causa da falha por sobrecarga;</li> <li>2. Avaliar defeitos de fabricação;</li> <li>3. Verificar a vida em fadiga das correntes.</li> </ol>	A falha das correntes ocorreu devido à fadiga, possivelmente acelerada por defeitos de fabricação. O método convencional indicou vida infinita, enquanto o método alternativo indicou vida limitada.

Fonte: Carlos Zanella (2017).

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico foram abordados os métodos, materiais e técnicas que foram aplicados na avaliação das ligas de correntes G8 e G10 e os recursos necessários para a realização dos experimentos físicos, químicos e mecânicos.

### 4.1 - Caracterização do objetivo da pesquisa

Os dados e materiais para construção deste trabalho foram coletados em uma siderúrgica, na área de laminação de perfis estruturais, pelo pesquisador.

O laminador foi o ponto onde a liga G8 estava atuando como elemento mecânico de sustentação de carga (cilindro de laminação horizontal superior), onde ela veio a falhar (rompendo um de seus elos) (Figura 15).

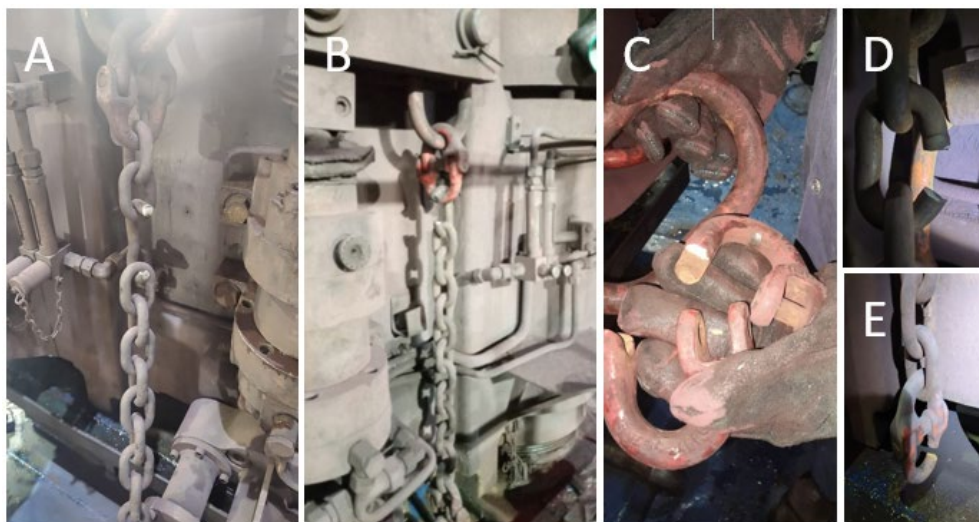
Figura 15 - Laminador acabador de perfil estrutural reversível do tipo X/H, objeto de estudo (linga corrente G8) se encontra na vista frontal, próxima ao centro da imagem, apresentado na imagem na cor: “preta” (elos) e cor “vermelha” (anelões).



Fonte: Autoria própria.

Ocorreram outras falhas em sequência, em turnos diferentes, e em pontos diferentes (Figura 16), 31 falhas entre 2019 a 2024, onde a falha continua persistente, mesmo que reduzida. A fabricante da liga corrente é a mesma desde o início das falhas e permanece, gerando um prejuízo financeiro considerável a siderúrgica (Tabela 1).

Figura 16 – Diferentes pontos de rompimentos da linga G8 – A, B, C, D, E.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 1 - Prejuízo financeiro anual causado pelas falhas da linga G8.

Ano	Tempo parada operacional [min]	Preço em minutos da linha	Total
2019	27	R\$ 1.500,00	R\$ 40.500,00
2020	55	R\$ 1.500,00	R\$ 82.500,00
2021	0	R\$ 1.500,00	R\$ 0,00
2022	136	R\$ 1.500,00	R\$ 204.000,00
2023	27	R\$ 1.500,00	R\$ 40.500,00
2024	78	R\$ 1.500,00	R\$ 117.000,00
Total			R\$ 484.500,00

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 17 pode ser observado um certo nível de oxidação/corrosão devido a exposição à umidade, fumos/vapores metálicos e intemperes, provenientes do processo de laminação dos perfis estruturais. Esta exposição potencializa a falha da linga corrente de forma a propagar as micro trincas e reduzir a tenacidade à fratura.

Oxidação: a exposição contínua ao oxigênio e à umidade favorecendo a formação de óxidos na superfície do aço. Em ambientes industriais, onde há presença de vapores metálicos e contaminantes, essa ocorrência pode ser acelerada, resultando na manipulação progressiva da superfície do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Corrosão úmida: a umidade no ambiente da laminação atua como eletrólito, facilitando a ocorrência de corrosão eletroquímica. Dependendo da composição do aço da linga de corrente, a presença de impurezas e inclusões pode gerar microcélulas eletroquímicas, intensificando a corrosão localizada (FONTANA, 1986).

Corrosão por atmosferas industriais: vapores metálicos e gases, como dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), podem reagir com a umidade para formar ácidos fracos, acelerando a corrosão química da linga de corrente (SHREIR, 2013).

Propagação de trincas e redução da tenacidade à fratura: a corrosão pode atuar como um fator de iniciação de trincas em regiões de alta concentração de tensão, como elas submetidas a cargas cíclicas. A manipulação da microestrutura do material, causada pela penetração de íons agressivos, pode reduzir a coesão entre os grãos e promover a nucleação de microtrincas (ASM INTERNATIONAL, 2002). A ação conjunta de corrosão e carregamento mecânico pode resultar na falha prematura de componentes por mecanismos como corrosão sob tensão (SCC - Stress Corrosion Cracking) e fragilização por hidrogênio, caso haja absorção de hidrogênio atômico na rede cristalina do aço (PEREIRA; PONTELLI, 2018).

Redução da vida útil da linga: a formação de produtos de corrosão na superfície do aço pode alterar suas propriedades mecânicas e geométricas, aumentando a rugosidade superficial e reduzindo a área útil dos elos, o que compromete a capacidade de carga da linga. Além disso, a perda da integridade estrutural leva a uma diminuição da tenacidade à fratura, aumentando o risco de falha catastrófica sob esforços mecânicos (DORMAN, 1998).

A combinação de corrosão com esforços mecânicos pode levar a falhas por corrosão sob tensão ou fragilização por hidrogênio, comprometendo a segurança e a confiabilidade do sistema de içamento de cargas. Desta forma, a seleção de materiais com maior resistência à corrosão, o uso de revestimentos protetores e a realização de inspeções periódicas são medidas essenciais para aumentar a vida útil das lingas de correntes e minimizar o risco de falhas.

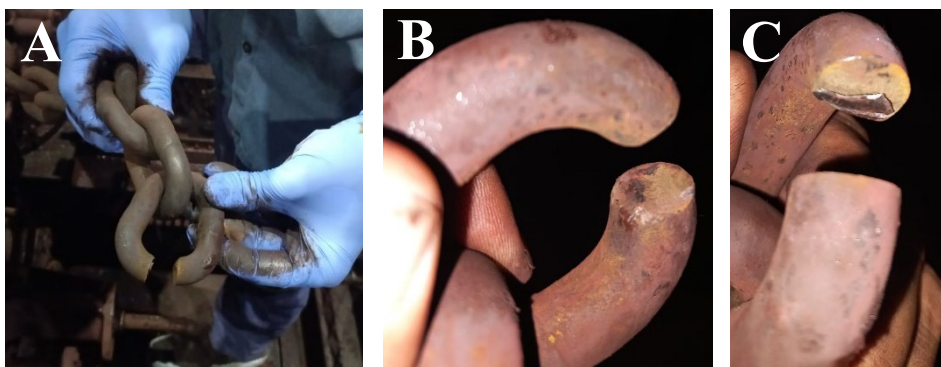
Figura 17 - Local da falha. Imagem reporta partes metálicas do laminador, assim como da linga corrente de aço G8, severamente agredida por oxidação.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 demonstra como evidência visual a falha e o rompimento de um dos elos da linga de corrente G8.

Figura 18 - Apontamento do elo falho da linga de corrente G8 - A, B, C.



Fonte: Autoria própria.

Para a realização deste estudo, foram utilizadas três amostras de lingas de corrente de aço do tipo elos (Quadro 2):

Quadro 2 - Amostras de lingas de correntes de aço do tipo elos.

<b>Linga de corrente G8 com falha</b>	<b>Linga de corrente G8 em perfeitas condições</b>	<b>Linga de corrente G10 em perfeitas condições</b>
Amostra obtida após falha em serviço. Este será o principal objeto de análise.	Amostra de controle para comparação, sem histórico de falhas.	Amostra considerada para a proposta de substituição.

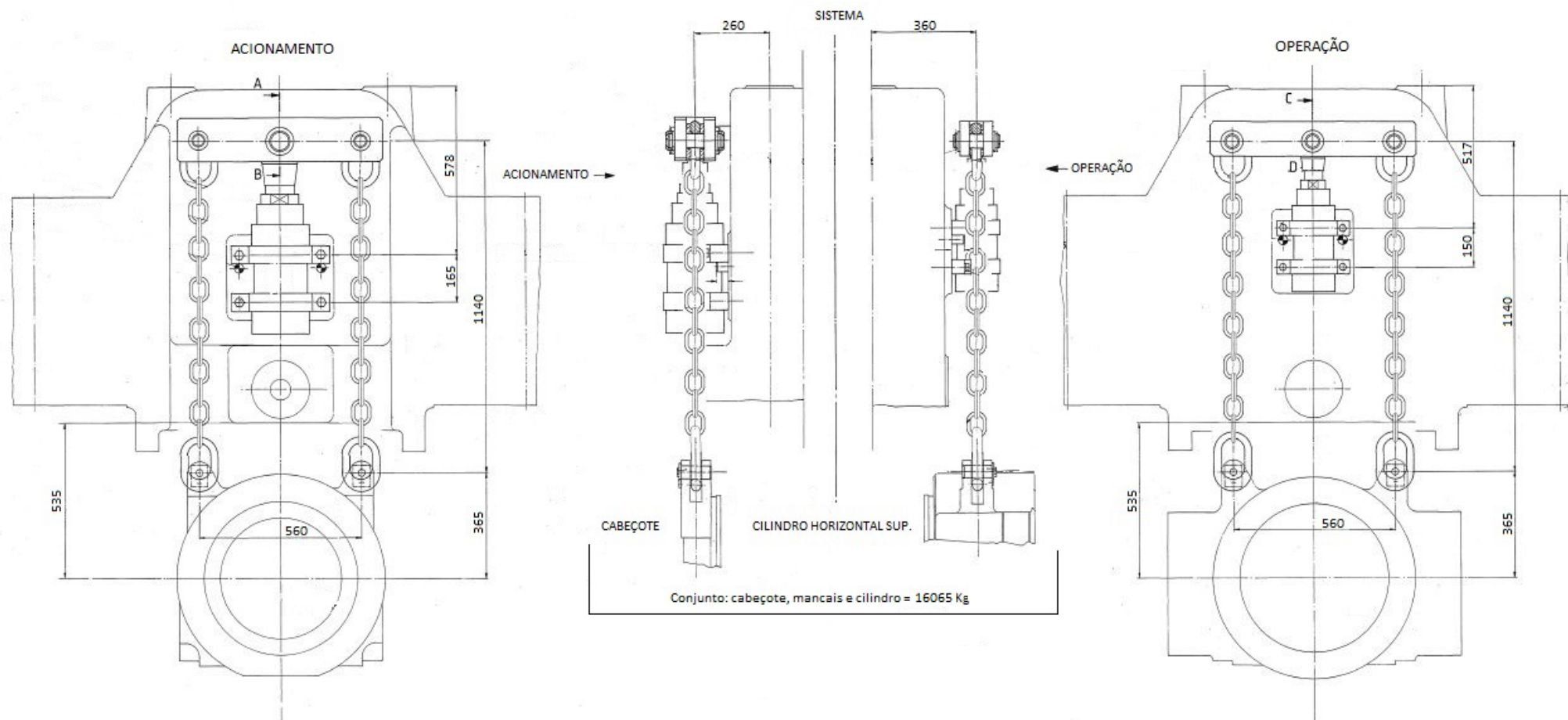
Fonte: Carlos Zanella (2017).

A seguir são apresentados os procedimentos experimentais na realização deste trabalho.

#### **4.2 - Análise das tensões**

A seguir foi apresentado as tensões atuantes na linga de corrente de elos. O desenho técnico serviu como base para extrair as informações dimensionais, onde foi estratificado do sistema (Figura 19) uma parte representativa: lado acionamento (Figura 19).

Figura 19 – Desenho técnico do sistema de fixação e atuação de trabalho das lingas de correntes de elos. Conectadas a uma parte do laminador "travessa/chapéus".

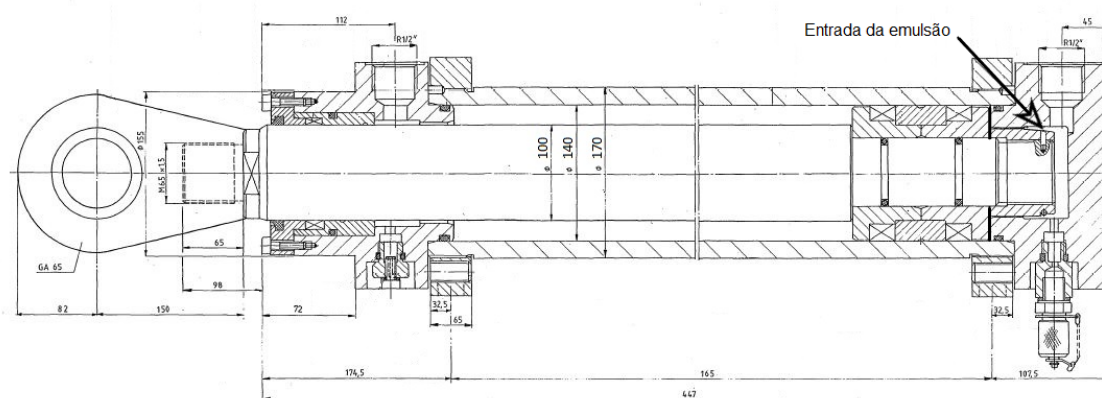


Fonte: Adaptado pelo autor, extraído de desenhos técnicos de uma siderúrgica.

Para fazer um diagrama de corpo livre, foi avaliado a pressão de trabalho do cilindro hidráulico (

Figura 20), do mesmo foi extraído à área de atuação da emulsão (fluido constituído por 95% água e 5% de óleo): diâmetro = 140 mm (sendo esta a medida da camisa interna do cilindro hidráulico).

Figura 20 - Cilindro hidráulico do lado acionamento em corte - A.



Fonte: Adaptado pelo autor, extraído de desenhos técnicos de uma siderúrgica.

Por meio de uma pesquisa de campo foi observado a variação da pressão de trabalho do cilindro hidráulico (Gráfico 1), obtendo as informações mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variação da pressão de trabalho.

<b>Pressão [Bar]</b>	<b>Observações</b>
96	Pressão mínima, permanecendo por 3 segundos, desarma o sistema.
98	Pressão mínima de trabalho durante laminação.
100	Pressão de trabalho, segundo desenho técnico.
114	Pressão máxima de trabalho durante laminação.
115	Pressão máxima, permanecendo por 3 segundos, desarma o sistema.
140	Pressão que já foi atingida em momentos de instabilidade do processo.

Fonte: Autoria própria.

A pressão de teste do cilindro hidráulico é de 320 bar, segundo desenho técnico. Conhecendo o diâmetro de trabalho do cilindro, igual a 140 mm, pode-se calcular a área da seção transversal, conforme a equação (1), onde:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (1)$$

A → Área do círculo [m<sup>2</sup>]

r → Raio do círculo [m]

A força para cada pressão foi calculada conforme o Gráfico 1, conforme Blaise Pascal 1663, equação (2):

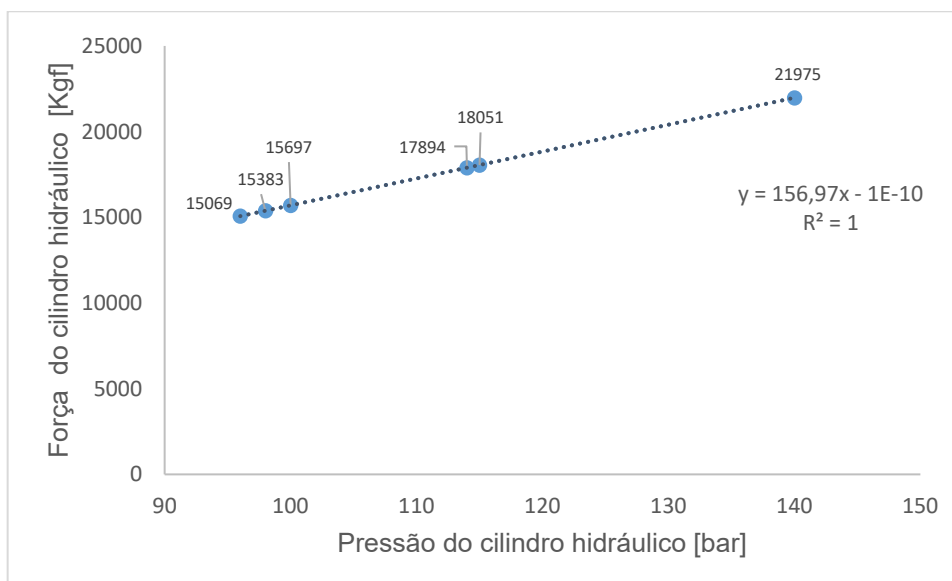
$$F = P \cdot A \quad (2)$$

F → Força [N]

P → Pressão [Pa]

A → Área [m<sup>2</sup>]

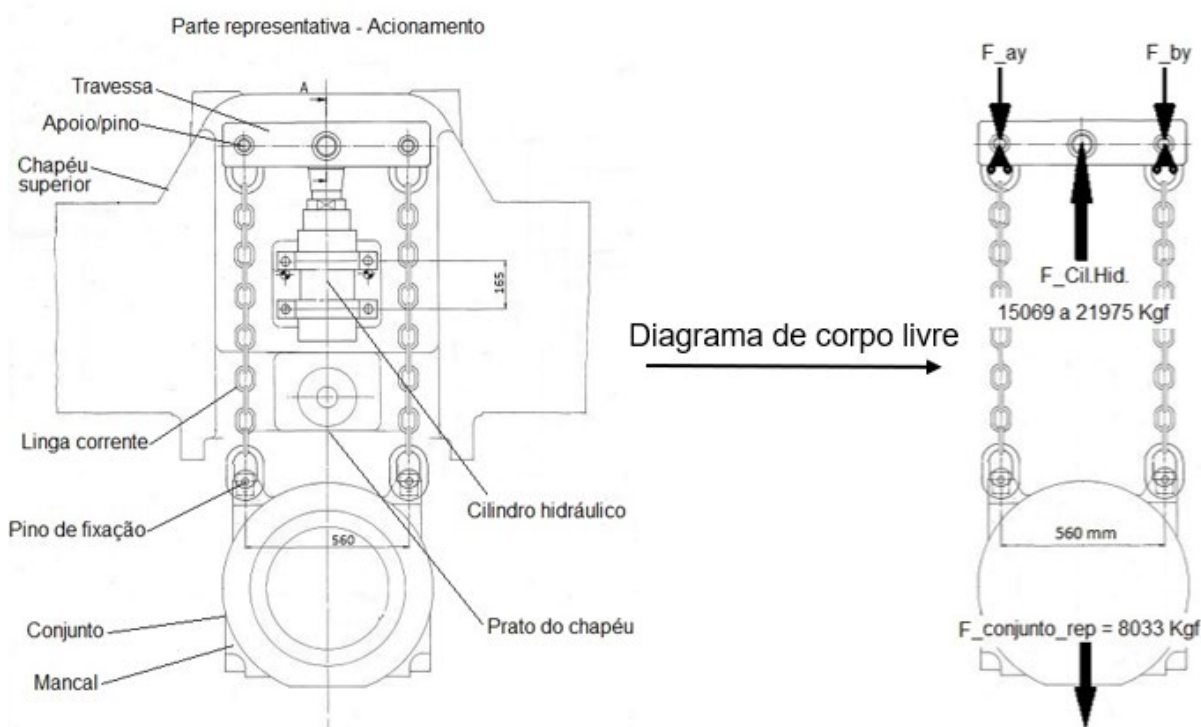
Gráfico 1 - Variação da força ascendente do cilindro hidráulico, conforme a variação da pressão de trabalho, durante laminação.



Fonte: Autoria própria.

Com as informações das forças ascendentes e descendentes do sistema, foi elaborado um diagrama de corpo livre (Figura 21). Neste contexto, foi calculado a reação de cada apoio das lingas que será igual a tensão exercida em cada linga de corrente, considerando que foi desprezado a força de atrito entre mancal e estrutura do laminador, a resistência ao ar, o peso dos pinos de fixação das lingas correntes nos mancais e a graxa que lubrifica os mancais/rolamentos. Sabe-se que os mancais trabalham enclausurados na parte interna do laminador, de forma a manter as lingas de correntes “sempre” em 90° em relação ao piso. As lingas trabalham constantemente tensionadas de forma a manter o conjunto (carga assimétrica) pressionado no prato do chapéu superior (Figura 21).

Figura 21 - Elementos do sistema representativo do sistema e Diagrama de corpo livre.



Fonte: Autoria própria.

Com base no diagrama de corpo livre foi calculado conforme a equação (3) o momento e as reações dos apoios de segundo gênero ( $F_{ay}$  e  $F_{by}$ ) para cada força calculada no (Gráfico 1), considerando o plano cartesiano X e Y e o sentido horário positivo. Segundo a primeira lei de Newton para equilíbrio estático  $\Sigma$  Momento = 0 e para calcular o momento, foi obedecido a equação (3):

$$\mathbf{M = F \cdot d} \quad (3)$$

$M \rightarrow$  Momento [N]

$F \rightarrow$  Força [N]

$d \rightarrow$  Distância [m]

Conforme a primeira lei de Newton para equilíbrio (estático ou em movimento retilíneo uniforme) o  $\Sigma$  Forças = 0; e para calcular a força, foi utilizada a equação (4).

$$F_p = m \cdot g \quad (4)$$

$F_p \rightarrow$  Força peso [N]

$m \rightarrow$  Massa [Kg]

$g \rightarrow$  Gravidade [ $m/s^2$ ]

Aplicando as equações (3 e (4) foi realizado os cálculos e obtido os seguintes resultados (Tabela 3):

Tabela 3 - Resultado do cálculo das reações dos apoios/pinos da travessa que é igual a tensão sofrida pelas lingas de correntes.

<b>Forças [Kgf]</b>	<b><math>\Sigma M_{ay} = F_{by}</math> [Kgf]</b>	<b><math>F_{ay}</math> [Kgf]</b>
15069	7534	7534
15383	7691	7691
15697	7848	7848
17894	8947	8947
18051	9026	9026
21975	10988	10988

Fonte: Autoria própria.

### 4.3 - Análise visual

Para a análise visual foi utilizado o laboratório do IFMG – Ouro Branco. As amostras foram cortadas utilizando a cortadora metalográfica Fortel - Modelo CFIII -

80mm ou 100mm de modo a facilitar a captura das imagens. Foi utilizado o paquímetro Lotus para parâmetros dimensionais das amostras. Foi utilizado o smartphone Samsung Galaxy S20 FE para tirar fotografias das superfícies fraturadas de três amostras do aço G8. Foi realizado a inspeção visual, afim de identificar trincas, marcas de praia, marcas de catraca, desgastes, deformações e/ou outras imperfeições de modo a caracterizar a fratura.

#### **4.4 - Microscopia óptica**

Para a análise de microscopia ótica foi utilizado o laboratório do IFMG – Ouro Branco. Foram utilizados os seguintes equipamentos na preparação das amostras: embutidora metalográfica Risitec RS-40, dessecador, kit de lixas para lixadeira metalográfica de granulometria: 80, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500, 2000; politriz/lixadeira metalográfica PL02 E, lixadeira e politriz modelo PLF para polimento, panos de polimento de granulometria: 9 microns ( $\mu\text{m}$ ), 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ ; pasta de diamante; solução de Nital 3% para ataque químico da amostra.

A superfície das amostras foi analisada em microscópio trinocular metalográfico Zeiss Axio Scope A1, com capacidade de ampliação de 50x, 100x, 200x e 500x. De forma a identificar a microestrutura dos aços G8 e G10.

#### **4.5 - Análise química – MEV/EDS**

A análise química via MEV/EDS foi realizado no laboratório de uma usina siderúrgica como apoio a estudantes e em paralelo com o laboratório do IFMG – Ouro Preto. As amostras foram preparadas metalograficamente e analisadas no MEV modelo FEI Quanta 400 e EDS Edax Genesis X4M. As imagens foram tradas pelo software XT microscope Server e os dados tratados pelo software INCA Suite version 4.13.

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para investigar a microestrutura dos aços G8 e G10. O acoplamento com espectroscopia

de energia dispersiva (EDS) foi utilizado para identificar a composição química de possíveis contaminantes.

#### **4.6 - Análise química via espectrômetro óptico**

A análise química via espectrômetro óptico foi realizada no laboratório de uma usina siderúrgica como apoio a estudantes. As amostras foram preparadas metalograficamente e analisadas no espectrômetro óptico modelo ARL 4460. A análise foi realizada para identificação dos elementos químicos contidos nos aços das lingas G8 e G10.

#### **4.7 - Ensaio de dureza Vickers**

O ensaio de dureza Vickers (HV) foi realizado no laboratório de uma usina siderúrgica como apoio a estudantes. Os ensaios de dureza foram realizados em diferentes pontos das amostras utilizando carga de 100gf e o durômetro Shimadzu HMV micro hardness tester, dureza Vickers e tratamento dos dados pelo software WAGE. O objetivo é mapear a distribuição de dureza nos aços das lingas G8 e G10 de forma a identificar possíveis zonas de fraqueza. Devido as dimensões não serem favoráveis para usinar os corpos de provas, afim de realizar o ensaio de tração. O limite de resistência [MPa] foi obtido através do valor médio da dureza dos aços G8 e G10 baseados na norma ASTM A370.

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 - Análise das tensões

A Tabela 4 mostra a comparação entre as cargas nominais (referência de catálogo dos respectivos fabricantes e normas) em relação às cargas calculadas. O fator de segurança é utilizado para falhas inesperadas e desgastes ao longo do uso (NBR 15516).

Tabela 4 - Comparações das lingas correntes - capacidade nominal x valor calculado.

Comparações				
Linga corrente	Capacidade nominal [Kgf]	Valor calculado [Kgf]	Fator de segurança	Observações
G8	8000	9026	4:1	A linga atual de G8 está trabalhando 1026 Kgf, que é além da sua capacidade nominal.
G10	10000	9026	4:1	Considerando que não ocorrerá mais nenhuma sobrecarga no sistema hidráulico. A linga de G10 atende para sustentação da carga.
G12	12000	10988	4:1	Levando em consideração a sobrecarga do sistema hidráulico. A linga de G12 seria a aplicação ideal.

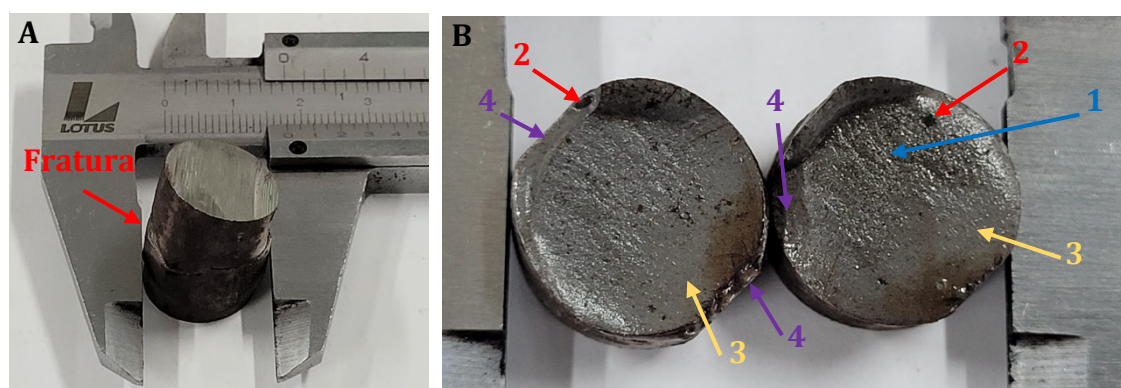
Fonte: Autoria própria.

O valor excedente da carga nominal da linga G8 em 1026 Kgf é uma das causas que está provocando a falha das lingas correntes G8 durante o processo de laminação.

## 5.2 - Análise visual

A Figura 22 mostra a primeira amostra fraturada coletada do aço G8. Onde de forma macroscópica foi observado em ambas as superfícies de fratura, parte B, elas apresentam uma aparência rugosa (1) e com áreas que sugerem uma combinação de modos de fratura. Essas irregularidades podem estar relacionadas a uma falha de origem dúctil (deformação plástica significativa antes da ruptura) ou, em alguns pontos, fratura frágil (ruptura súbita e sem deformação plástica). É possível identificar áreas que podem conter microcavidades (2), apontando um possível processo de nucleação e coalescência de poros, típico de fratura dúctil. Outras regiões apresentam superfícies mais lisas (3) e rugosas (1), características de clivagem, fratura frágil. As superfícies parecem ter orientações diferentes nas regiões da fratura, o que pode indicar múltiplos pontos de nucleação de falha (4) ou um carregamento cíclico. O modo de fratura mista (dúctil-frágil), ou seja, a combinação de áreas com microcavidades (dúctil) e clivagem (frágil) pode indicar que a linga foi submetida a uma combinação de tensões estáticas e dinâmicas, específicas por concentrações de tensão de forma a romper por sobrecarga mecânica.

Figura 22 - Primeira amostra fraturada do aço G8 – A e B.

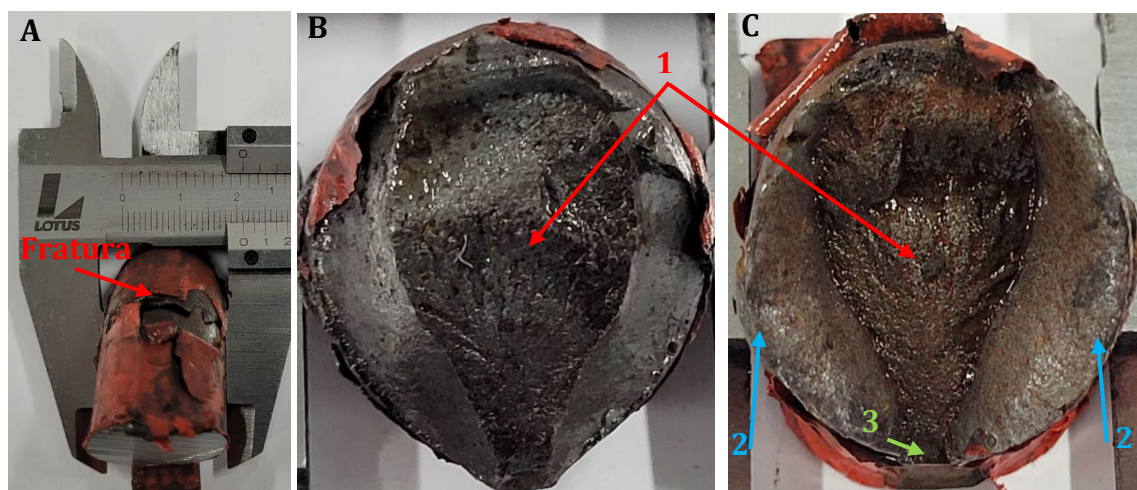


Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 mostra a segunda amostra fraturada coletada do aço G8. Onde de forma macroscópica foi observado em ambas as superfícies de fratura, parte B e C, elas apresentam uma aparência fibrosa e irregular ao meio (1), cisalhada nas

bordas (2), formando um ângulo de 45° em relação a direção de tração e formando uma pequena cavidade (parte C), essas características são de fratura dúctil. As superfícies parecem ter uma orientação indicando um ponto de nucleação de falha (3).

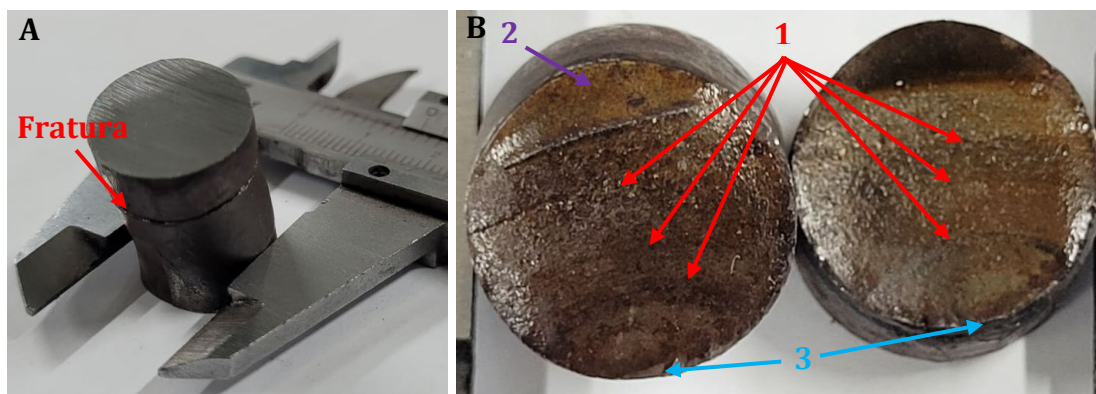
Figura 23 - Segunda amostra fraturada do aço G8 – A, B e C.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 mostra a terceira amostra fraturada coletada do aço G8. Onde de forma macroscópica foi observado em ambas as superfícies de fratura, parte B, elas apresentam uma aparência com marcas de praia (1), característica de fratura por fadiga, ou seja, o aço sofreu esforços cíclicos de tensões. É uma pequena parte com características de fratura frágil, superfície lisa (2), tendo como origem o ponto (3).

Figura 24 - Terceira amostra fraturada do aço G8 – A e B.



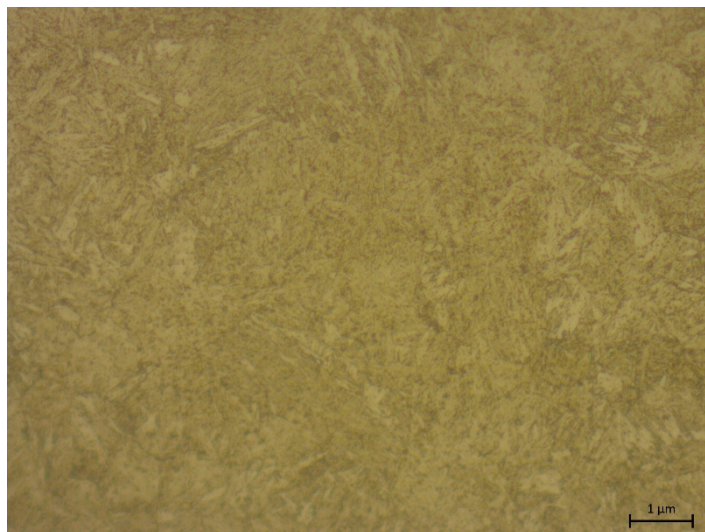
Fonte: Autoria própria.

Como ocorreram fraturas em pontos diferentes da linga corrente G8 e com características diferentes, pode se afirmar que ocorreram fraturas dúctil, frágil e por fadiga, sendo o processo como um todo caracterizado como fadiga.

### 5.3 - Microscopia óptica

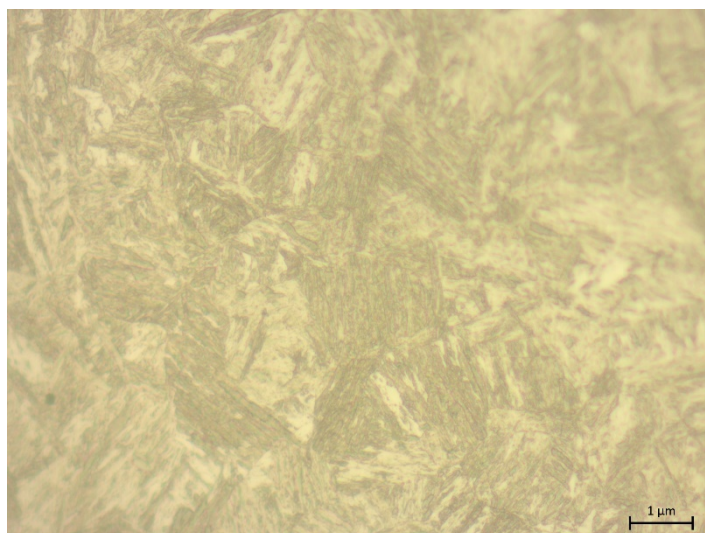
As Figura 25 e Figura 26 apresentam a microestrutura dos os aços G8 e G10 respectivamente, atacadas quimicamente com Nital 3%. Ambos os aços apresentam microestrutura martensítica revenida onde foi observado uma matriz em zigue-zague de agulhas ou formas aciculares. As formas semelhantes a agulhas são, na verdade, seções transversais de placas de martensita. As placas escurecem após a têmpera e são cercadas por austenita retida de aparência clara. Sendo ambos os aços G8 e G10 compostos por martensita revenida, isso indica que passaram por tratamento térmico, logo estão conforme norma de fabricação.

Figura 25 - Microscopia óptica do aço G8 com ampliação de 500x, ataque químico nital 3%.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - Microscopia óptica do aço G10 com ampliação de 500x, ataque químico nital 3%.

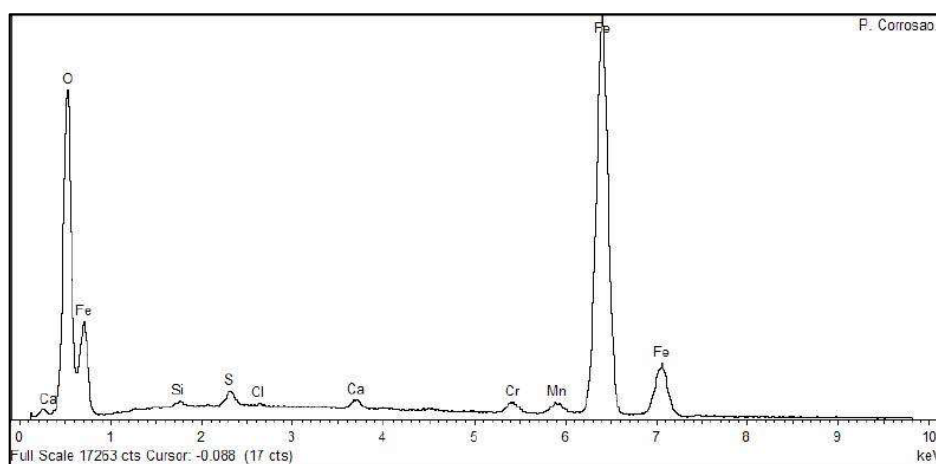


Fonte: Autoria própria.

#### 5.4 - Análise química – MEV/EDS

O espectro da Figura 27 mostra de forma qualitativa produto de corrosão presente no interior das trincas e nos pites da fratura do aço da linga G8. A Tabela 5 mostra os dados de forma qualitativa.

Figura 27 – Espectro representativo do produto de corrosão presente no interior das trincas e nos pites – aço G8.



Fonte: Autoria própria.

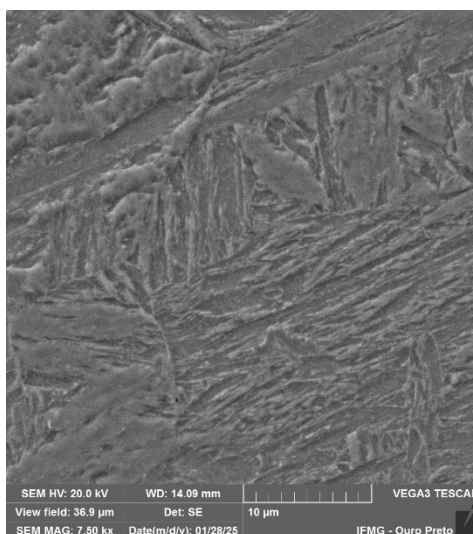
Tabela 5 - Valores quantitativos do produto de corrosão presente no interior das trincas e nos pites - aço G8.

Spectrum	O	Si	S	Cl	Ca	Cr	Mn	Fe	Total
<b>Produto de corrosão</b>	29,96	0,29	0,74	0,13	0,54	1,02	1,3	66,02	100%

Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 apresenta a MEV do aço G8 em perfeitas condições, revelando sua microestrutura martensítica revenida, onde foi observado uma matriz em zig-zague de agulhas ou formas aciculares. Indicativo que o aço passou por tratamento térmico, conforme solicita a norma.

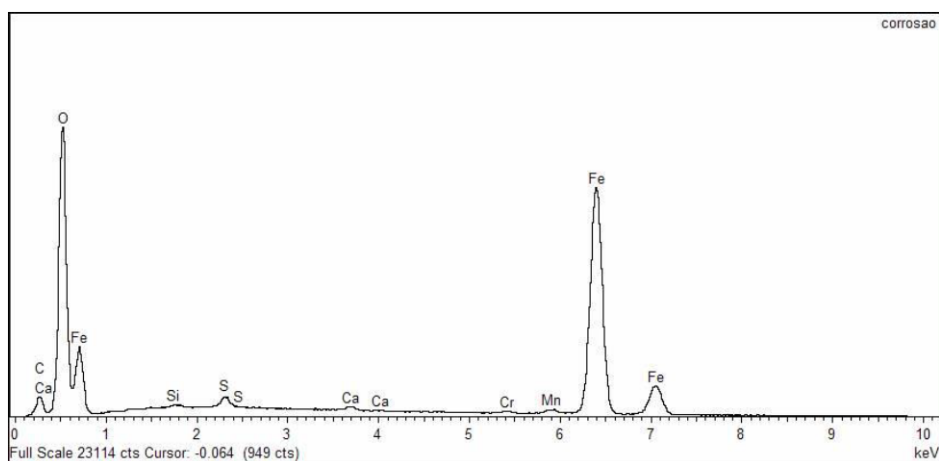
Figura 28 - MEV aço G8, ataque nital 3%, ampliação de 7500x.



Fonte: Autoria própria.

O espectro da Figura 29 mostra de forma qualitativa produto caracterizando o produto de corrosão da linga G10 e a Tabela 6 mostra os dados de forma qualitativa.

Figura 29 - Espectro caracterizando o produto de corrosão - aço G10.



Fonte: Autoria própria.

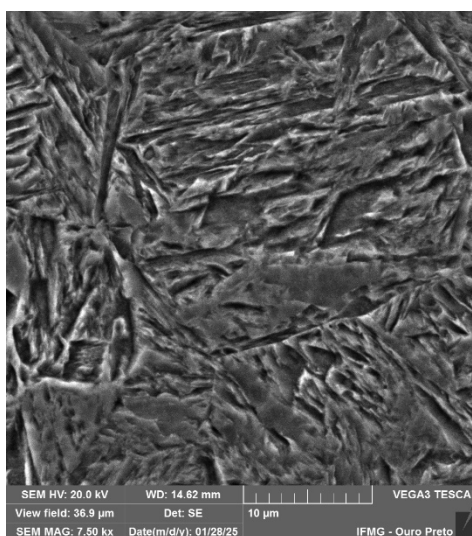
Tabela 6 - Dados quantitativos de produto de corrosão - aço G10.

Spectrum	O	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Total
Produto de corrosão	39,23	0,19	0,79	0,35	0,3	0,73	58,41	100%

Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 apresenta a MEV do aço G10 em perfeitas condições, revelando sua microestrutura martensita revenida, onde foi observado uma matriz em zigue-zague de agulhas ou formas aciculares. Indicativo que o aço passou por tratamento térmico, conforme solicita a norma.

Figura 30 - MEV aço G10, ataque nital 3%, ampliação de 7500x.



Fonte: Autoria própria.

Dentre os elementos identificados, alguns contribuem para a corrosão do aço, seja individualmente ou em combinação:

**Oxigênio (O):** O oxigênio é fundamental no processo de corrosão, pois reage com o ferro para formar óxidos, como a ferrugem (óxido de ferro), resultando na oxidação do material.

**Enxofre (S):** A presença de enxofre pode levar à formação de sulfetos, que comprometem a integridade do aço e aceleram a corrosão.

**Cloro (Cl):** Íons de cloro são altamente corrosivos para o aço, especialmente em ambientes úmidos, onde podem penetrar na camada passiva de óxido de cromo em aços inoxidáveis, causando corrosão localizada, como pite e corrosão sob tensão.

**Cálcio (Ca):** Embora o cálcio não seja diretamente corrosivo, sua presença pode indicar a formação de depósitos que retêm umidade e substância corrosiva na superfície do aço, facilitando a corrosão.

**Ferro (Fe):** O ferro é o principal componente do aço e, na presença de oxidação e umidade, é suscetível à corrosão, resultando na formação de óxidos de ferro.

A interação entre esses elementos e o ambiente determinará a taxa e o tipo de corrosão que ocorrerá no aço. No caso do aço G8 e evidenciado o processo de corrosão vista que a análise foi realizada nas trincas, essa corrosão potencializa a propagação das micro trincas, como as lingas estão sob constantes ciclos de tensão ocasiona a falha por corrosão sob tensão. Já no caso do produto de corrosão no aço G10 pode ser por contaminação da amostra pelo meio ao qual ela foi exposta durante os processos metalográficos.

## 5.5 - Análise química via espectrômetro óptico

A Tabela 7 apresenta o resultado da composição química dos aços G8 e proporções especificadas pela norma de fabricação. Foi observado que o aço G8 em perfeitas condições contém teores bem próximos do G8 que falhou em operação, ambos estão dentro das tolerâncias de fabricação exigido pela norma.

Tabela 7 - Comparação química dos aços G8 e exigências químicas da norma ABNT ISO 3076.

Amostras	Resultados [%]												
	C	Mn	Si	P	S	P + S	Cr	Ni	Mo	Ti	Ca	B	Alt
<b>Elo da corrente G8 que falhou</b>	0,22	1,13	0,21	0,008	0,005	0,013	0,47	0,49	0,01	0,03	0,003	0,005	0,05
<b>Elo da corrente G8 em perfeitas condições</b>	0,26	1,38	0,31	0,010	0,003	0,013	0,48	0,49	0,04	0,03	0,002	0,0020	0,03
<b>ABNT ISO 3076</b>	Mínimo	-	-	-	-	-	0,40	0,40	0,15	-	-	-	-
	Máximo	-	-	-	0,025	0,025	0,045	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8 apresenta o resultado da composição química do aço G10 em comparação com as proporções especificadas pela norma de fabricação. Foi observado que o aço G10 apresentou proporções de Cr – Ni – Mo abaixo do exigido pela norma como mínimo, isso pode ocasionar falhas prematura do aço a depender da aplicação.

Tabela 8 - Resultado composição química aço G10 e Norma DIN PAS 1060.

Amostra		Resultados [%]								
		C	Mn	Si	P	S	P + S	Cr	Ni	Mo
<b>Elo da corrente G10 em perfeitas condições</b>		0,2	1,26	0,2	0,01	0,003	0,013	0,4	0,4	0,2
<b>DIN PAS 1060</b>	Mínimo	-	-	-	-	-	-	0,50	0,70	0,30
	Máximo	-	-	-	0,020	0,020	0,035	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9 apresenta o resultado da composição química do aço G8 em comparação ao G10. Foi observado que as proporções dos elementos químicos são bem próximas, exceto o Mo no aço G10 ele tem maior concentração. No aço G10 não foi identificado a presença de Ti, Ca, B e Alt (outros).

Tabela 9 - Comparação química entre os aços G8 e G10.

Amostras	Resultados [%]												
	C	Mn	Si	P	S	P + S	Cr	Ni	Mo	Ti	Ca	B	Alt
<b>Elo da corrente G8</b>	0,22	1,13	0,21	0,008	0,005	0,013	0,47	0,49	0,01	0,03	0,003	0,005	0,05
<b>Elo da corrente G10</b>	0,22	1,26	0,21	0,010	0,003	0,013	0,41	0,44	0,22	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Pela análise dos dados das composições químicas o aço G8 foi fabricado conforme a sua respectiva norma de fabricação. Já o aço G10 está com % de Cr – Ni – Mo abaixo do esperado como mínimo pela sua norma de fabricação de forma a reprova-lo para uso como aço G10.

## 5.6 - Ensaio de dureza Vickers

A Tabela 10 apresenta o resultado do ensaio de dureza dos aços G8 que falhou, G8 em perfeitas condições e G10 em perfeitas condições. Com os valores médios da dureza foi obtido por tabela o valor aproximado do limite de resistência a tração dos respectivos aços, baseado na norma ASTM A370. Observando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e comparando os resultados e nítido que os valores de resistência a tração baseado no valor médio da dureza para os aços G8 estão 64% a mais do que a norma EN 812-2 determina e o aço G10 está 66% a mais do que a norma DIN PAS 1061 determina, sendo assim os aços estão conforme norma no quesito dureza e resistência. Comparando o aço G8 em relação ao G10 ele tem maior dureza e maior resistência a tração.

Tabela 10 - Resultado de dureza HV e Limite de resistência a tração conforme norma e manual do fabricante.

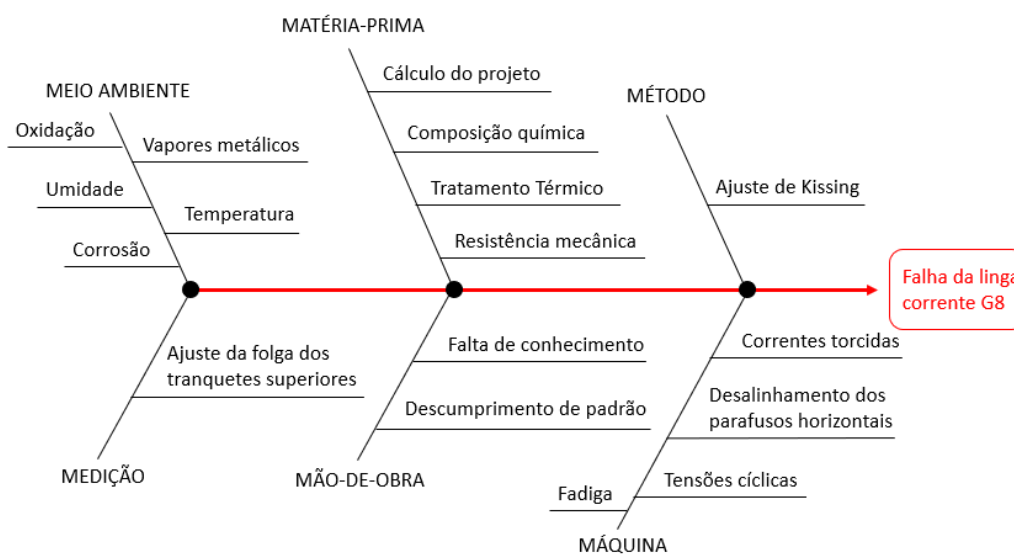
Amostra	Resultado [ HV ]			Média [ HV ]	ASTM A370 - Limite aproximado de resistência a tração [ N/mm <sup>2</sup> ]	Norma EN 812-2 - G8 [ N/mm <sup>2</sup> ]	Norma DIN PAS 1061 - G10 [ N/mm <sup>2</sup> ]
Elo da corrente G8 que fluiu	404	391	392	396	1270	800	-
Elo da corrente G8 em perfeitas condições	410	395	393	399	1280	800	-
Elo da corrente G10 em perfeitas condições	450	452	454	452	1500	-	1000

Fonte: Autoria própria.

## 5.7 - Diagrama de Ishikawa

Foi montado o diagrama de Ishikawa (Figura 31) modelo 6M de forma a visualizar todas as possíveis causas da falha do aço G8.

Figura 31 - Diagrama da falha da linga corrente G8.



Fonte: Autoria própria.

A aplicação do diagrama organiza as ideias, suposições e resultados de forma a direcionar a causa primária: falha no projeto; e secundárias: ajustes mecânicos, oxidação, corrosão, correntes torcidas e falta de conhecimento dos colaboradores no ajuste dos laminadores.

## 6 - TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, serão realizados testes de fadiga em ambiente corrosivo de forma controlada, análise da influência do boro na temperatura do aço G8, teste de tração subsize e simulação computacional aplicando o método dos elementos finitos.

## 7 - CONCLUSÃO

Conclui-se que a falha da linga G8 ocorreu por uma combinação de falhas, como:

- a) Cálculo do projeto - Sobrecarga de 1026 Kgf, apontado pelos cálculos analíticos;
- b) Folga deficiente entre os tranquentes/orelha dos mancais superiores, observado em pesquisa operacional;
- c) Falta de conhecimento dos operadores para ajustar o Kissing dos laminadores universais, observado em pesquisa operacional. Kissing e o beijo entre os cilindros que demarca o ponto zero para o sistema realizar os ajustes de gap a cada passe de laminação das barras;
- d) Corrosão, apontando no resultado de EDS;
- e) Correntes torcidas, observado em pesquisa operacional;

A combinação das falhas, causam microtrincas na superfície dos elos, sendo agravadas pelo ataque corrosivo do meio (umidade, temperatura e vapores metálicos), esforços cíclicos de tensões e sobrecarga, levando a falha por fadiga corrosiva. Por isso e de sua importância avaliar todos os cenários possíveis para a utilização de um aço em um projeto.

Com base no resultado das análises fica claro que a linga G8 foi fabricada conforme sua respectiva norma.

Pelos resultados das análises de tensões fica validado a substituição da linga G8 pela linga G10, sendo o ideal o uso da linga G12 visando eventuais sobrecargas dos sistemas hidráulicos da linha de laminação.

## 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15516-01: **Corrente de elos curtos para elevação de cargas —Lingas de correntes Parte 1: Grau 8 – Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. NBR 15516-02: **Corrente de elos curtos para elevação de cargas – Lingas de correntes Parte 2: Uso, manutenção e inspeção**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. NBR ISO 3076: **Correntes de elos curtos de aço de seção circular para elevação de cargas – correntes de tolerância média para lingas de correntes – Grau 8**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). *D1.1/D1.1M. Structural Welding Code – Steel*. Miami, FL: AWS, 2020. Artigo – GERDAU MAIS. **Tecnologia**. Disponível em: <<https://mais.gerdau.com.br/cotacao/construcao/perfil-estrutural/#tecnologia-e-especificacoes>>. Acesso em: 08 de julho de 2024.

Artigo - UFRGS, Carlos; **Estudo de falha em correntes de compensação para elevadores**. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/172282/001058907.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01 de ag. De 2022.

Artigo – WORD STEEL ASSOCIATION. **Aço mundial em números 2023**. Disponível em: <<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>>. Acesso em: 08 de julho de 2024.

ASHBY, Michael F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 4ª ed. Butterworth-Heinemann, 2010.

ASTM. INTERNATIONAL. *ASTM A391/A391M: Standard Specification for Grade 80 Alloy Steel Chain*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2011.

ASM INTERNATIONAL. **Manual de Metais: Volume 13 - Corrosão**. 9ª ed. Parque de Materiais: ASM International, 2002.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 9ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7ª ed., ABM, 1996.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica – processos de fabricação e tratamento**. V.II 2ª ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1977.

DIAS, F. Teixeira; CRUZ, J. Pinho da; et al. **Método dos elementos finitos – técnicas de simulação numérica em engenharia**. ETEP (edições técnicas e profissionais), Lisboa, 2010.

DIN. PAS 1061: **Correntes em aço redondo para correntes para içamento – Grau de Qualidade 10**. Norma Industrial Alemã, Berlin, 2007.

DORMAN, D. **Corrosão e seu controle: uma introdução ao assunto**. 2ª ed. Londres: National Physical Laboratory, 1998.

ENORI, Gemelli. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. LTC (livros técnicos e científicos), Rio de Janeiro, 2001.

ENCÓPEL Rolamentos. **Correntes industriais**. Disponível em: <  
<https://www.encopelrolamentos.com.br/produtos-industriais/correntes-industriais/#:~:text=As%20correntes%20industriais%20s%C3%A3o%20pe%C3%A7as,e%20na%20sincroniza%C3%A7%C3%A3o%20de%20m%C3%A1quinas>>.  
Acesso em: 2 set. 2024.

FERREIRA, D. C. D.; SOUZA, S. M. L. **Processo de enfermagem como ferramenta de gestão de cuidados**. Ed. Especial, 2012.

FONTANA, M. G. **Engenharia de Corrosão** . 3ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1986.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 6ª ed. Wiley, 2015.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2ª ed. Artliber, 2010.

JONES, Franklin D. **Ingenious Mechanisms for Designers and Inventors**. Industrial Press Inc., 2001.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. **Juran's Quality Handbook**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID. Steven R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 7ª ed. Pearson, 2014.

MACEDO, L. C. **Proposta de adaptação do diagrama de causas e efeitos como ferramenta de ensino em saúde ambiental para o curso de Enfermagem**. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente, v. 1 n. 1, p. 94-101, 2010.

Norma, EN 812-2: **Short link chain for lifting purposes – safety – part 2: Medium tolerance chain for chain slings – G8**. Norma Europeia, dezembro de 1996.

NORTON, Robert L. **Machine Design: An Integrated Approach**. 5ª ed. Pearson, 2013.

PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de engenharia – microestrutura e propriedades**. Hemus, 1997.

PEDRO M.G.P. Moreira; Lucas Silva; Paulo Castro. **Structural connections for lightweight metallic structures**. V.8, Spring, 2012.

PELLICCIONE, André da Silva; MORAES, Milton Franco; et al. **Análise de falhas em equipamentos de processos – mecanismos de danos e casos práticos**. Interciência, Rio de Janeiro, 2014.

PEREIRA, C. M.; PONTELLI, M. **Corrosão e Degradação dos Materiais**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2018.

PASCAL, Blaise. **Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air**. Paris, 1663.

RAGAB, A.; ALAWI, H.; SOREIN, K. **Effect of atmospheric and marine corrosive environments on tensile, impact and hardness properties of some steels**. Mechanics of materials, v. 18, n. 1, 1994.

RUD, Correntes Industriais LTDA; **Sistemas de içamento**. ed. 30. Disponível em: <<https://www.rud.com.br/pdf/catalogo-sistemas-icamento-grau8.pdf>>. Acesso em: 01 de ag. De 2022.

SEBRAE. **Manual de ferramentas da qualidade**, 2005. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2621303/mod\\_folder/content/0/SEBRAE%20%202005.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2621303/mod_folder/content/0/SEBRAE%20%202005.pdf?forcedownload=1)>. Acesso em 15 julho, 2024.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R. **Mechanical Engineering Design**. 7ª ed. McGraw-Hill, 2001.

SHREIR, L. L. **Corrosão: Reações Metal/Ambientais**. 3ª ed. Londres: Butterworth-Heinemann, 2013.

SILVA, R. G. **Controle estatístico de não conformidades na instalação de elevadores de passageiros**. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção com enfoque em Pesquisa Operacional) – Curso de Pós-graduação

Engenharia de Produção com enfoque em Pesquisa Operacional. Londrina: Universidade Estadual de Londrina – PR, 100 p., 2008.

SMITH, B. et al. **Análise de falha em lingas de corrente: estudo de caso**. Relatório Técnico, Instituto de Tecnologia Industrial, 2020.

SOUZA, José Orlando de Lima; SOUZA, Leoto Barbosa. **50 ferramentas de gestão**. 2ª ed. Ferramentas de gestão, 2019.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços**. 1ª ed. 4º reimpressão – 2012, Blucher, 1989.

WALTER, Pfiel; MICHÉLE Pfiel. **Estruturas de aço**. 8ª ed. LTC, 2010.