

**Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG**  
**Curso de Engenharia Mecânica**

**LUCAS DE SOUZA LEÃO**  
**GILSON RIBEIRO SPINDOLA**

**ANÁLISE DE FALHA ESTRUTURAL NA BASE DE UM CILINDRO DE  
ESCORREGO DE UM ELETRODO DE FORNO DE ARCO ELÉTRICO**

**Publicação Nº 06**

**Goianésia - GO**  
**2023**

LUCAS DE SOUZA LEÃO  
GILSON RIBEIRO SPINDOLA

ANÁLISE DE FALHA ESTRUTURAL NA BASE DE UM CILINDRO DE  
ESCORREGO DE UM ELETRODO DE FORNO DE ARCO ELÉTRICO

Publicação N° 06

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, EM FORMA DE ARTIGO,  
SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACEG

Aprovados por:

\_\_\_\_\_  
Alessandro Moraes Martins, Mestre (FACEG)  
(ORIENTADOR)

\_\_\_\_\_  
Ariane Martins Caponi Lima, Mestre (FACEG)  
(EXAMINADOR INTERNO)

\_\_\_\_\_  
Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes, Doutora (FACEG)  
(EXAMINADOR INTERNO)

## FICHA CATALOGRÁFICA

LEÃO, LUCAS DE SOUZA. SPINDOLA, GILSON RIBEIRO.

Análise de falha estrutural na base de um cilindro de escorrego de um eletrodo de forno de arco elétrico [Goiás] 2023 xi, 16P, 297 mm (ENC/FACEG, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2023).

ARTIGO – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Mecânica.

1. Elementos Finitos	2. Ferro níquel
3. Fractografia	
L ENC/FACEG	II. Título (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEÃO, L. S. SPINDOLA, G. R. Análise de falha estrutural na base de um cilindro de escorrego de um eletrodo de forno de arco elétrico. Artigo, Publicação 06 2023/1 Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 16p. 2023.

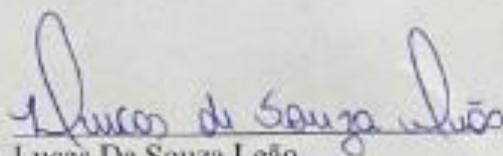
## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Lucas De Souza Leão e Gilson Ribeiro Spindola.

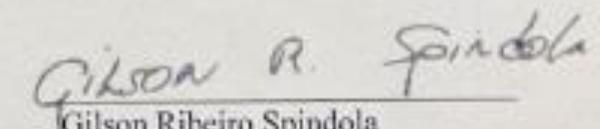
TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Análise de falha estrutural na base de um cilindro de escorrego de um eletrodo de forno de arco elétrico.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica ANO: 2023

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Lucas De Souza Leão  
Rua Arthur Alves da Fonseca, Dona Fiica  
78387-065 - Goianésia/GO - Brasil



Gilson Ribeiro Spindola  
Rua 06, setor sul  
76382-190 - Goianésia/GO - Brasil

# ANÁLISE DE FALHA ESTRUTURAL NA BASE DE UM CILINDRO DE ESCORREGO DE UM ELETRODO DE FORNO DE ARCO ELÉTRICO

Lucas de Souza Leão<sup>1</sup>  
Gilson Ribeiro Spindola<sup>2</sup>  
Alessandro Morais Martins<sup>3</sup>

## RESUMO

O aço é um material amplamente utilizado mundialmente, o que torna seu processo produtivo muito relevante para a economia. No processo de fabricação de ferro níquel utiliza-se um forno de arco elétrico para fundir os insumos e processar o metal. Durante este processamento, é necessário a regulação dos eletrodos que compõe o forno, uma vez que as propriedades físicas do material sendo fundido se alteram. O componente que regula estes eletrodos é o cilindro de escorrego, objeto de estudo deste trabalho. O objetivo foi analisar e identificar o mecanismo e modo de falha na quebra da base de um cilindro de escorrego ao realizar-se análises de fractografia e análise de tensão e deformação através do método dos elementos finitos. A partir das análises, foi possível identificar que o modo de falha foi fratura por fadiga (flexão simples), provocado pela aplicação de tensão descontínua na peça. Também foi possível identificar a causa de falha secundária contributiva como sendo a solda com filete irregular, responsável por aumentar a fragilidade na chapa, onde iniciou-se a fissura. Ademais, a partir das informações obtidas pelas análises realizadas, também foi possível sugerir um novo design para a base do cilindro de escorrego, visando-se evitar que este tipo de falha aconteça novamente no futuro.

**Palavras-chave:** Elementos Finitos. Ferro níquel. Fractografia.

---

<sup>1</sup> Discente do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: lucasleao91@live.com

<sup>2</sup> Discente do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: gilsonspindola@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Mestre, professor do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: [alessandro.martins@docente.evangelicagoianesia.edu.br](mailto:alessandro.martins@docente.evangelicagoianesia.edu.br)

## 1 INTRODUÇÃO

Existem várias razões para a popularidade do aço, incluindo seus baixos custos de fabricação, conformação e usinagem em comparação com outras ligas; uma abundância de matérias-primas (minério de ferro e sucata) e uma diferença ainda sem precedentes pode ser alcançada entre as propriedades mecânicas do aço com composição química diferente ou do mesmo aço com tratamento termomecânico diferente (HAGHDADI *et al.*, 2021)

Os aços possuem muitas propriedades conhecidas, mas é muito importante enfatizar suas propriedades mecânicas, tais como: resistência à tração, que é a medida da força necessária para tracionar um corpo de prova; elasticidade, que é o limite em que um material pode mudar de forma quando o estresse é aplicado a ele e retornar ao seu estado normal quando esse estresse é removido; tenacidade, que é a capacidade de um material absorver energia e deformar, sem fraturar; durabilidade, que é a vida útil do material, mesmo quando sob condições adversas (BAJAJ *et al.*, 2020).

A falha de qualquer material ocorre de várias maneiras e por vários motivos, e identificar as causas dessas falhas é muito importante para evitar qualquer reincidência. Uma das técnicas criadas para evitar esses tipos de cenários foi a análise de falhas. No entanto, para que esta metodologia funcione corretamente, é necessário manter uma abordagem abrangente ao analisar e examinar as evidências para obter uma compreensão clara e imparcial da falha (ALIYA, 2022).

Um material pode falhar por diversos motivos, mas alguns casos importantes a serem destacados são: falha dúctil, que ocorre em um material dúctil que apresenta alto potencial de se deformar plasticamente quando submetido a uma determinada carga; fratura frágil, na qual não ocorre deformação plástica e o material rompe em tensões abaixo do limite de escoamento com alta taxa de propagação de trinca; fadiga, resultante de carregamento repetitivo ou cíclico (SHIPLEY; MILLER; PARRINGTON, 2022).

Todas as falhas têm uma causa, e vários meios são utilizados para entendê-las, como o desenvolvimento do projeto, as propriedades do material utilizado, o esforço ao qual o material foi submetido, participação humana e muitos outros. Diante de uma quantidade tão grande de informações, outra importante técnica para análise de falhas é a chamada análise de fratura, também conhecida como fractografia, que possibilita analisar a fratura a olho nu ou mesmo com lupas e lentes (ALIYA, 2022).

Outra abordagem amplamente adotada para estudar o comportamento estrutural é o método dos elementos finitos (MEF). Esse método numérico é utilizado na engenharia para modelar e analisar estruturas complexas, permitindo a determinação precisa das tensões e deformações em diferentes pontos de interesse. Ao dividir a estrutura em pequenos elementos finitos e considerar suas interações, o MEF oferece uma representação precisa do comportamento estrutural, levando em consideração as propriedades mecânicas do material, as condições de contorno e as cargas aplicadas. A aplicação do MEF na análise de tensão e deformação na base do cilindro de escorregamento de um eletrodo de forno de arco elétrico oferece informações valiosas para a compreensão dos fatores que podem levar a falhas estruturais nessa região crítica (WU *et al.*, 2020).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O aço é um material muito importante e pode ser encontrado nos produtos mais comuns aos mais complexos. O tempo de inatividade custa a cada fábrica pelo menos 5% de sua capacidade produtiva e muitas perdem até 20%. Mas cerca de 80% das instalações industriais

não conseguem estimar com precisão seu custo total de tempo de inatividade. Muitas dessas instalações estimam seu tempo de inatividade em 200 a 300% (CRUMRINE; POST, 2022).

Assim, este trabalho trata da análise de falha de uma peça utilizada para movimentação de um eletrodo de um forno a arco elétrico, com o objetivo de avaliar as possíveis causas desta falha, apresentar melhorias, e assim permitir que cada vez menos ocorram falhas nesta importante parte de um dos principais componentes do processo produtivo do ferro níquel.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar e identificar o mecanismo e modo de falha na quebra da base do cilindro de escorrego do eletrodo de um forno de arco elétrico.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar análises de fractografia;
- Realizar análise de resistência mecânica;
- Identificar a falha primária e secundária contributiva, caso exista;
- Sugerir um novo desenho da base do cilindro de escorrego.

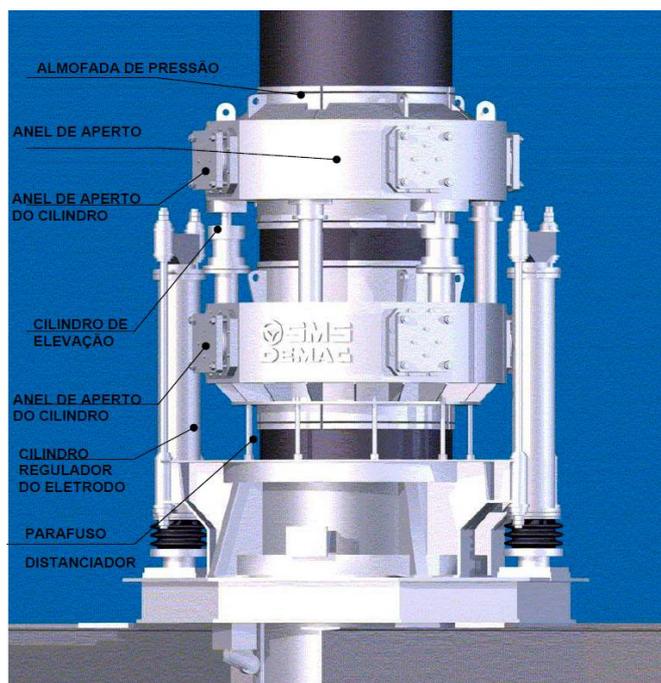
## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 APLICAÇÃO DO FORNO DE ARCO ELÉTRICO**

No processo de fabricação de aço, utiliza-se um Forno de Arco Elétrico (FAE) que aquece o material carregado por meio de um arco elétrico e produz o processo de fusão, transformando a energia elétrica recebida, em calor. A energia elétrica vem de uma rede de corrente alternada de alta tensão que chega a um transformador principal e a partir daí vai para o secundário e alimentam os eletrodos. Três eletrodos são organizados sobre o vaso forrado refratário que contém a carga e coberto com um teto retrátil, através do qual os eletrodos entram no forno. O arco elétrico salta entre os eletrodos passando pela carga, fazendo com o que metal carregado atinja temperaturas altas o suficiente para ocorrer sua fusão (KIRSCHEN; HAY; ECHTERHOF, 2021).

O processo de inclinação do forno e o movimento vertical dos eletrodos são feitos utilizando um sistema hidráulico. Os eletrodos são segurados por pressão de mola; a abertura do dispositivo de aperto também é realizada por meio de pressão hidráulica. Devido a esse sistema, ilustrado na Figura 1, o eletrodo fica seguro mesmo durante uma falha hidráulica.

**Figura 1** - Sistema de escorrego do eletrodo do forno a arco elétrico



Fonte: Adaptado de Anglo American (2022).

Segundo Sabeça et al. (2017), a tensão do arco elétrico é inversamente proporcional à distância do eletrodo à carga do forno, de modo que quanto mais distante o eletrodo, menor a tensão do arco. Este controle é necessário visto que as características físicas, principalmente a condutividade, do material se alteram durante o processo de fusão. Assim, a confiabilidade e segurança desse mecanismo é de grande importância para uma fábrica de ferroquês.

## 2.2 ANÁLISE DE FALHAS

A análise de falhas é um campo científico multidisciplinar e multifacetado, que conecta áreas de engenharia de diversas origens e corpos de conhecimento: da mecânica aplicada à eletroquímica, corrosão e da modelagem numérica ao entendimento da ciência da superfície e da tribologia. A complexidade da natureza deste tópico exige a adoção de várias disciplinas de engenharia, para obter sucesso no alto desempenho do processo e uma análise eficaz da causa raiz, que é o núcleo e o objetivo central do processo de investigação de falhas. A evolução da área de análise de falhas é perpétua, uma vez que avança junto com os numerosos campos independentes e competências centrais, que são consideradas os principais constituintes de todo o seu corpo de conhecimento (PANTAZOPOULOS, 2014).

Existem livros e monografias representativos, com o objetivo de servir o sujeito da análise de falhas de diferentes pontos de vista e perspectivas, ajudando e orientando engenheiros e profissionais de análise de falhas que trabalham em uma variedade de áreas da indústria (GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, 2018).

Além da fractografia qualitativa tradicional, a aplicação da fractografia quantitativa visa medir as características topográficas da superfície da fratura, revelando características significativas da superfície da fratura, em termos de verdadeiras áreas de superfície, distâncias, tamanhos, números, morfologias, orientações e posições, bem como distribuições estatísticas dessas quantidades. Os sistemas modernos de análise de imagem quantitativa de fratura desempenham um papel importante no progresso e no alcance bem-sucedido desses objetivos,

não apenas para acelerar os procedimentos de medição, mas também para executar operações que não seriam possíveis por outras técnicas. Embora a macro-fractografia clássica seja elaborada principalmente utilizando métodos ópticos (estéreo-microscopia), os estudos de pesquisa são cada vez mais motivados a realizar medições quantitativas usando microscopia eletrônica de varredura (MEV) (GOLDSMITH; WANHILL; MOLENT, 2019).

### 2.3 ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS DA FRATURA

O reconhecimento de um modo de fratura é um processo de identificação morfológica. A história da fratura é rastreada até sua origem, desenvolvimento (crescimento ou propagação) e estágio final. A descrição do processo de fratura está literalmente conectada à construção do histórico de fraturas e da hipótese da falha principal. A análise fractográfica, usando microscopia eletrônica óptica e de varredura, constitui uma técnica importante para a resolução da solução de problemas de análise de fraturas. O desdobramento do histórico do processo de fratura é claramente estipulado através da descrição rigorosa da topografia da superfície da fratura. Portanto, a preservação das superfícies de fratura desempenha um papel fundamental em toda a investigação da análise de falha (GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, 2018).

### 2.4 MECANISMOS DE FRATURA INSTANÂNEA

#### 2.2.1 Fratura dúctil

A fratura dúctil é acompanhada por uma quantidade apreciável de deformação plástica permanente, que se manifesta mesmo macroscopicamente por forma/geometria ou distorção da seção transversal. Microscopicamente, os vazios são gerados em torno de inclusões, interfaces de inclusão/matriz e no centro do pescoço formado, onde a tensão hidrostática é maximizada e a triaxialidade do estresse domina (HOSFORD, 2010).

A coalescência da microfissura dá origem à evolução da fratura dúctil (plástica), o que cria assinaturas características e padrões de superfície de fratura. A observação da topografia da superfície da fratura revela um formato específico que consiste em sulcos de vários tamanhos, forma e distribuição. O crescimento de vazios grossos prossegue contra os finos. À medida que a evolução do vazio avança, os vínculos metálicos não fraturados entre os orifícios (se comportando como colunas ou teias) são consecutivamente tensos até que a falha final ocorra, criando sulcos secundários de tamanho mais baixo e levando a uma distribuição atribuída de cavidades. A variação do tamanho do sulco é afetada pelo estresse do limiar vazio e pela taxa de crescimento, que são influenciados principalmente pelas características geométricas e físicas dos recursos microestruturais (HULL, 2000).

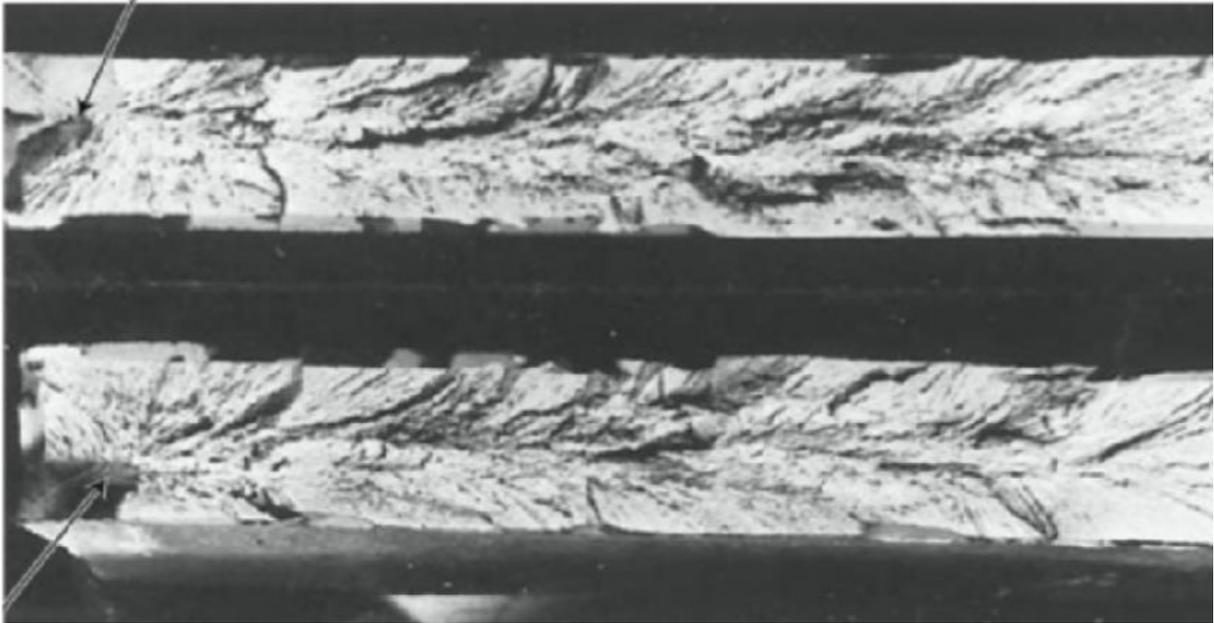
A orientação das cavidades denota a aplicação de carga (axial, cisalhante). A presença de sulcos de cisalhamento indica condições de triaxiliação de alta tensão, impedindo o crescimento profuso de vazios. No caso de fratura dúctil de cisalhamento, a formação de banda de deslizamento é restrita em inclusões, causando evolução de deformação localizada e nucleação de vazios (GOLDSMITH; WANHILL; MOLENT, 2019).

#### 2.2.2 Fratura frágil

Como os processos de deslocamento acompanham a clivagem, postula-se que os planos e instruções preferidos de clivagem são os da plasticidade mais baixa ao redor da fratura. Os

padrões das marcas de praia são características da fratura transgranular (clivagem), representadas topograficamente como platôs conectados por bordas de cisalhamento, mostrando a direção da propagação da trinca. Um exemplo de análise macroscópica capaz de elucidar a origem da fratura é ilustrada na Figura 2.

**Figura 2** - Análise macroscópica de uma fratura frágil, com indicações do início da trinca.



Fonte: (PASSOS, 2019).

### 2.2.3 Fratura de fadiga

Dos três estágios distintos: o primeiro estágio está relacionado à nucleação da trinca a  $45^\circ$  na direção da carga (seguindo os planos de deslizamento); O segundo estágio é o crescimento contínuo da trinca, perpendicular à tensão até o ponto em que a seção transversal restante não pode mais suportar a carga aplicada; e, finalmente, terceiro estágio, que é a fratura instantânea final devido à sobrecarga. A taxa de propagação de trincas durante a fratura do terceiro estágio é quase igual à metade da velocidade do som no material. A maioria dos componentes mecânicos (eixo, engrenagens, lâminas de turbinas, rolamentos, rolos etc.) é submetida a condições de carga cíclica/periódica e, portanto, o modo de falha da fadiga é o mecanismo de fratura predominante (HOSFORD, 2010).

Em geral, o tempo necessário para a nucleação da fratura de fadiga é quase igual a 80-90% da vida útil total do elemento da máquina (TOTTEN, 2005).

## 3 METODOLOGIA

A parte do forno de arco elétrico a ser estudada é o cilindro regulador do eletrodo. Sua base, peça na qual ocorreu a fratura, está ilustrada na Figura 3. Este mecanismo é o responsável pelo ajuste da altura dos eletrodos no forno, o que, por sua vez, controla o arco elétrico formado dentro do forno.

**Figura 3** - Base do cilindro de escorrego de um eletrodo de forno de arco elétrico.



Fonte: Adaptado de Anglo American (2022).

Para elucidação do mecanismo e modo de falha da base do cilindro de escorrego do eletrodo de um forno de arco elétrico, foi realizada a análise macroscópica da peça fraturada utilizando uma lupa QM-3519 da marca Duratech Precision, ilustrada na Figura 4, e para a análise microscópica utilizou-se uma câmera microscópica modelo QC-3197, da marca Digitech Computer, com capacidade de amplificação de imagem de até 200x.

**Figura 4** - Lupa QM-3519 da marca Duratech Precision utilizada nas análises fractográficas.



Fonte: os autores.

Também foi realizada uma análise de tensão e deformação utilizando o método dos elementos finitos com o auxílio do software ANSYS. A partir dessas informações, seguiu-se com a sugestão e fabricação de um novo design para a base do cilindro de escorrego visando a prevenção deste tipo de falha no futuro.

### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DA FRACTOGRAFIA

Para a análise macroscópica, posicionou-se a lupa aproximadamente 50 mm sobre a peça, sob iluminação adequada com inclinação de 45°. Dessa maneira, observou-se as ranhuras da peça e a partir delas foram feitas interpretações, podendo ser capaz de descrever o modo de falha através da observação ou não de marcas de praia, marcas de catraca e zona final de fratura (ZFF), conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5** - Análise macroscópica sendo realizada com a utilização de lupa e lanterna.



Fonte: Próprios autores (2023).

Para a análise microscópica, posicionou-se o lado fraturado da peça sob o foco do microscópio, em condições de iluminação adequada. Assim, seguiu-se de maneira análoga à análise macroscópica, comparando as características das ranhuras observadas com as imagens descritas e ilustradas por trabalhos contidos na revisão da literatura.

### 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DA ANÁLISE DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para contribuir com a análise do mecanismo e modo de falha, também aplicou-se análise de tensão e deformação utilizando o método dos elementos finitos (MEF), com o auxílio do software ANSYS. Inseriu-se no software ANSYS os parâmetros de projeto da peça, como dimensões e material utilizado na construção, bem como as cargas de trabalho, e realizou-se a simulação da peça sob tensão. Desse modo, o software informou o ponto de tensão com potencial para perceber forças que acarretarão num cisalhamento através de um código de cores: verde para tensão aceitável; amarelo para atenção; vermelho para nível crítico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, se apresentarão e se discutirão os resultados obtidos pelas análises fractográficas e pela análise de resistência mecânica utilizando o método dos elementos finitos.

#### 4.1 ANÁLISES FRACTOGRÁFICAS

A Figura 6 ilustra a parte da base do cilindro de escorrego que permaneceu presa ao cilindro. Percebe-se a presença de marcas de praia e de linhas de aprisionamento na peça.

**Figura 6** - Base do cilindro de escorrego, ainda presa ao cilindro, que se fraturou.



Fonte: Próprios autores (2023).

A Figura 7 ilustra a parte que da base do cilindro de escorrego que se fraturou. Segundo Schijve (2009), linhas de aprisionamento são observadas na região lisa se a aplicação da tensão tiver sido descontínua. As linhas aparecem como estrias em virtude do metal compensar, por deformação plástica, a concentração de tensões na raiz da fissura durante os períodos de repouso. As linhas de aprisionamento são um importante indicador da origem e da taxa de propagação da trinca.

**Figura 7** – Base do cilindro de escorrego que se fraturou.



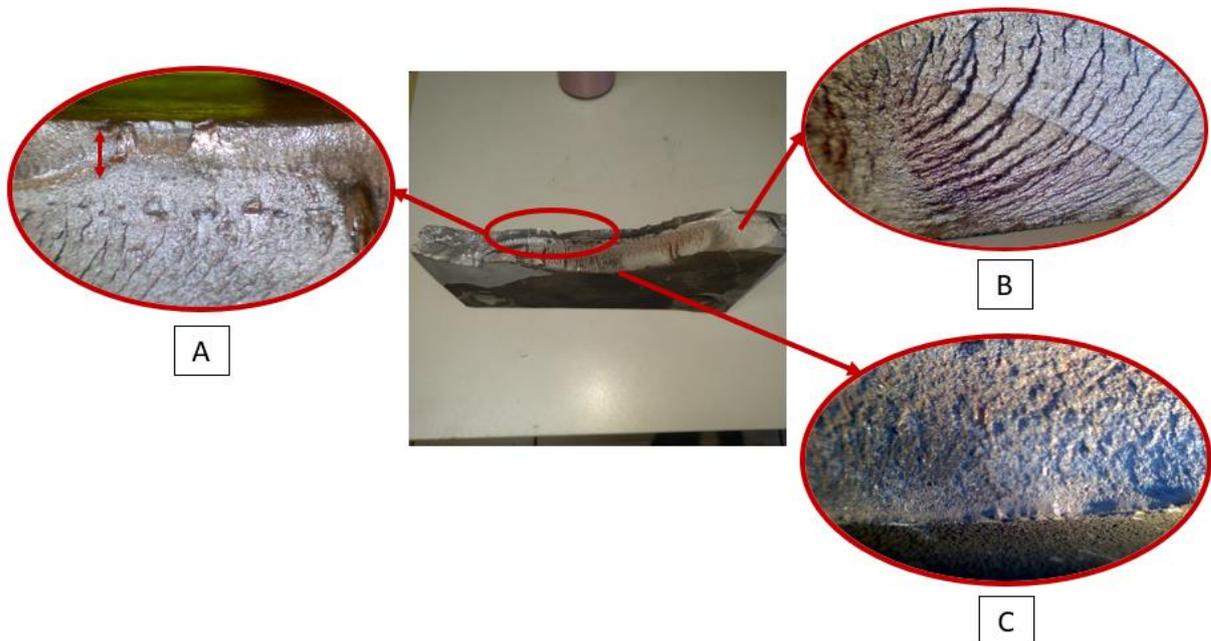
Fonte: Próprios autores (2023).

Por outro lado, as marcas de praia, ilustradas na Figura 7, são um conjunto de linhas circulares concêntricas que podem ser observadas em uma superfície de fratura. Essas marcas são formadas quando ocorre uma interrupção na propagação da trinca, que geralmente ocorre quando a trinca alcança um tamanho crítico e a falha catastrófica ocorre. As marcas de praia são um indicador importante da quantidade de ciclos de tensão que o material ou a estrutura suportou antes de falhar.

A Figura 8C ilustra marcas de catraca no lado inferior da chapa. Essas marcas são um indicador do local de início da fissura, uma vez que elas se formam na região onde a fissura começou a se propagar. Quando a fissura se inicia, ela se propaga lentamente através do material até que atinja um tamanho crítico, momento em que a fratura catastrófica ocorre. O ponto onde a fissura se inicia é geralmente a região mais fraca do material, seja por conta de defeitos microestruturais ou devido a concentração de tensões. Evidencia-se que essas marcas são um indicador do início da fissura, quando se inicia ela se propaga lentamente até atingir o tamanho crítico. Marcas de catraca são provocados por defeito de microestrutura, mudança abrupta de forma geométrica e devido concentração de tensão na fabricação de junta

Na origem das marcas de catraca, considerou-se a presença do cordão de solda, um concentrador de tensão. Em cordões de solda, o efeito dos concentradores de tensão é particularmente importante, pois as mudanças na geometria da solda criam descontinuidades e irregularidades que podem levar a concentrações de tensão. Como resultado, as regiões próximas às descontinuidades do cordão de solda são mais suscetíveis a falhas por fadiga e fratura.

**Figura 8** – Análise micrográfica da base do cilindro de escorrego fraturada.



Fonte: Próprios autores (2023).

A Figura 8A ilustra a Zona de Fratura Final Dúctil (ZFF) com aparência fibrosa e fosca. Isso é uma indicação de que a fratura ocorreu por deformação plástica, ou seja, houve uma deformação considerável da região antes da ruptura final da peça. Esse tipo de fratura ocorre

quando o material é capaz de se deformar consideravelmente antes de romper, o que é característico de materiais dúcteis, como metais.

A aparência fibrosa da zona de fratura dúctil é resultado da forma como as trincas se propagam no material. Quando uma trinca começa a se propagar em um material dúctil, ela é acompanhada pela deformação plástica do material na frente da trinca. Isso faz com que o material se deforme em uma região elíptica em torno da trinca, resultando em uma aparência fibrosa característica na superfície de fratura. Além disso, a aparência fosca da zona de fratura por fadiga é resultado da rugosidade da superfície, que é causada pela deformação plástica que ocorre antes da fratura.

A Figura 8B mostra marcas de coloração diferente na ZFF, o que pode ser um indicador de mudanças na superfície do material, possivelmente relacionadas à zona termicamente afetada (ZTA). Isso ocorre porque a soldagem envolve a aplicação de calor intenso e rápido, o que pode resultar em mudanças na superfície da ZTA.

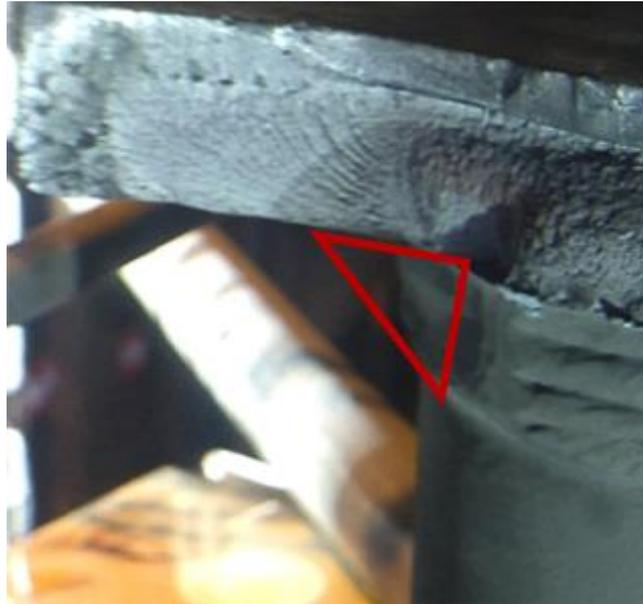
Durante o processo de soldagem, a ZTA é submetida a altas temperaturas, que podem causar uma série de mudanças na microestrutura do material. Por exemplo, a aplicação de calor pode levar à formação de grãos mais grossos na ZTA, o que pode afetar negativamente suas propriedades mecânicas. Além disso, o resfriamento rápido durante o processo de soldagem pode levar à formação de microestruturas indesejadas, como martensita, que podem afetar ainda mais as propriedades mecânicas da ZTA.

Essas mudanças microestruturais podem ser indicadas pela presença de marcas com coloração diferente na superfície de fratura. Por exemplo, as marcas com coloração mais escura podem indicar a presença de regiões com microestruturas mais grossas ou com precipitados, enquanto as marcas com coloração mais clara podem indicar a presença de microestruturas mais refinadas.

Ainda referente a Figura 8B, observa-se que as marcas de praia são um conjunto de linhas de aprisionamento circulares concêntricas observada na superfície da peça fraturada, e também são um indicador importante da quantidade de ciclo de tensão que o material suportou antes de se falhar.

A Figura 9 ilustra uma angulação do filete de solda não ideal. Foi possível identificar que é um efeito concentrador de tensão, pois a mudança na geometria da solda cria irregularidades e descontinuidade dos cordões, causando concentração de tensão e deixando o material suscetível a falha por fadiga e fratura. Em muitos casos é recomendado que o filete de solda forme um ângulo de 45 graus em relação à chapa que está sendo soldada. Esse ângulo é conhecido como ângulo de bisel ou chanfro e é frequentemente utilizado para garantir uma boa penetração da solda, uma distribuição uniforme de tensões e uma boa resistência mecânica da junta soldada.

**Figura 9** - Angulação do filete de solda da base do cilindro de escorrego.



Fonte: Próprios autores (2023).

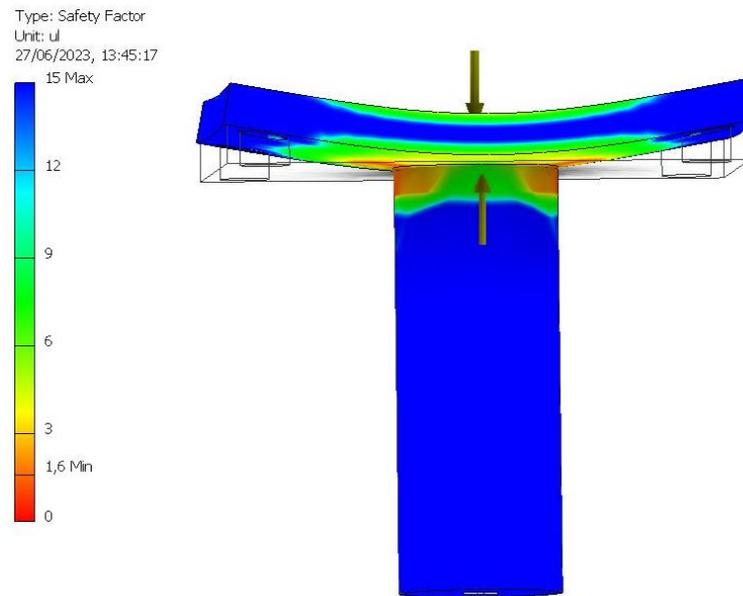
O ângulo de bisel é especialmente importante quando se trabalha com chapas mais espessas, já que permite uma maior penetração da solda no material, aumentando a área de contato entre as peças e melhorando a resistência da junta. Além disso, o ângulo de bisel ajuda a evitar a formação de vazios de solda, que podem prejudicar a resistência da junta.

Vale lembrar que a escolha do ângulo de bisel deve ser baseada nas características do material que está sendo soldado, no tipo de solda que está sendo utilizada e nas condições de aplicação da junta soldada. Em alguns casos, outros ângulos podem ser mais apropriados para garantir a qualidade da solda.

#### **4.2 ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

De acordo com a análise de tensão e deformação pelo método de elementos finitos utilizando o software ANSYS, a carga aplicada na base do cilindro apresenta um ponto de fragilidade na solda da chapa, onde inicia-se a fissura, corroborando com as análises fractográficas. A Figura 10 ilustra o comportamento da peça quando aplicada uma carga de 20 T provocada pelo sistema hidráulico no sentido vertical na chapa de base.

**Figura 10** - Análise de resistência mecânica pelo método de elementos finitos na base do cilindro de escorrego.



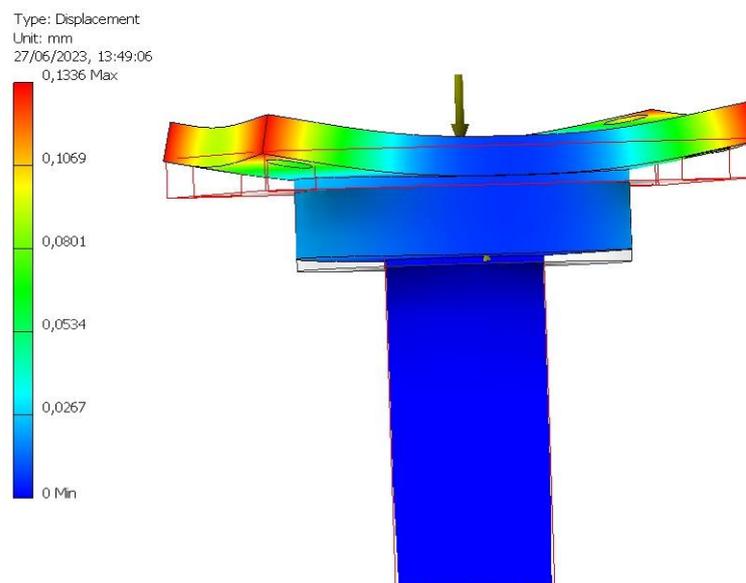
Fonte: Próprios autores (2023).

É possível observar que há um acúmulo de tensão na interface do cilindro com a base, caracterizando um ponto de fragilidade na solda da chapa onde inicia-se a fissura, com uma deformação de 2,05mm, o que coincide com o observado nas análises metalográficas.

### 4.3 PROPOSTA DE PROJETO DA BASE DO CILINDRO DE ESCORREGO

Em posse dessas evidências, seguiu-se com a sugestão da fabricação de um novo projeto da base do cilindro de escorrego. Sugeriu-se o reforço da interface do cilindro com a base, e realizou-se a análise de tensão e deformação com os parâmetros do novo design, ilustrado na Figura 11.

**Figura 11** - Análise de tensão e deformação na base do cilindro de escorrego após a modificação proposta.



Fonte: Próprios autores (2023).

Analisando a figura gerada pelo software ANSYS, observa-se que não há mais acúmulo de carga na solda da chapa. Antes esta apresentou uma deformação de 2,05mm e agora houve deformação de 0,05mm, praticamente negligenciável. Assim, seguiu-se com a fabricação do novo design, ilustrado na Figura 12.

**Figura 12 - Peças da base do cilindro de escorrego com o novo design**



Fonte: Próprios autores (2023).

Este novo projeto da chapa da base apresenta cordões de solda contínuos, ângulo de Bisel e filete com 45 graus, contribuindo com alívio de tensão aumentando a resistência da peça.

## **5 CONCLUSÕES**

A indústria do ferroníquel é de grande relevância para a economia brasileira, e o forno de arco elétrico desempenha papel fundamental no processamento desse recurso, responsável por fundir a matéria prima utilizada na sua produção.

Após análise realizada em todo sistema, conclui-se que o objetivo do trabalho foi atingido, sendo possível identificar o modo de falha como fratura por fadiga (flexão simples), provocado pela aplicação de tensão descontínua. A causa de falha primária foi uma carga de 20 toneladas aplicada pelo sistema hidráulico na chapa no momento final de escorrego e a causa de falha secundária contributiva foi a solda com filete irregular, responsável por aumentar a fragilidade na chapa, onde iniciou-se a fissura.

Ademais, também atingiu-se os objetivos específicos, sendo possível analisar e identificar o modo de falha da base do cilindro de escorrego do eletrodo de um forno de arco elétrico através de análises fractográficas e de tensão e deformação, bem como sugerir melhorias no design da peça de modo a se evitar a repetição da falha no futuro.

Como sugestão para trabalhos futuros, seria possível realizar análises de resistência mecânica em outras peças que possam apresentar pontos de acúmulo de tensão, a fim de se detectar possíveis pontos de falha futuros e corrigi-los antes que a fratura aconteça.

## REFERÊNCIAS

ALIYA, D. The Failure Analysis Process—An Overview. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 42–57, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11668-021-01328-y>.

BAJAJ, P. *et al.* Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 772, 2020.

CRUMRINE, D.; POST, D. **How Much Is Plant or Facility Downtime Costing You?**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://blog.isa.org/downtime-factory-plant-industrial-costs-risks>. Acesso em: 24 nov. 2022.

GOLDSMITH, N. T.; WANHILL, R. J. H.; MOLENT, L. **Quantitative fractography of fatigue and an illustrative case study**. [S. l.: s. n.], 2019.

GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, J. L. The Fractographic Examination. *Em*: STRUCTURAL INTEGRITY. [S. l.: s. n.], 2018. v. 3, p. 1–20. *E-book*. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76651-5\\_1](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76651-5_1).

HAGHDADI, N. *et al.* **Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges**. [S. l.: s. n.], 2021.

HOSFORD, W. F. **Solid Mechanics**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511841422/type/book>.

HULL, D. Fractography - Observing, Measuring and Interpreting Fracture Surface Topography. **Practical Metallography**, [s. l.], v. 37, n. 7, p. 409–409, 2000. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/pm-2000-370711/html>.

KIRSCHEN, M.; HAY, T.; ECHTERHOF, T. Process improvements for direct reduced iron melting in the electric arc furnace with emphasis on slag operation. **Processes**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2021.

PANTAZOPOULOS, G. A. **A Process-Based Approach in Failure Analysis**. [S. l.: s. n.], 2014.

PASSOS, B. **Falhas - Uma introdução aos mecanismos de fraturas**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/falhas-uma-introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-mecanismos-de-fraturas-bruno-passos/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 6 jul. 2023.

SABENÇA, S. de C. *et al.* Modernização do controle dos eletrodos da aciaria elétrica da CSN Aços Longos. *Em*: , 2017, São Paulo. **Anais do Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos**. São Paulo: Editora Blucher, 2017. p. 589–600. Disponível em: <http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/modernizacao-do-controle-dos-eletrodos-da-aciaria-eletrica-da-csn-acos-longos>.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. *E-book*. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-6808-9>.

SHIPLEY, R. J.; MILLER, B. A.; PARRINGTON, R. J. Introduction to Failure Analysis and Prevention. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, [s. l.], v. 22, n. 1, 2022.

TOTTEN, G. Fatigue Crack Propagation. *Em*: FRACTURE MECHANICS. [S. l.]: CRC Press, 2005. v. 166, p. 469–528. *E-book*. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781420058215/chapters/10.1201/9781420058215-17>.

WU, X. *et al.* Finite element analysis on structural failure mechanism of three-dimensional orthogonal woven fabrics subjected to impact of spherical projectile. **Fangzhi Xuebao/Journal of Textile Research**, [s. l.], v. 41, n. 8, 2020.