

Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG
Curso de Engenharia Mecânica

CLEITON ANTÔNIO DOS SANTOS
LUCAS ALVES RAMALHO

ANÁLISE DE FALHA NOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO DA UMA ESTAÇÃO
GERAL DE SOPRO

Publicação Nº 04

Goianésia - GO
2023

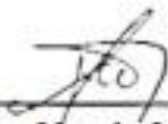
**CLEITON ANTÔNIO DOS SANTOS
LUCAS ALVES RAMALHO**

**ANÁLISE DE FALHA NOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO DA UMA ESTAÇÃO
GERAL DE SOPRO**

Publicação N° 04

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

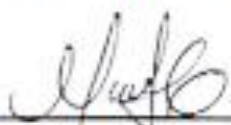
Aprovados por:



**Alessandro Martins Moraes, Mestre (FACEG)
(ORIENTADOR)**



**Ariane Martins Caponi Lima, Mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**Marinés Chinququirá Carvajal Bravo Gomes, Doutora (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, CLEITON ANTÔNIO. RAMALHO, LUCAS ALVES.

Análise de falha nos elementos de fixação da uma estação geral de sopro (FACEG, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2023).

ARTIGO – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Mecânica.

1. Mecanismo de falha

2. Análise Fractográfica

3. Análise de dureza

I. FACEG

II. Análise de falha nos elementos de fixação da uma

estação geral de sopro

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, C. A. RAMALHO, L. A. Análise de falha nos elementos de fixação da uma estação geral de sopro. Artigo, Publicação 04 2023/1 Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 30p. 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Cleiton Antônio Dos Santos e Lucas Alves Ramalho.

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Análise de falha nos elementos de fixação da uma estação geral de sopro.

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.



Cleiton Antônio dos Santos
Rua 44, n 477, bairro Nova Fiica
76387-749, Goianésia/GO - Brasil



Lucas Alves Ramalho
Rua 19, Qd.32A, Lt. 10A, Granville
76382-298, Goianésia/GO - Brasil

ANÁLISE DE FALHA NOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO DA UMA ESTAÇÃO GERAL DE SOPRO

Cleiton Antônio dos Santos¹

Lucas Alves Ramalho²

Alessandro Morais Martins³

RESUMO

Testes de metalografia são uma prática de grande valia para garantir a qualidade de um processo fabril, uma vez que possibilita identificar os mecanismos de falha a fim de evitá-los. Este artigo apresenta uma análise da causa de falha em uma estação geral de sopro e propõe melhorias para prevenir ocorrências futuras. O estudo utilizou análises químicas por espectrometria de emissão óptica e análises fractográficas para investigar os mecanismos de fratura e identificar os fatores que levaram à falha estrutural do sistema. As análises químicas revelaram que a falha teve início com a nucleação e crescimento de trincas por fadiga nos parafusos V2 e V3, os quais posteriormente falharam quando as trincas atingiram tamanho crítico. Os parafusos remanescentes (R1, R2, F1 e P4) também sofreram falha devido à sobrecarga resultante e à presença de trincas por fadiga. Esses eventos estão associados à falta de resistência mecânica adequada dos parafusos, especialmente à fadiga, para suportar os esforços impostos pela operação do sistema. Com base nos resultados, recomenda-se a revisão do projeto, considerando a substituição dos parafusos por versões mais resistentes. Além disso, é essencial implementar um plano de manutenção preventiva, incluindo inspeções regulares dos parafusos e padronização do torque de aperto. Essas medidas visam garantir a fixação adequada das vigas, evitando movimentos indesejados e torque excessivo. Este estudo destaca a importância da análise detalhada para compreender as causas da falha estrutural e propor ações corretivas apropriadas. A revisão do projeto, a substituição dos parafusos e a implementação do plano de manutenção preventiva são fundamentais para garantir a integridade estrutural e a segurança do sistema. Espera-se que essas melhorias contribuam para evitar falhas semelhantes e prolongar a vida útil da estação geral de sopro.

Palavras-chave: Mecanismo de falha. Análise Fractográfica. Análise de dureza.

¹Discente do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: cleitonantonio_ds@hotmail.com

²Discente do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: lucaas.alves_17@hotmail.com

³Mestre, professor do curso da Faculdade Evangélica de Goianésia. E-mail: alessandro.martins@docente.evangelicagoianesia.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O teste das propriedades dos materiais é uma prática de garantia da qualidade durante os processos de fabricação. Um benefício da metalografia não destrutiva é que o teste pode ser feito no local. A metalografia dos componentes permite avaliar a microestrutura dos materiais, permitindo uma rápida verificação do material e a identificação do método de falha, o que é interessante para as empresas, de modo que, uma vez conhecidas as razões para a falha do material, se torna possível evitá-las (KOVAČEVIĆ; KARASTOJKOVIĆ; ALEKSIĆ, 2013).

Pela ampla gama de aplicações, o aço é um material comumente estudado na metalografia. A maior parte do aço inoxidável contém cerca de 8 a 10% de níquel. O metal de níquel é amplamente utilizado para muitas aplicações, incluindo fins industriais, militares, de transporte/aeroespacial, marítimo e arquitetônico, devido a suas propriedades, como alta resistência à corrosão e oxidação, excelente resistência e tenacidade a altas temperaturas e condutividades térmicas e elétricas relativamente baixas. Cerca de dois terços de todo o níquel refinado produzido é utilizado pela indústria de aço inoxidável. O restante é dividido na produção de outras ligas metálicas, baterias recarregáveis, reações de catálises, cunhagens de moedas, revestimentos metálicos e fundição (NOVAIS, 2022).

O níquel ocorre na natureza principalmente como sulfetos e lateritas (óxidos e silicatos). A principal fonte de metal de níquel primário no momento são sulfetos. No entanto, há uma tendência crescente no uso de minérios de laterita como fonte primária, pois cerca de 70% dos recursos mundiais de níquel terrestres estão contidos em depósitos lateríticos. Grande parte das inovações desenvolvidas no processo produtivo de níquel tiveram origem na indústria de processamento de urânio. Algumas dessas inovações, como o processo de extração por solvente (SX), também foram aplicadas na indústria do cobre (ANDRADE et al., 2000; ZHANG et al., 2020).

Quatro processos são atualmente utilizados na indústria de níquel por meio de técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas. As tecnologias de processo atuais diferem fundamentalmente na fase inicial, de obtenção do sulfeto, tornando-se semelhantes após esta etapa (ANDRADE *et al.*, 2000).

O processo de beneficiamento mais utilizado para minérios sulfetados consiste em duas etapas principais. No primeiro caso, o minério é submetido à concentração, o que aumenta em até 10 vezes a concentração do minério alimentado na usina. O enxofre é então oxidado em altos-fornos ou fornos retangulares, resultando em matte (geralmente um composto metálico de sulfetos). A escória resultante é processada separadamente em um forno elétrico para chapeamento de sulfeto. O matte produzido pode então ser comercializado ou enviado para purificação (segunda etapa do processo). A etapa de purificação do níquel se inicia com a inserção de ácido sulfúrico a fim de se obter sulfatos solúveis, que serão extraídos a partir da utilização de um solvente (SX). Depois, o metal passa por um processo de eletrólise, que resulta na obtenção de níquel e cobalto, bem como um efluente que contém outros metais que possuem valor agregado. Este efluente passa por um processo de tratamento para precipitar estes metais, a fim de recuperá-los para eventual comercialização (ANDRADE *et al.*, 2000).

Impurezas como enxofre, silício, carbono e fósforo devem ser removidas do metal bruto para atender às especificações do produto. Os métodos usados para esse fim incluem fornos de arco elétrico e estação geral de sopro que tem a finalidade de injetar oxigênio no metal. Este processo de oxidação para reduzir o silício, o carbono e o fósforo, é realizado por uma estação geral de sopro, que utiliza uma lança refratária para soprar oxigênio entre 10 a 14 bar no metal quente. Sem esta etapa de oxidação das impurezas, o níquel pode apresentar características

físicas que não atendem às especificações da indústria do aço. Assim, uma estação geral de sopro é de grande importância no processo produtivo do níquel (REDL *et al.*, 2020).

1.1 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho aborda um incidente envolvendo uma estação geral de sopro empregada em uma indústria de ferroníquel localizada no estado de Goiás, que compreendeu a fratura de elementos de fixação do equipamento, resultando em parada da produção. É importante que o incidente que envolveu a estação de sopro geral seja elucidado, pois abrange um equipamento de grande importância para o processo de produção do ferroníquel. Sem o seu funcionamento, que tem por objetivo oxidar as impurezas presentes no metal processado, a fluxo produtivo pára, gerando grandes prejuízos à indústria.

Assim, reside a importância desse estudo em encontrar a causa, as formas e os meios de falhas que possam ocorrer. Agregando assim aos envolvidos no processo e conseqüentemente a empresa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Identificar a falha dos elementos de fixação que levou ao tombamento de uma estação geral de sopro empregada em uma fábrica de ferroníquel localizada no estado de Goiás.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar análise química por espectrometria de emissão ótica;
- Submeter os elementos de fixação ao ensaio de dureza Rockwell C;
- Analisar a fractografia dos elementos de fixação;
- Identificar os mecanismos de falha dos parafusos ASTM A-325;

1.3 HIPÓTESE

Têm-se como hipótese que a causa de falha foi ocasionada por fadiga em algum componente do equipamento, uma vez que a estação geral de sopro frequentemente trabalha sob carga, em temperaturas elevadas. Mesmo empregando os materiais corretos, a falta de manutenção, principalmente nessas características de trabalho, pode levar à falhas desta natureza (LAI *et al.*, 2021).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÃO E APLICAÇÃO DE NÍQUEL EM FERRO FUNDIDO E AÇO

O níquel é um metal de transição branco-prata com um ponto de fusão de 1458 ° C e uma densidade de 8,908 g/cm³. Pertence ao Grupo VIII na tabela periódica, juntamente com ferro e cobalto, que são comumente referidos como a "tríade de ferro". De fato, eles têm semelhanças nas propriedades e na fonte de minérios. O níquel tem uma estrutura cristalina

cúbica de face centrada e também facilita a formação dessa estrutura em ligas ferrosas (CUNAT, 2004).

As superligas à base de níquel são frequentemente o material de escolha para aplicações estruturais de alta temperatura, principalmente quando é necessária resistência à fluência e/ou fadiga e o risco de degradação devido à oxidação e/ou corrosão são graves. Seu surgimento pode ser atribuído ao desenvolvimento do motor da turbina a gás, particularmente aqueles usados para propulsão a jato. Cada vez mais estão sendo empregadas superligas em uma gama cada vez mais diversa de aplicações, por exemplo em usinas de energia ultrasuper-críticas (como a nuclear), motores a diesel e até células de combustível. Seu uso é particularmente pronunciado além de 750 °C, uma vez que as propriedades dos aços ferríticos se degradam acentuadamente além dessa temperatura. A urgência para melhorar a economia de combustível e a emissões de CO₂ associadas a esses sistemas de conversão de energia está fornecendo o incentivo tecnológico para isso, sustentado por pressões econômicas, sociais e legislativas significativas (CRUNDWELL *et al.*, 2011).

Curiosamente, o níquel, apesar de ser utilizado majoritariamente em superligas resistentes ao calor, não possui, isoladamente, temperatura de fusão relativamente alta. Na verdade, sua temperatura de fusão (1455 °C) é mais baixa do que a do ferro (1538 °C) e a do titânio (1668 °C). Um primeiro fator contribuinte é a estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), para a qual as taxas dos processos ativados termicamente que controlam a deformação da fluência são baixos. Além disso, o polimorfo da CFC é estável nas condições ambientais do ponto de fusão, de modo a apresentar resistência à transformação de fase. Um segundo fator é a solubilidade substancial de elementos de liga na matriz Ni, denotados γ . A oxidação e corrosão/ sulfidação são suprimidas pelos elementos Crômio e Cobalto, respectivamente. As adições de Alumínio, Titânio e Tântalo melhoram a tensão de fluxo e a resistência à tração final, e Molibdênio, Rênio e Tungstênio juntamente com fortalecedores de limite de grãos Carbono e Boro, onde são necessários, conferem o desempenho necessário de fluência. Essa complexidade química oferece muitas possibilidades para o design de novas ligas. Terceiro, através do uso do processamento criterioso de solidificação, tornou-se possível remover os limites dos grãos, que são uma fonte de fraqueza a temperaturas elevadas e, assim, implantar essas ligas na forma de cristal único, com efeito vantajoso. Esta situação é única entre os materiais estruturais. Finalmente, e mais crucialmente, o Níquel é capaz de apoiar a precipitação da fase Ni₃ (Al, Ti, Ta), denotada γ' , que exibe a estrutura cristalina L1₂. Ao fazer isso, surge a chamada anomalia da tensão de escoamento: a tensão de fluxo aumenta com a temperatura, um efeito que pode ser explorado para aplicações de alta temperatura. O comportamento das estruturas de defeitos planares nos limites antifásicos, acumulando falhas em L1₂ é diretamente responsável por este efeito. É a influência da fase L1₂ nas propriedades das superligas à base de níquel que se destaca como a característica única e definidora da metalurgia física das superligas (FLOWER, 2012).

2.2 PRODUTOS DE NÍQUEL PARA FUNDIÇÕES

Comercialmente, existem duas classes de níquel primário que podem ser utilizados em fundições, segundo o International Nickel Study Group (INSG). A Classe 1, cujos produtos apresentam concentração em peso de 99% ou mais em níquel, e a Classe 2, cujos produtos apresentam concentração em peso menor do que 99% em níquel.

Algumas alternativas ao uso do metal primário de níquel podem ser utilizadas, como o ferroníquel e ferro-gusa de níquel. O ferroníquel, como o próprio nome indica, é uma liga de ferro e níquel, comercializado em forma de grânulos de tamanho entre 2 e 50 mm. O ferroníquel passa por uma etapa de refino, a fim de diminuir sua concentração de impurezas a um nível

aceitável para o processo que ocorre nas fundições. Já o ferro-gusa de níquel não passa por esse processo, possuindo alta quantidade de carbono, silício e manganês, restringindo seu uso em fundições (MEADOWCROFT, 2012).

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE NÍQUEL METAL E FERRONÍQUEL

Devido ao seu uso comum, selecionou-se um ferroníquel brasileiro convencional com nominalmente 28% em peso de níquel. A Tabela 2 mostra a especificação química garantida deste produto e a especificação química garantida de cátodos de níquel de corte de grau LME (*London Metal Exchange*, ou bolsa de metais de Londres) de 4" x 4".

Tabela 1 - Composição química garantida de um ferroníquel brasileiro e de cátodos de níquel de corte de grau LME.

Elemento [% peso]	Ferroníquel	Cátodos de níquel de corte de grau LME
Ni	25-35	Min. 99.8
Co	Max. 0.85	Max. 0.15
Cu	Max. 0.06	Max. 0.02
Si	Max. 0.04	< 0.005
P	Max. 0.02	< 0.005
S	Max. 0.08	Max. 0.01
C	Max. 0.04	Max. 0.03
Fe	Equilíbrio	Max. 0.02
Cr	Max. 0.04	n/a

Fonte: (YUCEL; TURAN; YILDIRIM, 2012). Adaptado.

O níquel, por apresentar menor afinidade ao oxigênio quando comparado a outros metais disponíveis durante seu processo de fusão, apresenta baixa taxa de perda na faixa de temperatura onde ocorre a fundição de ligas ferrosas, geralmente de 1300 a 1600 ° C. Assim, não há diferenças quanto a isso no uso de ferroníquel ou níquel metálico. A grande diferença entre o ferroníquel e o níquel metálico é a presença de elementos contaminantes no ferroníquel, como ferro, cobalto e outros elementos (YUCEL; TURAN; YILDIRIM, 2012).

2.3.1.1 Ferro

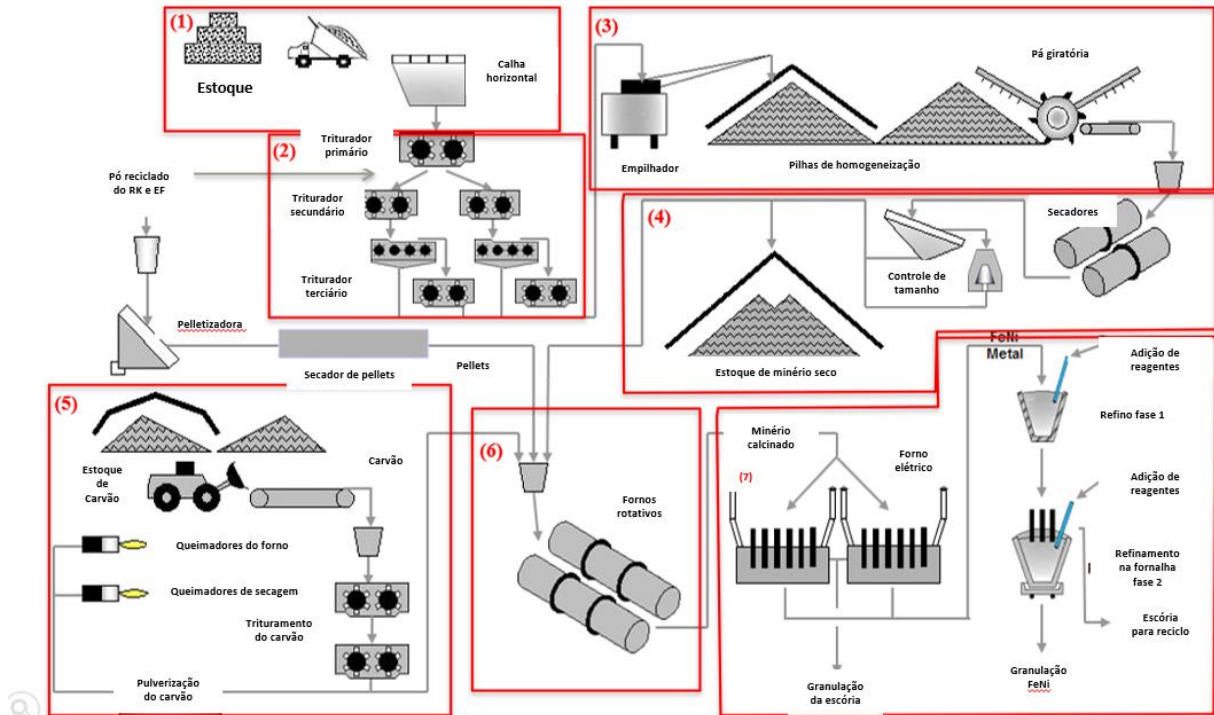
O ferroníquel pode ser adicionado a qualquer carga de forno para produção de qualquer tipo de ferro e aço com níquel igual ou menor que sua composição. O operador do forno precisa considerar a quantidade de ferro em seus cálculos ou ferramentas de software. O ferro incluído no ferroníquel é um substituto para adicionar sucata de aço ou ferro-gusa. O tipo de ferroníquel necessário para um determinado processo depende da concentração de níquel desejada na liga ferrosa final (GASIK, 2013).

2.4 PRODUÇÃO DE FERRONÍQUEL

A Figura 1 representa o fluxograma do processo em operação na fábrica de ferroníquel abordada no presente estudo. O fluxograma pode ser separado em 7 etapas principais, indicadas

na Figura 1: (1) recebimento do minério, (2) preparação da carga, (3) homogeneização da carga, (4) secagem, (5) pulverização de carvão, (6) calcinação e pelotização, e (7) redução e refino.

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção do ferroníquel.



Fonte: Adaptado de Anglo American (2020).

A planta industrial em questão possui capacidade de produção de 2,4 milhões de toneladas de minério seco por ano, duas linhas de calcinadores e fornos elétricos e duas linhas de refino, com demanda máxima de eletricidade de 210 MW. Para efeitos de comparação, 210 MW é a capacidade da usina hidrelétrica de Igarapava, que foi projetada para atender a demanda de eletricidade de 225 mil pessoas (MARINHO, 2022).

A etapa de redução e refino é onde de fato ocorre a transformação do minério em ferroníquel, e é onde é empregada a estação geral de sopro. Primeiramente o minério é carregado no forno elétrico, onde atinge temperaturas em torno de 1500 a 1520 °C e onde ocorrem reações de redução.

O metal então é vazado para um forno painel, conforme ilustra a Figura 2.

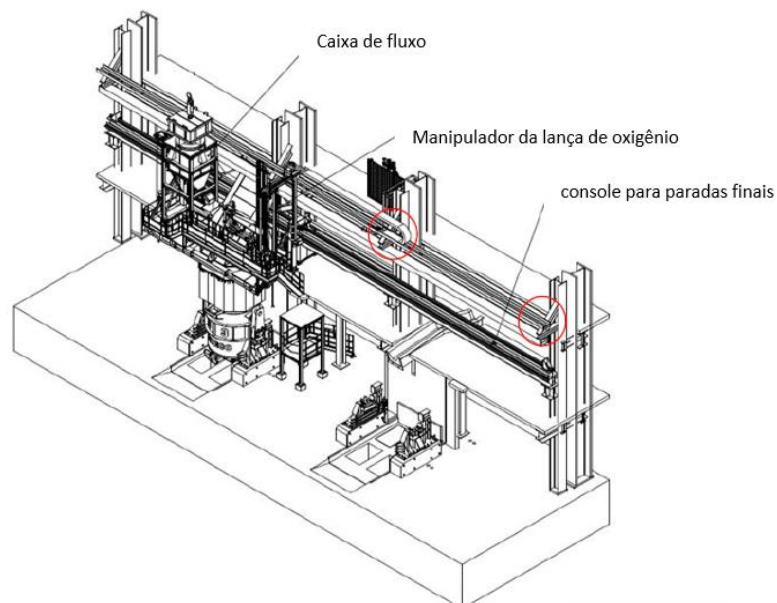
Figura 2 - Metal bruto sendo vazado do forno elétrico para o forno panela.



Fonte: Adaptado de Anglo American (2020).

Durante essa etapa, a estação geral de sopro, ilustrada na Figura 3, é utilizada para injetar oxigênio no sistema a fim de reduzir impurezas indesejadas como o silício, o carbono e o fósforo. Também durante essa etapa, são inseridos componentes como CaO, Al, CaSi e FeSi para dessulfurização do metal.

Figura 3 - Estação geral de sopro.



Fonte: Adaptado de Anglo American (2020).

Ao sair do forno panela, o metal líquido refinado é granulado em água, classificado e estocado para expedição. A Figura 4 ilustra o produto final obtido através deste processo industrial.

Figura 4 - Ferroníquel obtido após a etapa de refino.

Fonte: Adaptado de Anglo American (2020).

A Tabela 2 mostra a composição do metal que sai do forno elétrico e do ferroníquel, obtido após as etapas de oxidação e dessulfurização.

Tabela 2 - Composição química típica do ferroníquel bruto e ferroníquel após refino

Elemento [% peso]	Metal bruto	Metal refinado
Ni	25-35	25-35
C	0.15	Max. 0.04
S	0.3	Max. 0.06
Si	0.12	Max. 0.04

Fonte: Adaptado de Anglo American (2020).

2.5 ESTAÇÃO GERAL DE SOPRO

As *estações gerais de sopro* ou estações de sopro são um componente crítico do processo de fundição, pois permitem o controle preciso da injeção de oxigênio no forno. A injeção de oxigênio pelas *estações gerais de sopro* é fundamental para manter as altas temperaturas exigidas no processo de fundição e também para garantir a combustão completa do combustível. O uso de *estações gerais de sopro* demonstrou melhorar a eficiência da produção de ferroníquel, reduzir os custos de produção e melhorar a qualidade geral do produto final (ROMERO *et al.*, 2022).

Existem vários tipos de *estações gerais de sopro* que são usadas na produção de ferroníquel, incluindo *estações gerais de sopro* de lança e *estações gerais de sopro* de Tuyere. Cada tipo de *estações gerais de sopro* tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a sua escolha é normalmente baseada nas necessidades específicas do processo de produção. Por exemplo, as *estações gerais de sopro* de lança são normalmente usadas em fornos menores, pois são mais precisas e podem injetar oxigênio a pressões mais altas. Já as de Tuyere são mais comumente usadas em fornos maiores, pois fornecem uma área maior para injeção de oxigênio (SARBISHEI; TAFAGHODI KHAJAVI, 2020).

Apesar da importância das *estações gerais de sopro* na produção de ferroníquel, existem vários desafios que precisam ser enfrentados para otimizar o processo de fundição. Um dos principais desafios é o desenvolvimento de *estações gerais de sopro* mais eficientes e econômicas que possam operar em temperaturas e pressões mais altas. Outro desafio é a otimização da colocação de *estações gerais de sopro* ao redor do forno, para garantir uma distribuição uniforme de oxigênio e uma qualidade de produção consistente. A pesquisa futura nesta área poderá ser de grande importância para o sucesso contínuo da indústria de ferroníquel e provavelmente envolverá o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para melhorar a eficiência e a eficácia das *estações gerais de sopro* (ROMERO *et al.*, 2022).

Um dos problemas mais comuns encontrados em *estações gerais de sopro* é o bloqueio ou entupimento. Isso pode ocorrer quando o bocal de injeção de oxigênio fica obstruído por detritos ou escória, o que pode impedir a entrada do oxigênio no forno e reduzir a temperatura na zona de fundição. Os entupimentos podem ocorrer devido a diversos fatores, como limpeza inadequada do bico, fluxo insuficiente de oxigênio ou presença de impurezas no combustível. Os bloqueios podem afetar significativamente a eficiência do processo de fundição, pois podem resultar em produção reduzida, aumento do consumo de energia e aumento dos custos de produção (SARBISHEI; TAFAGHODI KHAJAVI, 2020).

Outro problema que pode ocorrer nas *estações gerais de sopro* é o vazamento. O vazamento pode ocorrer quando o bocal de injeção de oxigênio fica danificado ou desgastado, o que pode permitir que o oxigênio escape do bocal antes de entrar no forno. O vazamento pode levar à redução da injeção de oxigênio, o que pode resultar na combustão incompleta do combustível e reduzir a qualidade da produção. O vazamento também pode aumentar o risco de acidentes ou incêndios, pois o oxigênio que escapa pode pegar fogo e causar danos à estação de sopro ou ao forno (SARBISHEI; TAFAGHODI KHAJAVI, 2020).

No geral, as *estações gerais de sopro* desempenham um papel crítico no processo de fundição de ferroníquel, mas podem encontrar vários problemas que podem afetar seu desempenho e eficiência. Lidar com esses problemas requer manutenção e monitoramento cuidadosos das *estações gerais de sopro*.

2.6 PARAFUSOS E A IMPORTÂNCIA DOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Os parafusos desempenham um papel crucial na fixação de componentes estruturais e são amplamente utilizados em diversas indústrias, incluindo a metalúrgica. Eles são responsáveis por garantir a integridade e estabilidade de estruturas, como a estação de sopro em uma fábrica de ferroníquel. A importância dos elementos de fixação, como os parafusos, reside no fato de que eles mantêm as partes conectadas em uma montagem, distribuindo as cargas aplicadas e resistindo a esforços externos, como vibrações, impactos e forças de tração. Além disso, eles devem ser capazes de resistir às tensões e deformações que ocorrem durante a operação, assegurando a segurança e a eficiência da estrutura em que estão empregados. Portanto, a seleção adequada dos parafusos e a análise da sua capacidade de suportar as condições de serviço são de extrema importância para prevenir falhas catastróficas e garantir o desempenho confiável dos sistemas (BUDYNAS; NISBETT, 2009).

2.7 MODO DE FALHA POR FADIGA

O modo de falha por fadiga é uma das principais causas de falha em elementos de fixação, como parafusos, e pode resultar em consequências graves. A falha por fadiga ocorre quando um componente é submetido a repetidos ciclos de tensão, levando à sua ruptura progressiva ao longo do tempo. Esse tipo de falha é caracterizado por um processo gradual de propagação de trincas microscópicas em resposta às variações cíclicas de carga. Quando as tensões cíclicas atingem níveis críticos, as trincas podem se propagar rapidamente até que ocorra a falha total do componente (DOWLING, 2013).

A falha dúctil é um modo comum de falha por fadiga em parafusos, onde ocorre a deformação plástica progressiva do material, levando à sua ruptura. Já a falha por cisalhamento ocorre quando as forças de cisalhamento aplicadas ao parafuso excedem sua capacidade de resistência ao cisalhamento, resultando em uma falha súbita e completa. É fundamental compreender os modos de falha por fadiga relevantes para os elementos de fixação a fim de identificar e mitigar os fatores que contribuem para essas falhas, como sobrecargas cíclicas, má qualidade do material, projeto inadequado ou pré-tensão inadequada dos parafusos (DOWLING, 2013).

2.8 DIMPLES CISALHADOS

Define-se como dimples cisalhados as características observadas na superfície de parafusos após a falha por cisalhamento. Essas pequenas depressões em forma de copo ou cavidade são formadas devido à deformação plástica que ocorre durante o processo de falha. Quando o parafuso é submetido a uma carga que excede sua capacidade de resistência, ocorre o deslizamento das camadas do material, resultando em deformações permanentes e separação das camadas. A presença dos dimples cisalhados indica a natureza dúctil do material, onde ele pode deformar-se plasticamente antes de falhar completamente. A análise dos dimples cisalhados fornece informações sobre resistência, tenacidade e qualidade do material, permitindo a avaliação da integridade estrutural do parafuso e o diagnóstico de possíveis problemas de fabricação (CALLISTER et al., 2014).

3 METODOLOGIA

O atual trabalho se caracteriza como um estudo de caso, abordando o incidente ocorrido com uma estação geral de sopro em uma fábrica de ferroníquel localizada no estado de Goiás. O escopo da análise de falha dos elementos de fixação causadores do incidente consta com uma análise química por espectrometria de emissão ótica, ensaio de dureza Rockwell C e análise fractográfica, conforme descrito a seguir.

3.1 ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA

As análises químicas foram realizadas por Espectrometria Ótica, no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalográficos do Instituto SENAI de Tecnologia Metalmeccânica (ISTMM).

A análise química foi realizada por meio da espectrometria de emissão ótica, que é uma técnica capaz de identificar e quantificar os elementos químicos presentes em uma amostra.

Nesse método, a amostra é exposta a uma fonte de energia, geralmente um arco elétrico ou um laser, que faz com que os átomos emitam radiação característica. Essa radiação é então coletada e separada em diferentes comprimentos de onda usando um sistema ótico, como um espectrômetro.

Cada amostra foi colocada no espectrômetro e a fonte de energia foi aplicada para excitar os átomos presentes na amostra. A radiação emitida pelos átomos foi coletada pelo sistema ótico do espectrômetro e separada em diferentes comprimentos de onda.

Os espectros obtidos foram comparados com uma biblioteca de espectros de referência, que contém os padrões de emissão de diferentes elementos químicos. Com base nas intensidades das linhas espectrais presentes no espectro da amostra, os elementos químicos foram identificados.

Os resultados da análise química foram registrados e analisados em relação aos materiais especificados para a estação geral de sopro. Quaisquer desvios significativos na composição química identificados nas amostras poderiam indicar possíveis causas de falha, como utilização de materiais inadequados, contaminação durante o processo de fabricação ou desgaste anormal.

3.2 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL C

Os ensaios de dureza foram realizados com o auxílio de uma máquina Instron - Wolpert modelo 930/250, ilustrada na Figura 5.

Figura 5 - Equipamento Instron - Wolpert modelo 930/250 a ser utilizado no ensaio de dureza Rockwell.



Fonte: (POPSCREEN, 2022). Acesso em 06/12/2022.

Para se realizar a aferição, os objetos de estudo foram inseridos no equipamento no local indicado, e foi aplicada uma pré-carga de 10kg sobre as peças utilizando a alavanca do equipamento. Assim que o mostrador do equipamento indicar que a pré-carga foi aplicada

corretamente, se seguiu com a aplicação da carga principal, também através da alavanca do equipamento. A carga aplicada fez uma leve perfuração no corpo de prova. A profundidade da indentação é inversamente proporcional à dureza do corpo de prova. Após a indentação, o mostrador do equipamento indicou a dureza Rockwell C da peça.

Foram feitas 3 indentações para cada um dos 7 parafusos, totalizando 21 amostras. As indentações tiveram espaço entre elas de três vezes o diâmetro da indentação para garantir a interpretação correta da dureza das peças. Esses dados foram então tabulados e se prosseguiu calculando a média e o desvio padrão da dureza de cada parafuso com o auxílio do software Excel.

3.3 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

A preparação envolveu a remoção de qualquer sujeira, resíduo ou revestimento presente na superfície das amostras, garantindo uma visualização clara e adequada. A análise macrofractográfica foi realizada utilizando uma lupa da marca Leica, modelo M80. Essa lupa é uma ferramenta óptica que permite uma visualização ampliada da superfície de fratura dos parafusos. Cada amostra foi cuidadosamente inspecionada sob a lupa, buscando identificar características macroscópicas, como padrões de fratura, zonas de deformação, trincas propagadas e regiões de desgaste. Durante essa análise, foram registradas imagens e observações relevantes para posterior avaliação e interpretação dos resultados.

A análise microfractográfica foi realizada utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca JEOL, modelo JSM-7100FLV. Esse equipamento permite uma análise mais detalhada e de alta resolução das características da superfície de fratura. As amostras preparadas foram montadas no MEV e, em seguida, foram adquiridas imagens usando o detector de elétrons secundários (Secondary Electrons – SE). Esse tipo de detecção proporciona uma imagem com maior contraste, destacando as características da superfície, como descontinuidades, trincas, porosidades e marcas de fadiga.

Durante a análise macro e microfractográfica, todas as evidências relevantes observadas na superfície de fratura dos parafusos foram registradas. Isso incluiu a identificação dos mecanismos de fratura presentes, como fratura por fadiga, fratura dúctil, fratura frágil, corrosão, entre outros. Além disso, características específicas, como padrões de falha, características de propagação de trinca e zonas de deformação, também foram registradas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

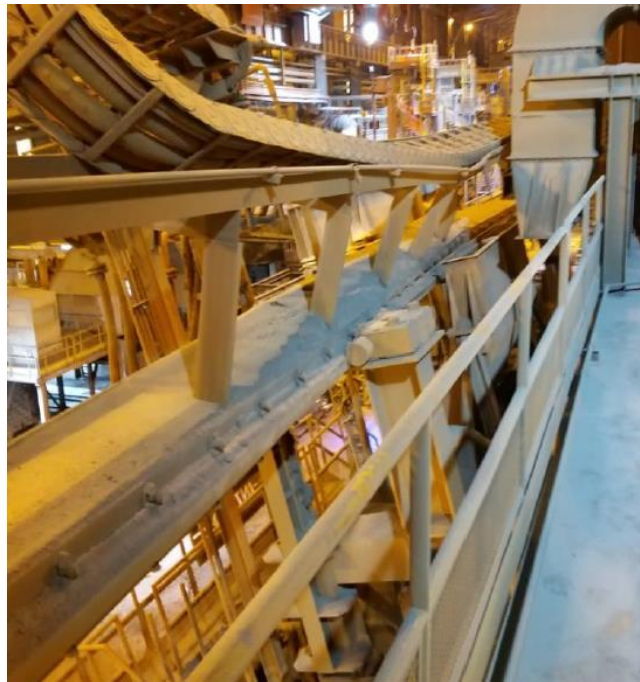
Após o incidente com a estação geral de sopro, ilustrada na Figura 6, realizou-se uma avaliação de todo o conjunto envolvido no evento. Foi encontrada uma das vigas estruturais de sustentação da parte superior da estação geral de sopro fora de sua posição, ilustrada na Figura 7, apresentando deformações.

Figura 6 - Estação geral de sopro tombada após o incidente



Fonte: Próprios autores (2023).

Figura 7 - Viga de sustentação da estação geral de sopro deformada e fora de posição



Fonte: Próprios autores (2023).

Notou-se a ausência de grande parte dos seus elementos de fixação (parafusos sextavados $\text{Ø } 3/4'' \times 2 \text{ } 1/2''$ ASTM A-325), ilustrado na Figura 8.

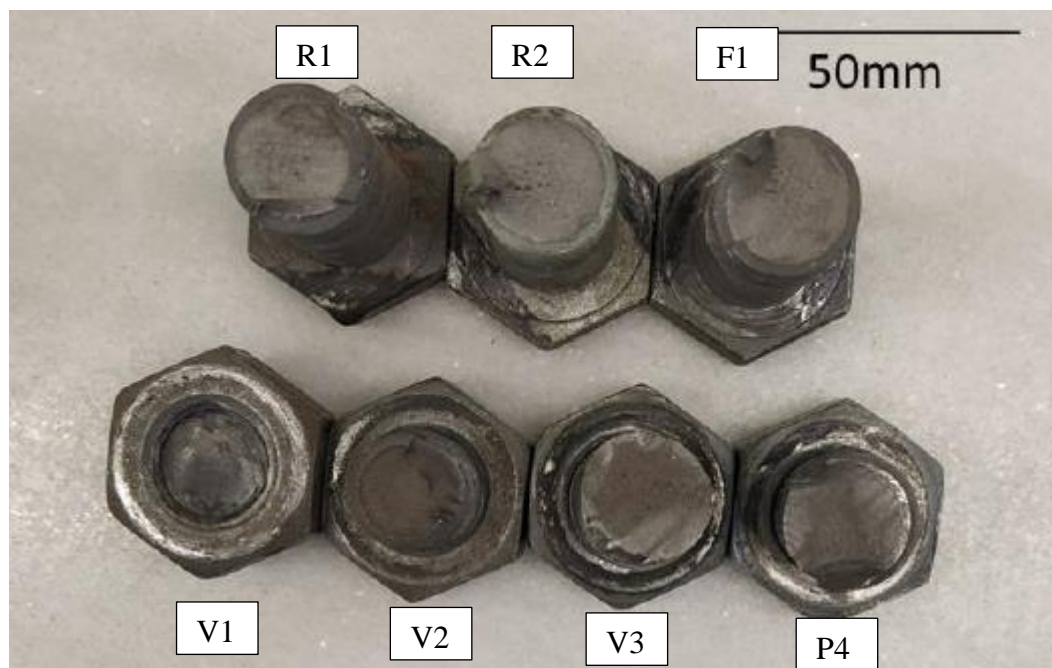
Figura 8 – A - Local de fixação da viga com a estrutura do prédio com ausência dos parafusos e dois parafusos rompidos; B - Superfície de um dos parafusos encontrado no local no dia do incidente



Fonte: Próprios autores (2023).

Foram encontrados no pátio do refino outros parafusos, com as mesmas especificações dos parafusos encontrados no dia do evento, com fortes indícios de pertencerem a alguma das vigas de sustentação superior da estação geral de sopro. No total foram encontrados 7 parafusos, ilustrados na Figura 9. Em posse destes corpos de prova, seguiu-se com as análises descritas na metodologia.

Figura 9 - Parafusos rompidos das vigas de sustentação da estação geral de sopro.



Fonte: Próprios autores (2023).

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados das análises químicas dos parafusos analisados estão apresentados na Tabela 3. Como os parafusos são produzidos com aço especificado como ASTM A325, a composição química determinada nessa norma também está apresentada na Tabela 3. Observa-se que a norma especifica apenas teores de carbono, enxofre, fósforo e manganês, e que para todos os parafusos esses teores estão dentro da faixa requeridas.

Tabela 3 - Análise química (% massa) dos parafusos e faixa de composição química para o aço ASTM A325

Parafuso	Elementos								
	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
R1	0,32	0,264	0,0054	0,0074	0,83	0,133	0,416	0,034	0,166
R2	0,31	0,251	0,0065	0,015	0,86	0,157	0,414	0,033	0,139
F1	0,29	0,23	0,0019	0,013	0,76	0,029	0,394	0,023	0,007
V1	0,3	0,26	0,0088	0,018	0,84	0,129	0,409	0,033	0,166
V2	0,34	0,208	0,0083	0,016	0,81	0,04	0,403	0,001	0,027
V3	0,33	0,205	0,0082	0,017	0,8	0,039	0,404	0,001	0,027
P4	0,32	0,246	0,0039	0,019	0,88	0,121	0,411	0,024	0,123
ASTM A-325	0,30-0,52	-	<0,0500	<0,0400	>0,60	-	-	-	-

Fonte: Próprios autores (2023).

Observa-se que o conteúdo de Cobre (Cu) dos parafusos F1, V2 e V3, e de Molibdênio (Mo) dos parafusos V2 e V3 estão menores em relação aos outros. De acordo com Chen et al. (2013), maiores concentrações de Cobre em elementos de fixação podem resultar em uma menor resistência mecânica, visto que o metal é menos duro do que o aço carbono, como também uma menor resistência à temperaturas elevadas. Ademais, segundo Kwon et al. (2016), uma maior concentração de Mo pode aumentar a resistência à corrosão e melhorar a resistência do material em temperaturas elevadas.

Apesar disso, ainda constata-se que as concentrações desses elementos em todos os parafusos analisados ainda é muito baixa para se perceber quaisquer alterações físicas, conforme demonstrado nos ensaios de dureza e fractografia realizados na sequência.

4.2 ANÁLISE DE DUREZA ROCKWELL C

Os resultados para os ensaios de dureza dos parafusos estão apresentados na Tabela 4. A faixa de dureza especificada para parafusos dessa classe com diâmetro da rosca de até 1" é de 25 a 34 HRC (VALENCIANI, 1997). Os resultados indicam que os parafusos V1 e P4 apresentaram dureza ligeiramente abaixo do limite inferior da faixa especificada.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de dureza Rockwell C para os sete parafusos

Parafuso	HRC
R1	31,0±1,0
V3	30,0±0,5
F1	29,0±0,7
R2	29,0±0,5
V2	28,0±0,2
P4	23,0±1,0
V1	23,0±0,7

Fonte: Próprios autores (2023).

A baixa dureza dos parafusos P4 e V1 pode ser devido a diversos fatores, onde a seleção inadequada do material utilizado na fabricação é a principal. Materiais contendo um menor teor de carbono e outros elementos de liga, tais como aço de baixa resistência, tendem a ter uma dureza mais baixa. Outros fatores envolvem o tratamento térmico inadequado como têmpera e revenimento, diminuindo a dureza. A presença de inclusões não metálicas como sulfetos e óxidos, tendem a reduzir a dureza do material.

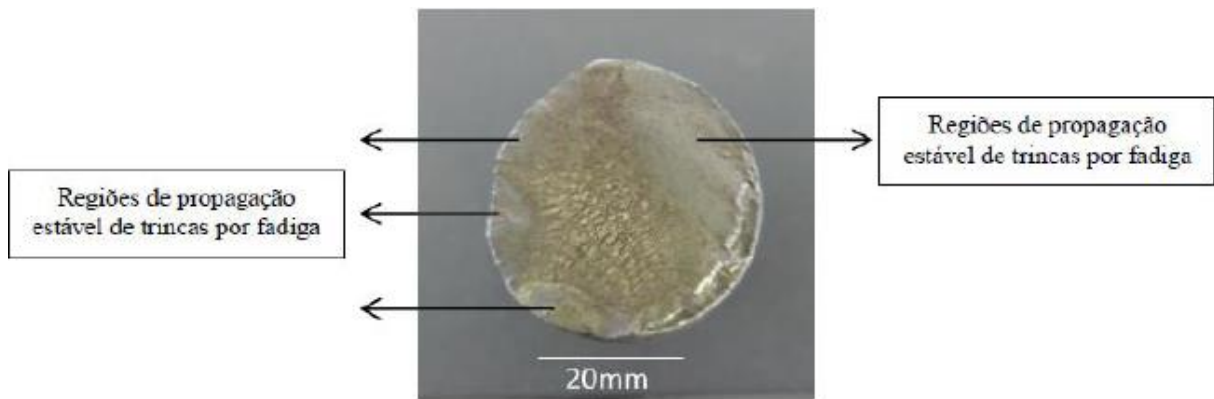
Essas inclusões atuam como pontos de concentração de tensões, facilitando a deformação plástica e, conseqüentemente, diminuindo a dureza do material. É importante ressaltar que a dureza Rockwell C é apenas uma propriedade mecânica e não é o único indicador de qualidade dos parafusos, existem outros fatores, como resistência à tração e tenacidade.

4.3 ANÁLISES FRACTOGRÁFICAS

4.3.1 Parafuso V2

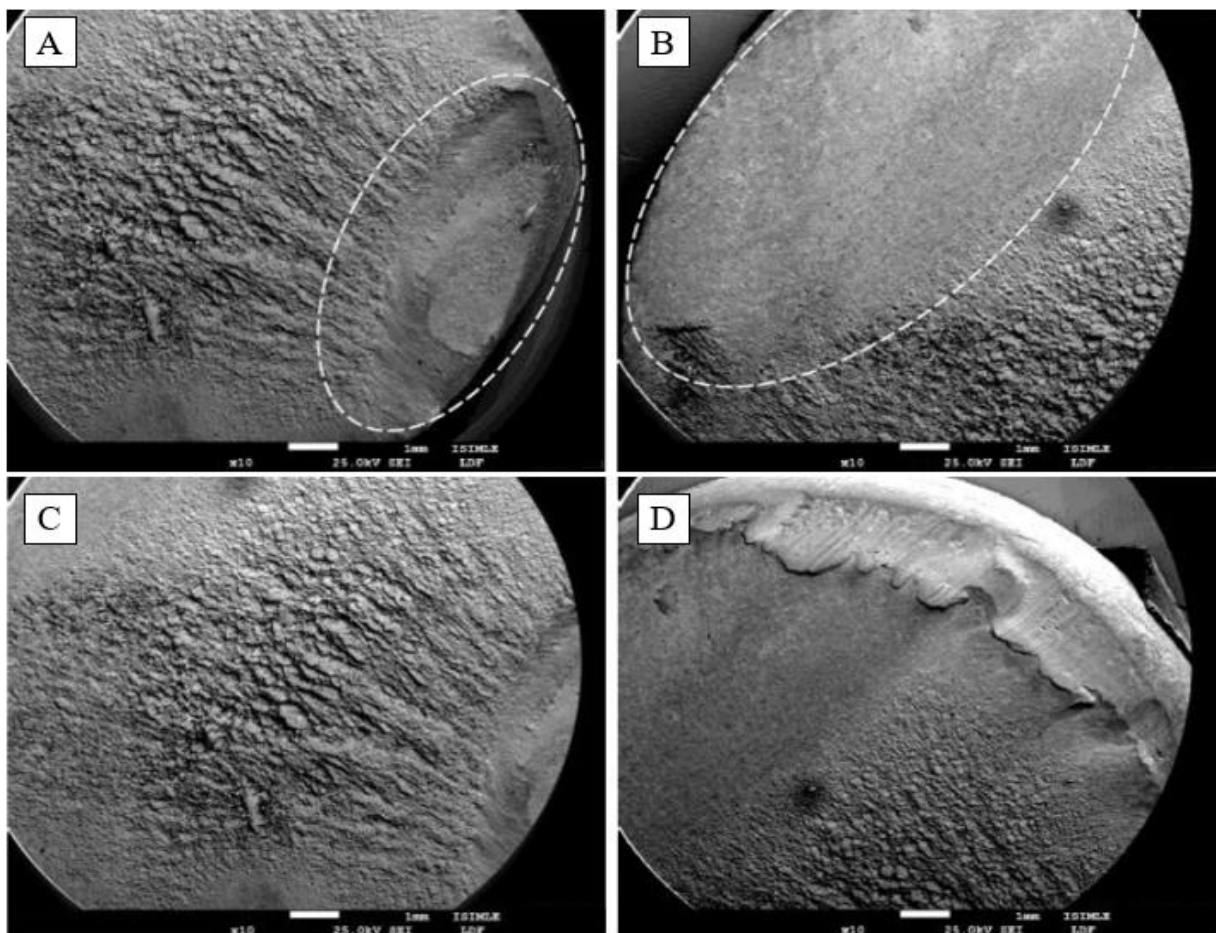
A Figura 10 apresenta a fotografia do parafuso V2 e a Figura 11 os aspectos macrofractográficos da superfície da fratura. É possível perceber tanto na fotografia quanto nas imagens obtidas por MEV que existem, ao longo da borda da superfície de fratura do parafuso, algumas regiões em formato de meia lua com aspecto liso, características de propagação estável de trincas por fadiga (Figura 10 e Figura 11 A e B). Observa-se também que a fratura aconteceu na porção sem rosca do corpo do parafuso, e por isso nenhum degrau referente aos filetes de rosca é visível. Observa-se ainda (Figura 11 C) uma região central com aspecto rugoso, referente ao arrancamento final e uma impressão similar a um entalhe (Figura 11 D) que pode ter sido causada por uma ferramenta tipo cunha utilizada para retirada do parafuso ou por algum evento de contato entre as partes da estrutura durante o colapso.

Figura 10 - Fotografia do parafuso V2



Fonte: Próprios autores (2023).

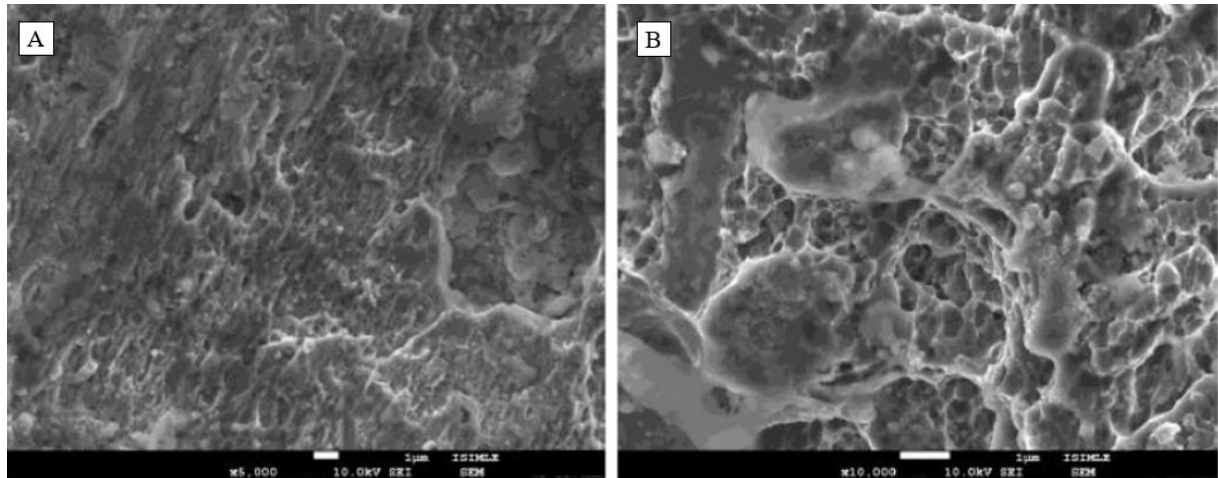
Figura 11 - Aspectos macrofractográficos da superfície de fratura do parafuso V2 com detalhes de (A) e (B) regiões de propagação estável de trinca, (C) região rugosa de arrancamento final e (D) entalhe lateral, 10X, MEV.



Fonte: Próprios autores (2023).

Detalhes dos aspectos microfractográficos presentes na superfície do parafuso V2 são apresentados na Figura 12, mostrando a presença de dimples cisalhados na região de arrancamento final, confirmando a hipótese de que a fratura final se deu pelo fato da seção remanescente não suportar mais a solicitação imposta e que este esforço foi por cisalhamento.

Figura 12 - Aspectos microfractográficos da superfície de fratura do parafuso V2 mostrando dimples cisalhados, (A) 5000X e (B) 10000X, MEV.



Fonte: Próprios autores (2023).

Na análise de dimples cisalhados podemos observar a natureza e a qualidade do material. Dessa forma avaliamos a resistência e a tenacidade do material, com base na morfologia dos dimples, assim identificamos problemas de fabricação, a cerca de inclusões e falhas de microestrutura. Tais informações são de extrema importância para que possa realizar projetos adequados, garantindo a integridade estrutural em diferentes aplicações.

4.3.2 Parafuso V3

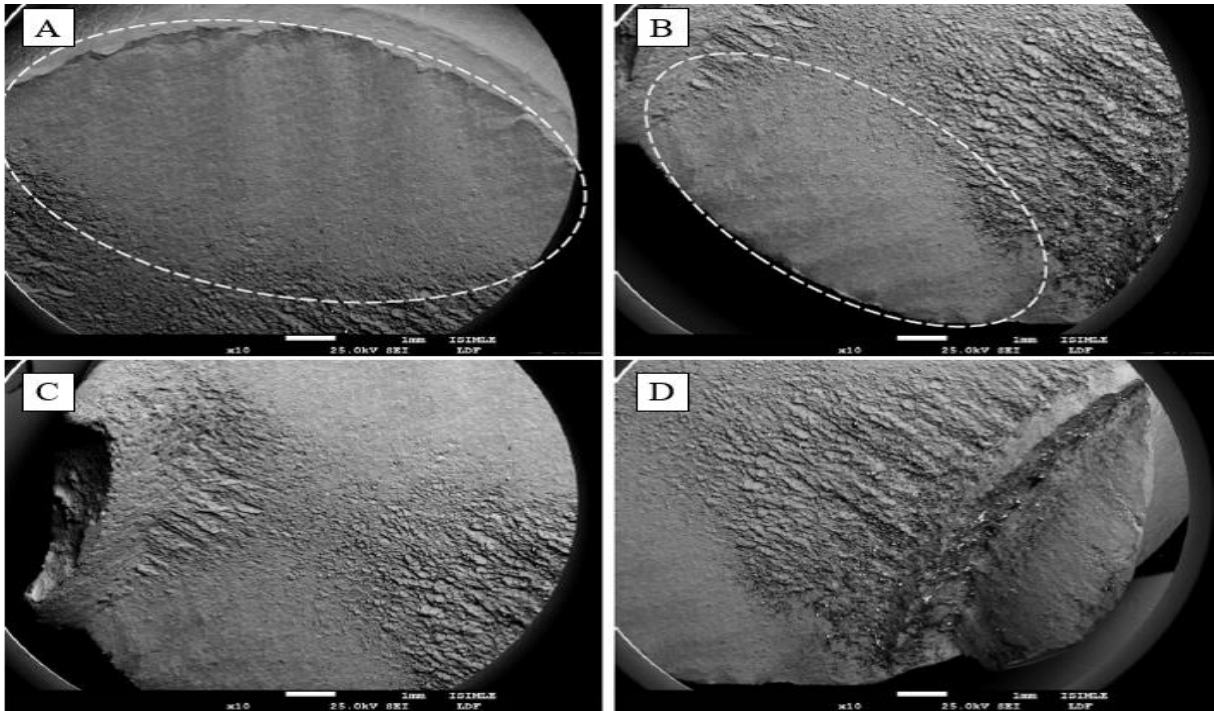
A fotografia e as macrofractografias da superfície de fratura do parafuso V3 estão apresentadas nas Figuras 13 e 14. Da mesma forma que no parafuso anterior, é possível perceber tanto na fotografia quanto nas imagens obtidas por MEV que existem duas regiões em formato de meia lua com aspecto liso característico de propagação estável de trincas por fadiga. Também nesse caso, observa-se que a fratura aconteceu na porção cilíndrica sem rosca do corpo do parafuso. Observa-se ainda uma região central com aspecto rugoso, referente ao arrancamento final que termina com a formação de arestas cisalhadas devido a deformação plástica mais pronunciada no final da fratura.

Figura 13 - Fotografia do parafuso V3



Fonte: Próprios autores (2023).

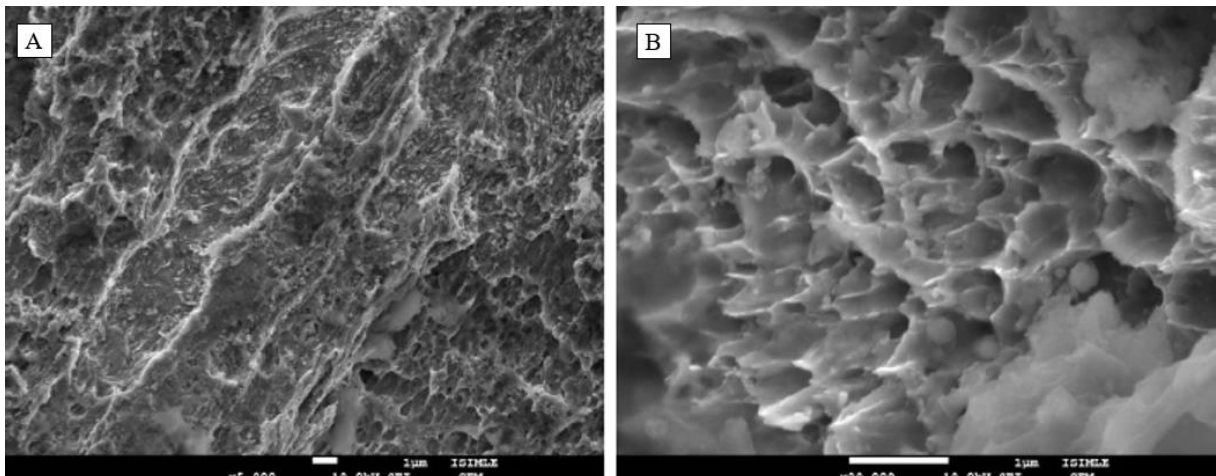
Figura 14 - Aspectos macrofractográficos da superfície de fratura do parafuso V3 com detalhes de (a) e (b) regiões de propagação estável de trinca, (c) e (d) região rugosa de arrancamento final, 10X, MEV.



Fonte: Próprios autores (2023).

Detalhes dos aspectos microfractográficos presentes na superfície do parafuso V3 são apresentados na Figura 15, mostrando a presença de estrias na superfície de propagação estável (Figura 15 A) e de *dimples* cisalhados na porção referente ao arrancamento final (Figura 15 B). Estas evidências indicam que este parafuso entrou em colapso por estar sujeito às mesmas condições de carregamento do parafuso V2.

Figura 15 - Aspectos microfractográficos da superfície de fratura do parafuso V3 mostrando (a) estrias, 5000X e (b) *dimples* cisalhados, 20000X, MEV



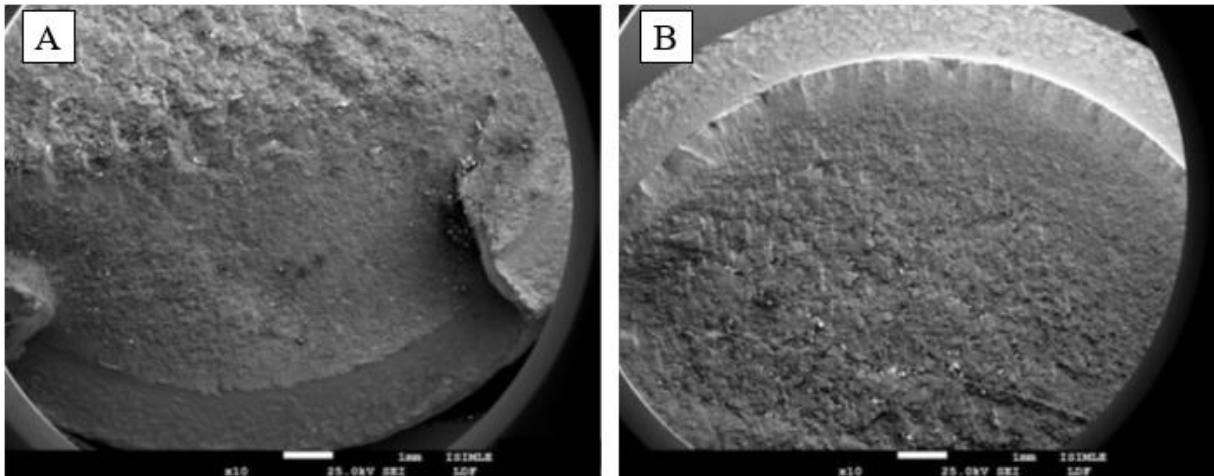
Fonte: Próprios autores (2023).

4.3.3 Parafusos R1, R2 e F1

Os parafusos R1, R2 e F1 apresentam mecanismos de falha parecidos. Os três parafusos apresentam marcas radiais na borda da superfície de fratura, indicando início de processo de fadiga e pequenas regiões de propagação estável de trinca, visíveis em fractografias obtidas

por MEV. Nesses três casos também é visível que o processo de degradação por fadiga se iniciou na raiz dos filetes de rosca, indicando a intensificação de tensões nesta região uma vez que a própria geometria do filete se caracteriza como um concentrador de tensões. O rompimento final desses parafusos aconteceu por tração, com presença de *dimples* normais à superfície de fratura. A Figura 16 apresenta em detalhes a superfície do parafuso R1.

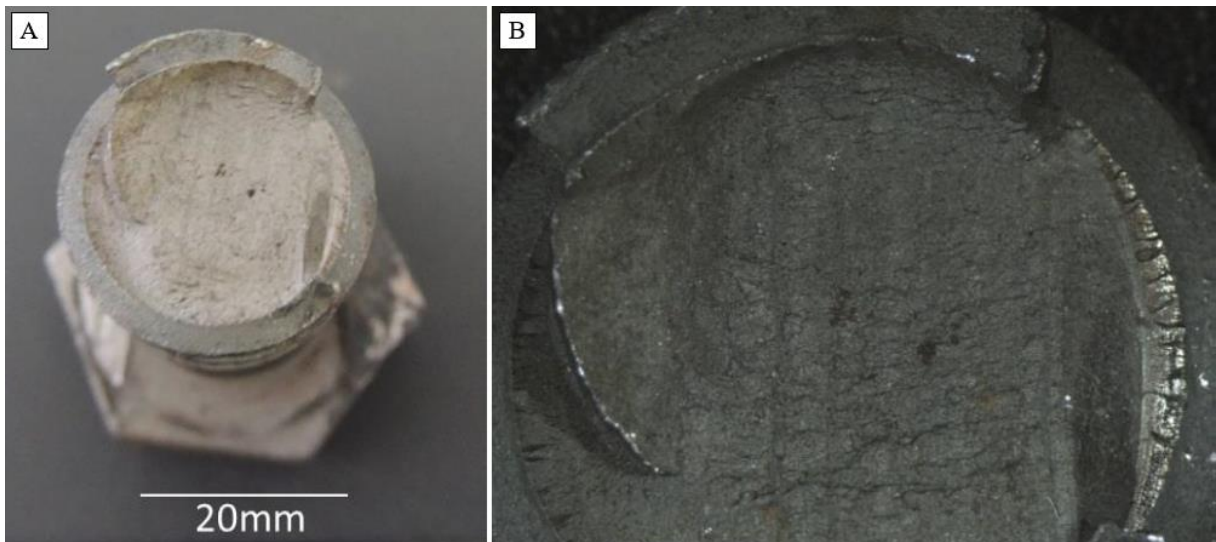
Figura 16 - Aspectos macrofractográficos da superfície de fratura do parafuso R1 com detalhes de (a) região de propagação estável de trinca e (b) marcas radiais, 10X, MEV.



Fonte: Próprios autores (2023).

As Figuras 17 e 18 apresentam os detalhes da superfície do parafuso R2.

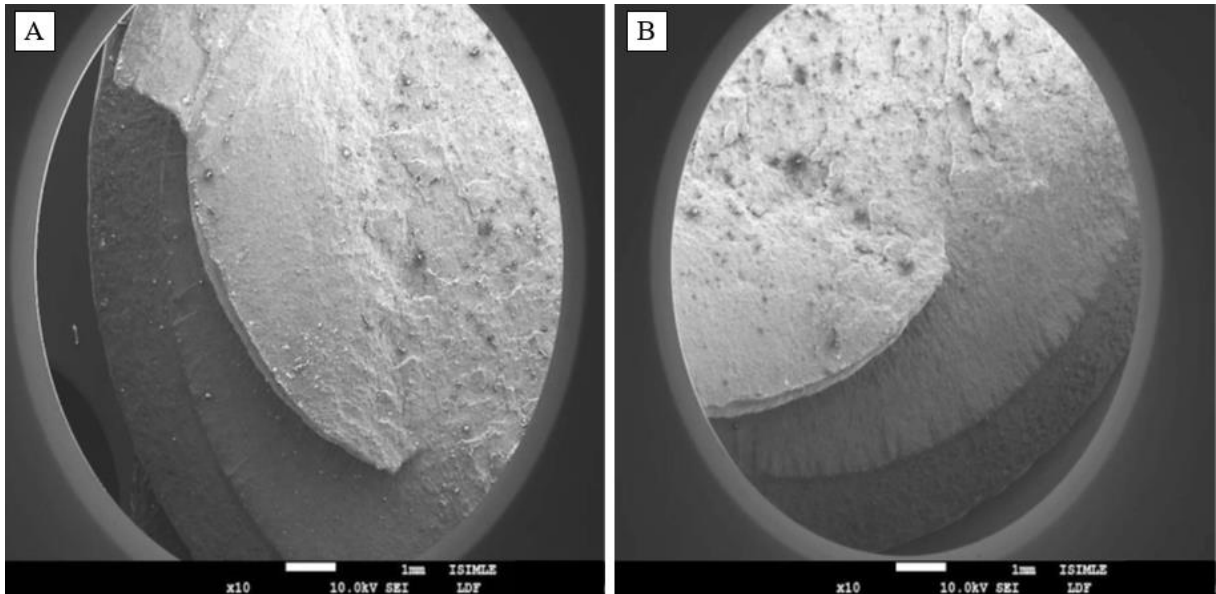
Figura 17 – A - Fotografia do parafuso R2; B - detalhes em lupa da região de propagação estável de trinca, superfície lisa e brilhante.



Fonte: Próprios autores (2023).

É possível observar a propagação estável de trinca, que caracteriza o modo de falha por fadiga.

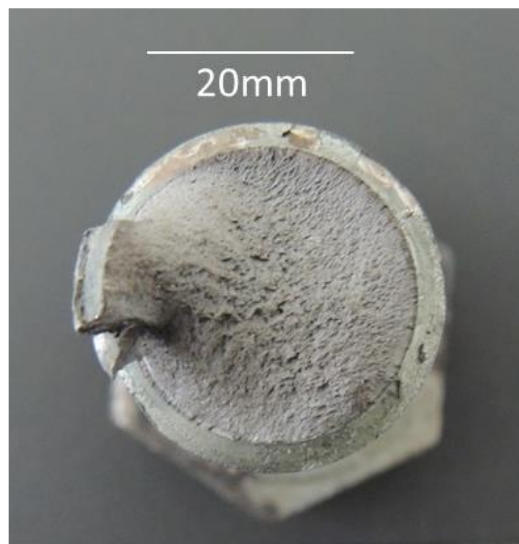
Figura 18 - Aspectos macrofractográficos da superfície de fratura do parafuso R2 com detalhes das regiões de propagação estável de trinca, 10X, MEV.



Fonte: Próprios autores (2023).

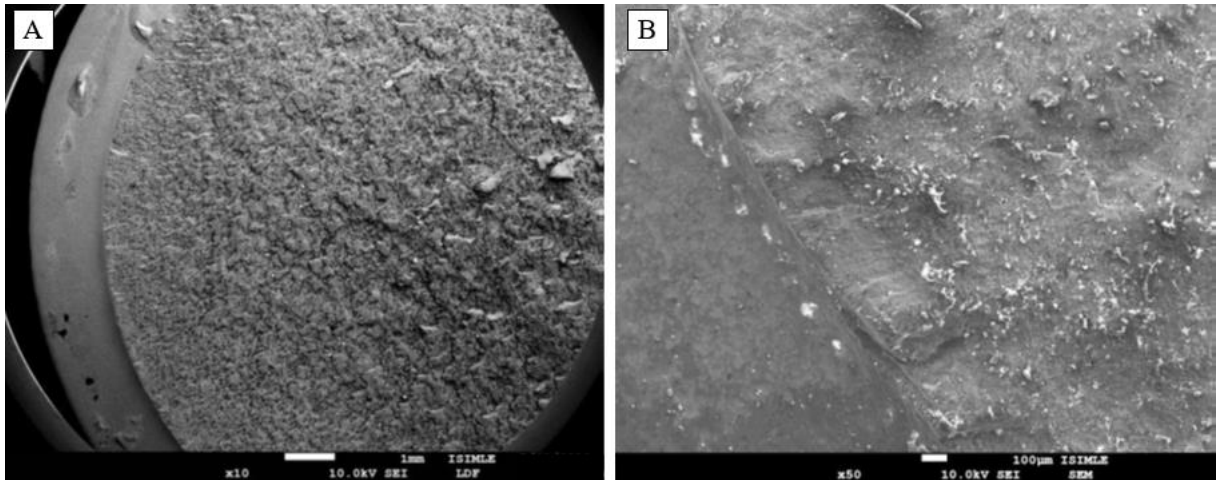
As Figuras 19 e 20 apresentam os detalhes da superfície do parafuso F1.

Figura 19 - Fotografia do parafuso F1.



Fonte: Próprios autores (2023).

Figura 20 - Aspectos macrofractográficos da superfície de fratura do parafuso F1 com detalhes das marcas radiais, 10X, MEV.

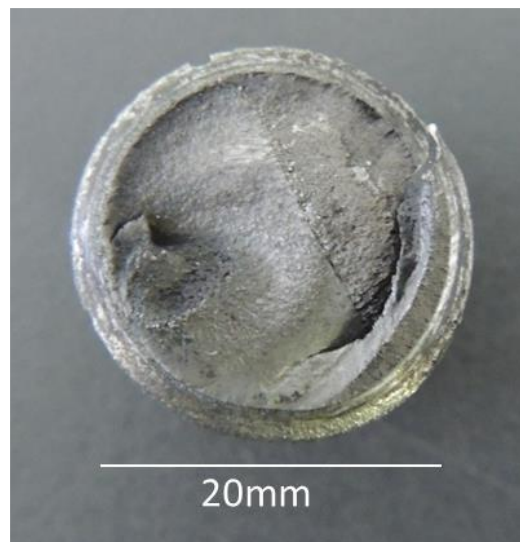


Fonte: Próprios autores (2023).

4.3.4 Parafuso V1

O parafuso V1 apresentou em sua superfície de fratura características de um processo inicial de degradação pelo trincamento estável por fadiga seguido de arrancamento final causado por um esforço de torção. A Figura 21 apresenta o aspecto geral da superfície fraturada, onde se percebe presença de trincas ao longo do filete de rosca.

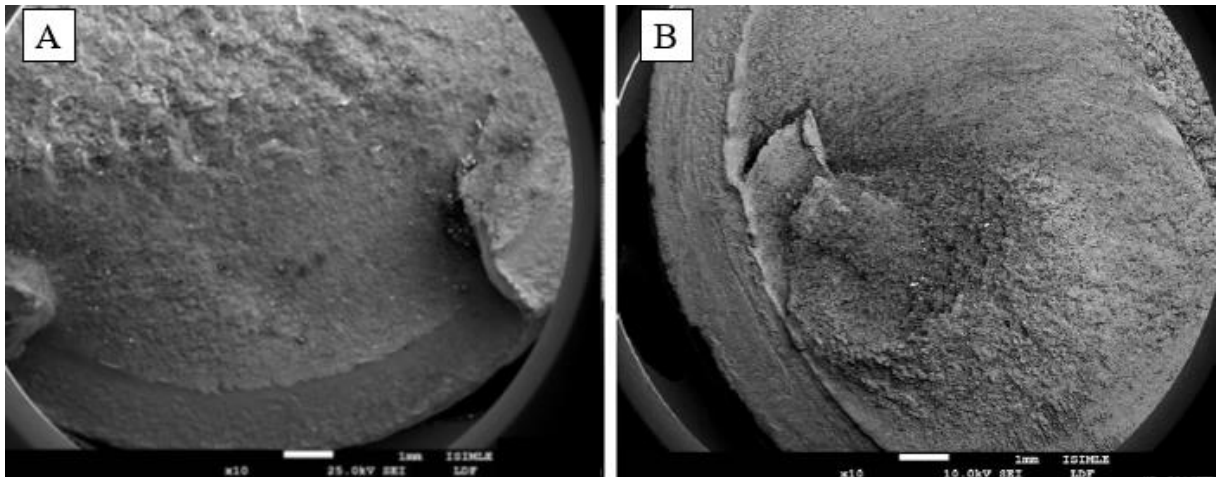
Figura 21 - Fotografia do parafuso V1.



Fonte: Próprios autores (2023).

Observa-se uma região com limite muito bem definido de crescimento estável de trinca por fadiga e outra região com marcas orientadas na forma de uma espiral, indicando o arrancamento final por torção, como é possível observar de forma mais clara na Figura 22.

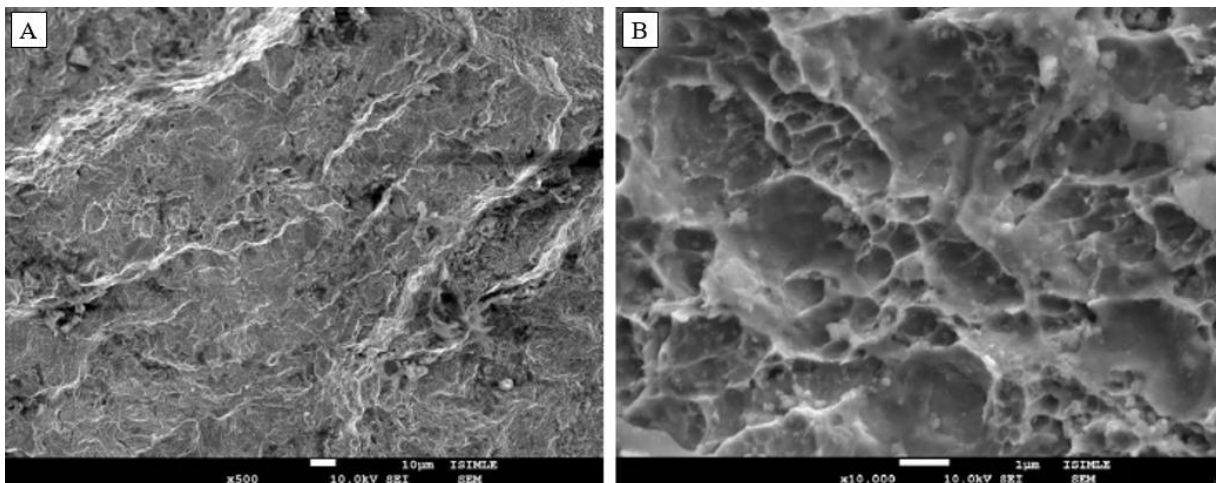
Figura 22 - Aspectos macrofractográficos da superfície de fratura do parafuso V1, 10X, MEV



Fonte: Próprios autores (2023).

A microfractografia desse parafuso, apresentada na Figura 23 mostra presença de estrias na região de propagação de trincas e de *dimples* cisalhados na região de arrancamento final. Supõe-se que esse parafuso tenha passado por um processo de “aperto” após já apresentar degradação por fadiga. Este evento de “aperto” provavelmente foi a causa da ruptura final.

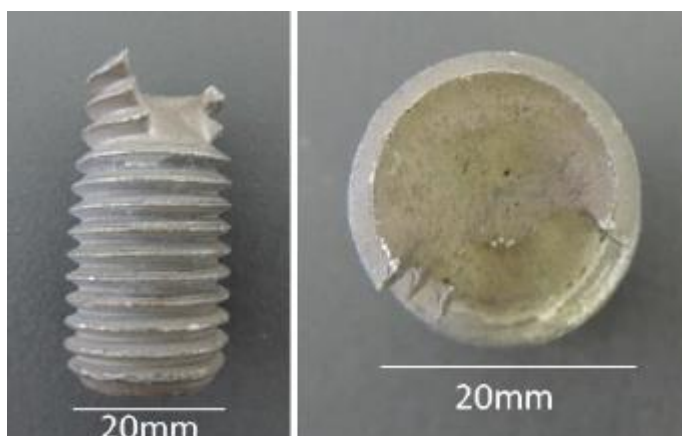
Figura 23 - Aspectos microfractográficos da superfície de fratura do parafuso V1 mostrando (a) estrias de fadiga, 500X e (b) *dimples* cisalhados, 10000X, MEV.



Fonte: Próprios autores (2023).

4.3.5 Parafuso P4

Por fim, o parafuso P4 apresenta claramente mecanismo de falha por tração. Observa-se na Figura 24 que houve intensa deformação plástica na região da rosca do parafuso, com redução do diâmetro do mesmo e um aumento na distância entre os filetes de rosca na parte superior, próxima à região da fratura. Este tipo de fratura é característico de sobrecarga no componente muito provavelmente devido à redução no número de parafusos sustentando a estrutura que se colapsaram por fadiga.

Figura 24 - Fotografias do parafuso P4.

Fonte: Próprios autores (2023).

4.3.6 Análise geral

Os resultados das análises realizadas nos sete parafusos mostraram que em um primeiro estágio, ocorreu comprometimento da integridade estrutural do sistema devido à nucleação e crescimento de trincas por fadiga em dois parafusos (V2 e V3), onde esse fenômeno aconteceu de forma mais pronunciada, gerando regiões de propagação de trinca com maiores dimensões, indicando que as trincas cresceram até o limite do material ser atingido.

Para evolução deste processo, ocorreu deslocamento cíclico devido às cargas flutuantes na região de fratura. Este deslocamento cíclico possivelmente tem sua origem na fixação inadequada dos componentes, permitindo certo grau de liberdade para movimentação das peças umas em relação às outras. Este fato pode ter origem no aperto inadequado dos parafusos de fixação ou no fato destes não possuírem resistência suficiente para suportar os esforços. Adicionalmente, pode ter ocorrido o afrouxamento dos parafusos com o uso normal da estrutura. Nestas condições verifica-se a evolução de trincas por fadiga até que a seção remanescente dos parafusos não suporta mais o carregamento e estes entram em colapso.

Os demais parafusos (R1, R2 e P4) também apresentaram evidências de degradação pelo trincamento por fadiga, como indicado pela presença de micromecanismos de fadiga na superfície fraturadas dos mesmos, seguido da ruptura final quando a seção remanescente, continuamente reduzida, não suportou as cargas de trabalho. Quando isso ocorre, normalmente um parafuso se quebra sobrecarregando os demais e acelerando o colapso final. Neste sentido, entende-se que a ruptura dos parafusos V2 e V3 acelerou o processo de ruptura dos parafusos R1, R2 e P4 uma vez que estes foram sobrecarregados numa condição que já apresentava certo grau de degradação por fadiga. Por fim, o parafuso remanescente (P4) sofreu falha por tração devido à sobrecarga resultante da falha dos demais parafusos, e V1, isoladamente, pelo processo de “aperto”.

As análises indicam que o principal motivo para explicar a ocorrência do evento de falha da estação de sopro pode ser proveniente de uma falha de projeto no que diz respeito à especificação dos parafusos e esses ficaram subdimensionados. Visando evitar novas ocorrências de falha, sugere-se a revisão do projeto com vistas em substituir os parafusos por outros de classes mais resistentes. Considerando que a resistência à tração mínima dos parafusos ASTM A325, Tipo 1 é de 827 N/mm² e que as evidências relatadas neste documento indicam que este nível de resistência dos parafusos é insuficiente para as condições de trabalho do equipamento, sugere-se a utilização de parafusos ASTM A490 cuja resistência a tração é

estabelecida por uma faixa (entre 1035 e 1173 N/mm²) assim como a dureza (faixa estreita, entre 33 e 38 HRC), o que permite maior previsibilidade de comportamento. Além disso, esta faixa de resistência é superior à resistência dos parafusos ASTM A325 (VALENCIANI, 1997).

Além da adequação da especificação do material dos parafusos, recomenda-se considerar um plano de manutenção preventiva que inclua inspeção dos parafusos. Também é necessário padronizar o torque aplicado no aperto dos parafusos para garantia de fixação das vigas, evitando liberdade de movimento e/ou torque excessivo.

Além disso, é importante observar que a montagem deve seguir as instruções comumente utilizadas em boas práticas de montagem de estruturas: os elementos de máquina de fixação, porcas, arruelas, devem ser bem lubrificados; a arruela deve ser usada nas faces da porca e nas dos parafusos, as arruelas devem ter o diâmetro mínimo de 1,5 vezes o diâmetro do parafuso e para os parafusos ASTM A490 e A325 deve-se usar porcas ASTM A563 e arruelas ASTM F436. Ademais, deve ser realizada uma análise de estruturas e forças a fim de se verificar o correto dimensionamento dos elementos de fixação (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo analisar a causa da falha ocorrida na estação geral de sopro e propor melhorias para evitar ocorrências semelhantes no futuro. Neste contexto, foram realizadas análises químicas por espectrometria de emissão ótica, ensaio de dureza Rockwell C, bem como análises fractográficas, com o intuito de compreender os mecanismos de fratura e identificar os fatores que levaram à falha estrutural do sistema.

O evento de falha se iniciou com o gradual comprometimento da integridade estrutural do sistema devido à nucleação e crescimento de trincas por fadiga, inicialmente, nos parafusos V2 e V3. Estes parafusos falharam quando as trincas por fadiga atingiram tamanho crítico e, posteriormente, os parafusos remanescentes (R1, R2, F1 e P4) sofreram falha devido à sobrecarga resultante e a presença de trincas de fadiga. Esses eventos estão relacionados ao fato de os parafusos não possuírem resistência mecânica, principalmente à fadiga, suficiente para suportar os esforços impostos pela operação do sistema, adicionalmente, ao fato de ocorrer afrouxamento dos parafusos com o uso normal da estrutura.

Considerando o exposto, sugere-se a revisão do projeto com vistas em substituir os parafusos por outros, de classes mais resistentes, bem como considerar um plano de manutenção preventiva incluindo de inspeção dos parafusos e padronização do torque, após a realização dos cálculos específicos para as estruturas que compõem a estação de sopro, de forma a garantir a fixação das vigas evitando liberdade de movimento e/ou torque excessivo.

Além da substituição dos parafusos, é fundamental implementar um plano de manutenção preventiva, incluindo inspeções regulares dos parafusos e padronização do torque de aperto. Essas medidas visam garantir uma fixação adequada das vigas, evitando movimentos indesejados e torque excessivo.

Ao concluir, destaca-se que a análise detalhada realizada permitiu compreender as causas da falha que levou ao tombamento da estação de sopro. Com base nesses resultados, propuseram-se melhorias no processo de utilização, a fim de evitar falhas semelhantes no futuro. A revisão do projeto, a substituição dos parafusos por versões mais resistentes e a implementação de um plano de manutenção preventiva são medidas essenciais para garantir a integridade estrutural e a segurança do sistema.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. L. A. *et al.* Níquel - Novos Parâmetros de Desenvolvimento. **Área de Operações Industriais**, [s. l.], p. 1–33, 2000.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- BUDYNAS, R.; NISBETT, K. Shigley's Mechanical Engineering Design. **McGraw Hill Inc.**, [s. l.], 2009.
- CHEN, S. *et al.* Microstructural characteristics of a stainless steel/copper dissimilar joint made by laser welding. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, [s. l.], v. 44, n. 8, 2013.
- CRUNDWELL, F. *et al.* **Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals**. [S. l.]: Elsevier, 2011. *E-book*. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20090635418>.
- CUNAT, P. Alloying elements in stainless steel and other chromium-containing alloys. **International Chromium Development Association**, [s. l.], 2004.
- DOWLING, N. E. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. [s. l.], p. 936, 2013. Disponível em: Acesso em: 26 jun. 2023.
- FLOWER, H. M. Light alloys: metallurgy of the light metals. **International Materials Reviews**, [s. l.], v. 37, n. 1, 2012.
- GASIK, M. **Handbook of Ferroalloys**. [S. l.]: Elsevier, 2013. *E-book*. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20110042047>.
- KOVAČEVIĆ, Z.; KARASTOJKOVIĆ, Z.; ALEKSIĆ, V. Non-destructive metallography and replica method for inspection connecting rod material and cracks detection. **Production Engineering Archives**, [s. l.], v. 1/1, 2013.
- KWON, D. W.; PARK, K. H.; HONG, S. C. Enhancement of SCR activity and SO₂ resistance on VO_x/TiO₂ catalyst by addition of molybdenum. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 284, p. 315–324, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894715012528>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- LAI, C. *et al.* Effects of quenching and tempering heat treatment on microstructure, mechanical properties, and fatigue crack growth behavior of 51CrV4 spring steel. **Materials Research Express**, [s. l.], v. 8, n. 9, 2021.
- MARINHO, F. **GE Renewable Energy fatura contrato de operação e manutenção da Usina Hidrelétrica de Igarapava de 210 MW de capacidade instalada, o suficiente para fornecer eletricidade para 225.000 pessoas**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/ge-renewable-energy-fatura-contrato-de-operacao-e-manutencao-da-usina-hidreletrica-de-igarapava-de-210-mw-de-capacidade-instalada-o-suficiente-para-fornecer-eletricidade-para-225000-pessoas/>. Acesso em: 22 nov. 2022.

MEADOWCROFT, T. R. Fundamentals of steelmaking. **International Materials Reviews**, [s. l.], v. 41, n. 4, 2012.

NOVAIS, S. A. **Níquel: propriedades, aplicações, precauções**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/niquel.htm>. Acesso em: 5 out. 2022.

POPSCREEN. **Hardness Testing Machine INSTRON Testor 930/250 WOLPERT**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.popscreen.com/prod/MTA0NzE5NDUy/hardness-testing-machine-INSTRON-Testor-930250-WOLPERT-eBay>. Acesso em: 5 dez. 2022.

REDL, C. *et al.* Refining of ferronickel. **Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry**, [s. l.], 2020.

ROMERO, J. M. *et al.* Improving the rotary kiln-electric furnace process for ferronickel production: Data analytics-based assessment of dust insufflation into the rotary kiln flame. **Alexandria Engineering Journal**, [s. l.], v. 61, n. 4, 2022.

SARBISHEI, S.; TAFAGHODI KHAJAVI, L. The effect of sulfur content of rotary kiln fuel on the composition of nickel laterite calcine. **Fuel**, [s. l.], v. 280, 2020.

VALENCIANI, V. C. **Ligações em Estruturas de Aço**. 1997. Dissertação (Mestrado) - USP, São Carlos, 1997.

YUCEL, O.; TURAN, A.; YILDIRIM, H. Investigation of Pyrometallurgical Nickel Pig Iron (NPI) Production Process from Lateritic Nickel Ores. *Em*: 3RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH-TEMPERATURE METALLURGICAL PROCESSING. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. p. 17–23. *E-book*. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118364987.ch3>.

ZHANG, J. *et al.* Separation and recovery of iron and nickel from low-grade laterite nickel ore by microwave carbothermic reduction roasting. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 12223–12235, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785420316434>.