



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

MÁRIO JOSÉ MAIA LEITÃO

**ANÁLISE DE FALHA EM REDUTORES DE ROSCA SEM-FIM: ESTUDO DE CASO
EM UMA COROA DE BRONZE.**

FORTALEZA
2023

MÁRIO JOSÉ MAIA LEITÃO

ANÁLISE DE FALHA EM REDUTORES DE ROSCA SEM-FIM: ESTUDO DE CASO
EM UMA COROA DE BRONZE.

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L549a Leitão, Mário José Maia.

Análise de falha em redutores de rosca sem-fim: estudo de caso em uma coroa de bronze / Mário José Maia Leitão. – 2023.

62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta.

1. Análise de Falha. 2. Engrenagens. 3. UNS 90700. I. Título.

CDD 669

MÁRIO JOSÉ MAIA LEITÃO

ANÁLISE DE FALHA EM REDUTORES DE ROSCA SEM-FIM: ESTUDO DE CASO
EM UMA COROA DE BRONZE.

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta

Aprovada em: 14/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Willys Machado Aguiar
Professor Convidado

Prof. Me. George da Silva Matos
Professor Convidado

À Deus.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre priorizar meus estudos e incentivar meu desenvolvimento da melhor forma possível, principalmente minha mãe.

Ao Professor Willys pelas incontáveis horas discutindo temas diversos da engenharia.

À minha amiga e sócia Rafaella.

Ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS), por ter me recebido durante alguns anos, e principalmente, ao professor Dr. Hélio Miranda por proporcionar inúmeras oportunidades de aprendizagem.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”. (**Albert Einstein**).”

RESUMO

Falhas em máquinas e equipamentos podem causar graves interrupções nos cronogramas de trabalho, prejudicando os resultados das empresas, diminuindo a qualidade do produto entregue ao mercado e aumentando os riscos à segurança dos operadores. A correta manutenção e avaliação de redutores de velocidade pode reduzir as interrupções da operação e consequente custo de reparo ou substituição de engrenagens. As coroas de bronze são normalmente usadas para aplicações em engrenagens internas de redutores e de dispositivos variadores de velocidade, devido ao seu menor coeficiente de atrito e boas propriedades de desgaste e fadiga. Este estudo teve como objetivo avaliar a falha de uma coroa de bronze utilizada no redutor de velocidade de uma talha elétrica. A análise revelou que 100% dos dentes da coroa de bronze foram quebrados em operação, gerando uma falha catastrófica do equipamento. Para investigar as possíveis causas da falha, foram empregadas as técnicas de análise visual, composição química por espectrometria de raios-x, medições de dureza Brinell, metalografia e fractografia. As análises demonstraram que o material possuía quantidades de chumbo fora da faixa permitida para a fabricação da peça, além de vazios de fundição e glóbulos de chumbo presentes ao longo dos limites interfaciais. Verificou-se que os glóbulos de chumbo apresentavam dureza significativamente menor em comparação com a matriz e a precipitação ao longo dos limites interdendríticos tornavam a liga suscetível à fratura interdendríticas. Concluiu-se que todos esses fatores contribuíram sinergicamente para a falha da coroa. Para prevenção de falhas como a abordada neste trabalho, recomenda-se garantir o processamento da coroa de forma adequada para obter a uniformidade da microestrutura, forma e composição do bronze e realizar um plano de manutenção efetivo com inspeções periódicas a fim de detectar anormalidades com antecedência e evitar perdas materiais, perdas de produtividade por inatividade dos equipamentos e vidas.

Palavras-chave: UNS C90700; Análise de Falha; Engrenagens.

ABSTRACT

Failures in machinery and equipment can cause serious disruptions to work schedules, impacting company outcomes, reducing product quality delivered to the market, and increasing risks to operator safety. Proper maintenance and evaluation of speed reducers can reduce operation interruptions and the consequent cost of gear repair or replacement. Bronze gears are commonly used for internal gear applications in reducers and variable speed devices due to their lower coefficient of friction and good wear and fatigue properties. This study aimed to assess the failure of a bronze gear used in the speed reducer of an electric hoist. The analysis revealed that 100% of the teeth on the bronze gear were broken during operation, resulting in catastrophic equipment failure. To investigate the possible causes of the failure, visual analysis techniques, chemical composition analysis using X-ray spectrometry, Brinell hardness measurements, metallography, and fractography were employed. The analyses showed that the material had lead quantities outside the allowable range for manufacturing the part, as well as casting voids and lead globule along grain boundaries. It was found that the lead globule exhibited significantly lower hardness compared to the matrix, and precipitation along inter-dendritic boundaries made the alloy susceptible to intergranular fracture. It was concluded that all these factors synergistically contributed to the gear failure. To prevent failures like the one addressed in this study, it is recommended to ensure proper processing of the gear to obtain uniformity in microstructure, geometry, and bronze composition, and to implement an effective maintenance plan with periodic inspections to detect abnormalities in advance and prevent material losses, equipment downtime, productivity losses, and potential hazards.

Keywords: UNS C90700, Failure Analysis, Gear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nomenclatura padrão de engrenagens.....	21
Figura 2 – Sem-fim e engrenagem sem-fim.....	21
Figura 3 – Terminologia: Par coroa e parafuso sem-fim.....	23
Figura 4 – Tipos de Envolvimento.....	24
Figura 5 - Perfil dos dentes de uma coroa sem-fim.....	25
Figura 6 – Redutor de Velocidade.....	27
Figura 7 – Diagrama de Fase Cu-Sn.....	32
Figura 8 – Microestrutura típica da liga de Bronze UNSC90700.....	33
Figura 9 – Talha elétrica.....	41
Figura 10 – Coroa de bronze.....	42
Figura 11 – Estereomicroscópio Zeiss Discovery V10.....	43
Figura 12 – Microscópio Zeiss Observer. Z1m AX10.....	44
Figura 13 – Microscópio Eletrônico de Varredura QUANTA 250 FEI.....	44
Figura 14 – Durômetro Zwick Roell Indentec ZHU250CL.....	45
Figura 15 – Analisador de composição Thermo Scientific NITON XI3t.....	45
Figura 16 – Detalhes analisados na coroa que falhou.....	47
Figura 17 – Porosidades no corpo da coroa.....	48
Figura 18 – Porosidade entre os dentes da coroa.....	49
Figura 19 – Porosidades na área do dente.....	49
Figura 20 – Poros no interior da área de fratura.....	50
Figura 21 – Presença de Vazios.....	51
Figura 22 – Vazios presentes no interior da coroa de bronze.....	52
Figura 23 – Trincas no corpo da engrenagem.....	53
Figura 24 – Deformação plástica visível na extremidade do dente.....	54
Figura 25 – Microestrutura dendrítica do metal fundido.....	55
Figura 26 – Microestrutura da coroa de bronze com presença de fase eutetóide.....	56
Figura 27 – As áreas pretas nessas micrografias são cavidades de contração e/ou partículas de chumbo.....	56
Figura 28 – Vazios observados na microestrutura próxima ao local da fratura do dente.....	57
Figura 29 – Trincas próximas à superfície da peça.....	58
Figura 30 – Ampliação do detalhe da trinca próxima a superfície.....	58
Figura 31 – Inclusões de Chumbo identificadas na microestrutura da coroa.....	59

Figura 32 – Análise de EDS realizada em amostra retirada da coroa60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferentes tipos de engrenagem.	19
Quadro 2 - Eficiência das engrenagens.	20
Quadro 3 - Principais Causas de Falha.....	36
Quadro 4 - Nomenclatura de falha de engrenagem recomendada pela AGMA.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ligas de Cobre	30
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas e Composição Química.	32
Tabela 3 - Análise química da liga bronze (% em massa).	46
Tabela 4 – Valores de dureza obtidos	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1.	Justificativa	16
2.	OBJETIVOS GERAIS	17
2.1.	Objetivo específico	17
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1.	Redutores de velocidade e engrenagens	18
3.1.1.	Engrenagens	18
3.1.2.	Redutores de velocidade	26
3.2.	Cobre e suas ligas	28
3.3.	Bronze UNS C90700	30
3.4.	Análise de falha	34
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1.	Análise química	46
4.2.	Inspeção visual	46
4.3.	Análise de dureza Brinell	55
4.4.	A microestrutura da coroa de bronze.....	55
5.	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

As engrenagens são amplamente utilizadas, desde o motor de um carro até as sondas de petróleo em alto mar, sua função e confiabilidade são parte integrante da vida das pessoas. Esse tipo de componente mecânico evoluiu rapidamente quando do início da revolução industrial e, desde então, têm sido constantemente pesquisadas em termos de materiais, eficiência, tolerâncias e desgaste. (RADZEVICH, 2016).

Devido às forças de trabalho, pressões de contato e sinergia com outros componentes mecânicos, as engrenagens podem apresentar falhas de muitas maneiras diferentes e geralmente não há indicação de defeitos até que ocorra uma falha total do equipamento ou máquina, exceto por um aumento no nível de ruído e vibração.

Em geral, cada tipo de falha fornece características nos dentes da engrenagem ou no corpo e o exame detalhado, geralmente, estabelece a causa da falha. Os tipos gerais de modos de falha incluem fadiga, fratura por impacto, desgaste e fratura por tensão. O desgaste é um tipo de falha muito comum em engrenagens e várias causas de falha por desgaste foram identificadas na literatura. Estas incluem o projeto inadequado do conjunto de engrenagens, montagem incorreta ou desalinhamento, sobrecarga, defeitos subsuperficiais em áreas críticas e o uso de materiais e/ou tratamentos térmicos incorretos. (DAVIS, 2005).

A análise de falhas é um procedimento sistemático que tem como objetivo identificar, analisar e determinar as causas de uma falha. Esse processo abrange falhas em componentes, montagens e estruturas. Embora haja várias abordagens para conduzir uma análise de falhas, a escolha da metodologia depende do conhecimento sobre o material e equipamento em questão, bem como dos tipos de esforços aos quais estão submetidos. (ALBAN, 1985).

Considerando os muitos fatores envolvidos, o material da engrenagem, o projeto, o modo de fabricação e vida útil, a capacidade de avaliar adequadamente uma falha da engrenagem é uma ferramenta valiosa para identificar a causa raiz do problema. Sendo assim, torna-se mais fácil implementar ações preventivas ou

predictivas para evitar falhas precoces ou prolongar a vida útil da engrenagem em sistemas, evitando acidentes e paradas não programadas para manutenção.

A utilização de técnicas de diagnóstico como termografia, análise do óleo, análise de desgaste do metal das engrenagens e análise da vibração do equipamento permitem a detecção de variações do processo e o reconhecimento precoce de problemas presentes nas engrenagens. Porém, quando uma peça falha, uma análise sistêmica é o procedimento necessário na determinação de uma causa raiz e influência no processo de manutenção preventiva bem como na previsão da vida útil do equipamento. (ALBAN, 1985).

Portanto, sob a ótica da análise de falhas, o presente estudo teve como objetivo realizar uma análise sistemática da falha de uma Coroa de Bronze de uma caixa redutora de velocidade pertencente a uma indústria cearense. A análise do componente fraturado foi apoiada por exames fractográficos; metalografia utilizando técnicas de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (EDS/SEM), além de espectrometria de emissão óptica e ensaios de dureza.

1.1. Justificativa

Em julho de 2022, uma Coroa de Bronze pertencente a um redutor de velocidade de uma indústria cearense apresentou uma falha catastrófica durante seu funcionamento. A vida útil de projeto desse tipo de engrenagem é de aproximadamente 10 anos, contudo, a falha da coroa ocorreu em pouco mais de um ano de utilização do redutor.

Embora os motivos da falha possam ser atribuídos a uma ou mais causas, tais como seleção de material, propriedade mecânica, processo de fabricação, modo operacional, ambiente de serviço etc., o fator principal deve ser confirmado para evitar novas falhas em operação.

2. OBJETIVOS GERAIS

Apontar as causas da falha de uma coroa de bronze pertencente a uma talha elétrica, bem como as medidas necessárias para monitorar e evitar que ocorram novamente.

2.1. Objetivo específico

- Analisar a superfície da fratura para determinação das características e os mecanismos de falha;
- Avaliar a dureza do material e verificar a conformidade com a norma;
- Determinar a composição química e verificar a conformidade com a norma;
- Caracterizar a microestrutura da liga por meio da microscopia ótica e eletrônica de varredura (MO e MEV/EDS);
- Determinar os fatores e causas que levaram ao colapso da coroa da caixa de redução de velocidade;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo fornecer uma revisão abrangente da literatura, abordando diferentes tópicos relacionados aos redutores de velocidade, engrenagens, análise de falhas em engrenagens e uma análise detalhada do cobre e suas ligas com uma atenção maior a liga de bronze UNS C90700. Essa revisão da literatura é essencial para embasar e fundamentar a pesquisa, permitindo a compreensão aprofundada dos conceitos, técnicas e aplicações relacionadas a esses tópicos.

3.1. Redutores de velocidade e engrenagens

Os redutores de velocidade e as engrenagens desempenham um papel fundamental na transmissão de energia em uma ampla gama de aplicações, desde máquinas industriais simples até veículos.

Esta seção se propõe a explorar, os princípios teóricos sobre engrenagens e redutores de velocidade.

3.1.1. Engrenagens

As engrenagens são utilizadas na maioria dos tipos de máquinas. Como as porcas e parafusos, elas são um elemento de máquina comum e que são utilizadas por quase todos os projetistas por suas características e funcionalidades. (RADZEVICH, 2016).

As engrenagens estão em uso há mais de três mil anos e são elementos importantes em muitos tipos de máquinas modernas. As áreas de aplicação das engrenagens incluem sistemas de acionamento mecânico, bombas, motores, compressores e redutores de velocidade. (DAVIS, 2005). Estas podem variar em tamanho desde engrenagens de tamanho micrométrico para motores elétricos pequenos como relógios até engrenagens com mais de 30m de diâmetro. As engrenagens podem ser fabricadas a partir de uma diversidade de materiais, incluindo diversas ligas de aço, latão, bronze, ferro fundido, alumínio, compósitos e

plásticos. O resultado é uma ampla seleção de engrenagens para praticamente qualquer aplicação (DAVIS, 2005).

O objetivo do projeto de uma máquina é fornecer a melhor disposição das engrenagens com a melhor posição de um eixo com base em sua construção e velocidade. Segundo Stipkovic Filho (2017) com relação ao posicionamento de seus eixos, as engrenagens podem ser divididas da seguinte forma:

- Engrenagens com eixos paralelos;
- Engrenagens com eixos que se cortam;
- Engrenagens com eixos que se cruzam.

Cada tipo de engrenagem, naturalmente, atenderá a certas faixas de potência, velocidades e relações de multiplicação e, assim, proporcionará um melhor desempenho do sistema.

A *American Gear Manufacturers Association* (AGMA) apresenta normas e padrões referentes aos processos de fabricação e manutenção dos muitos tipos de engrenagens utilizados na indústria. O Quadro 1, combina os diferentes tipos de engrenagens com suas possíveis disposições construtivas (posicionamento dos eixos).

Quadro 1 - Diferentes tipos de engrenagem.

	DESIGNAÇÃO	POSIÇÃO DO EIXO
Engrenagens Cilíndricas	Dentes retos	Paralelos
	Dentes Inclinação (Helicoidal)	Paralelos
	Cremalheira	Paralelos
	Engrenagens hidráulicas dentes helicoidais	Cruzados
Engrenagens Cônicas	Dentes retos	Cortam-se
	Dentes inclinados	Cortam-se
	Dentes espirais	Cortam-se
	Dentes hipodais	Reverso ou com deslocamento
Engrenagem coroa sem fim		Cruzados

Fonte: Adaptado de (STIPKOVIC FILHO, 2017).

Engrenagens retas ou helicoidais têm alta eficiência, acima de 90%, enquanto engrenagens hipóides ou sem-fim possuem relativamente baixa eficiência. O Quadro 2 mostra a eficiência esperada para cada tipo de engrenagem (MACHADO, 2018).

Quadro 2 - Eficiência das engrenagens.

Tipo de engrenagem		Eficiência sobre carga nominal %
Dente reto	Simplest estágio	> 98,5
	Duplo estágio	> 97,0
	Triplo estágio	> 95,5
	Quádruplo estágio	> 94,0
Cônicas		> 98,0
Cônicas retas	Simplest estágio	> 96,5
	Triplo estágio	> 95,0
	Quádruplo estágio	> 93,5
Planetárias		> 97,0
Helicoidais cruzadas		50 ~ 98,5
Hipóides	Alta redução	50 ~ 90
	Baixa redução	85 ~ 96

FONTE: Retirado de (MACHADO, 2018)

A relação entre as velocidades angulares deve, necessariamente, ser constante em toda a rotação e define a lei fundamental da engrenagem. A razão da velocidade angular m_V é igual à razão do raio de referência (primitivo) da engrenagem de entrada para aquela da engrenagem de saída (NORTON, 2013).

$$m_V = \frac{\omega_{ext}}{\omega_{int}} = \pm \frac{r_{int}}{r_{ext}} \quad \text{Equação 1}$$

A Equação 1 apresentada anteriormente é definida em função das frequências de rotação das engrenagens externa (ω_{ext}) e interna (ω_{int}), e os raios primitivos das engrenagens externas (r_{ext}) e internas (r_{int}) e a razão do trem, respectivamente (NORTON, 2013).

Norton (2013) também define que a razão de torque ou o ganho mecânico m_A é o inverso da razão de velocidades m_V :

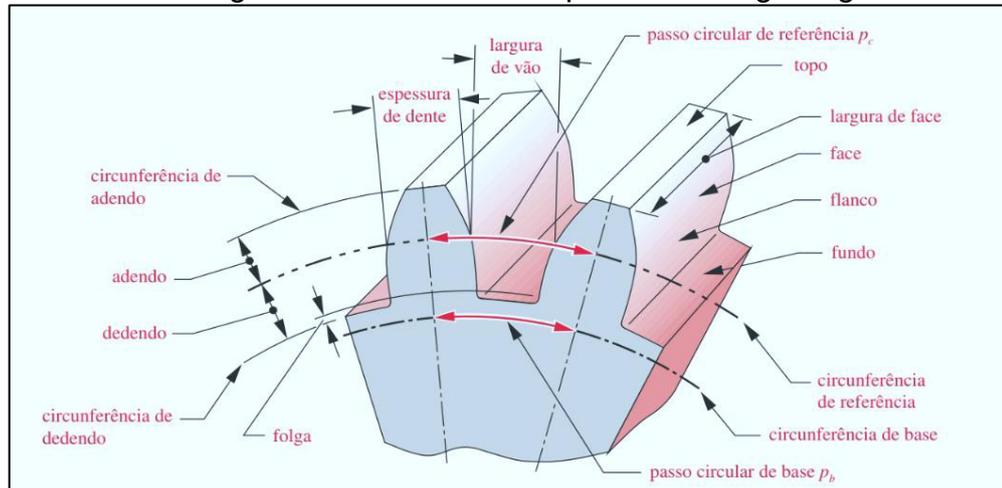
$$m_A = \frac{1}{m_V} = \frac{\omega_{int}}{\omega_{ext}} = \pm \frac{r_{ext}}{r_{int}} \quad \text{Equação 2}$$

Assim, um par de engrenagens é essencialmente um dispositivo de troca de torque por velocidade e vice-versa. Onde esse princípio é explorado por muitos tipos de equipamentos.

Portanto, a relação das velocidades angulares de duas engrenagens em contato é inversamente proporcional ao tamanho de seus respectivos círculos base.

A partir da Figura 1 define-se a nomenclatura padrão dos dentes de engrenagem.

Figura 1 – Nomenclatura padrão de engrenagens.



Fonte: Retirado de (NORTON, 2013)

Um engrenamento sem-fim consiste em um eixo sem-fim e uma engrenagem sem-fim, também conhecida como coroa, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Sem-fim e engrenagem sem-fim

engrenagem (coroa)
sem-fim



sem-fim

Fonte: Retirado de Norton (2013)

Para Almeida, Lima e Barbieri (2022), a coroa tem um perfil geométrico diferente de uma engrenagem helicoidal por possuir dentes curvos na região da roda, cuja finalidade é assentar melhor o sem-fim, o qual é igual a um parafuso de potência com rosca helicoidal, onde tem a capacidade de autotravamento.

Norton (2013) fala que a distância que um ponto na engrenagem acoplada move axialmente em uma revolução do sem-fim é chamada de avanço L . Outro ponto importante para o estudo das engrenagens sem-fim é o ângulo de avanço λ . A tangente do ângulo de avanço λ é definida como a razão entre o avanço L e comprimento da circunferencial de referência πd do sem-fim (NORTON, 2013), como mostrado na equação Equação 3.

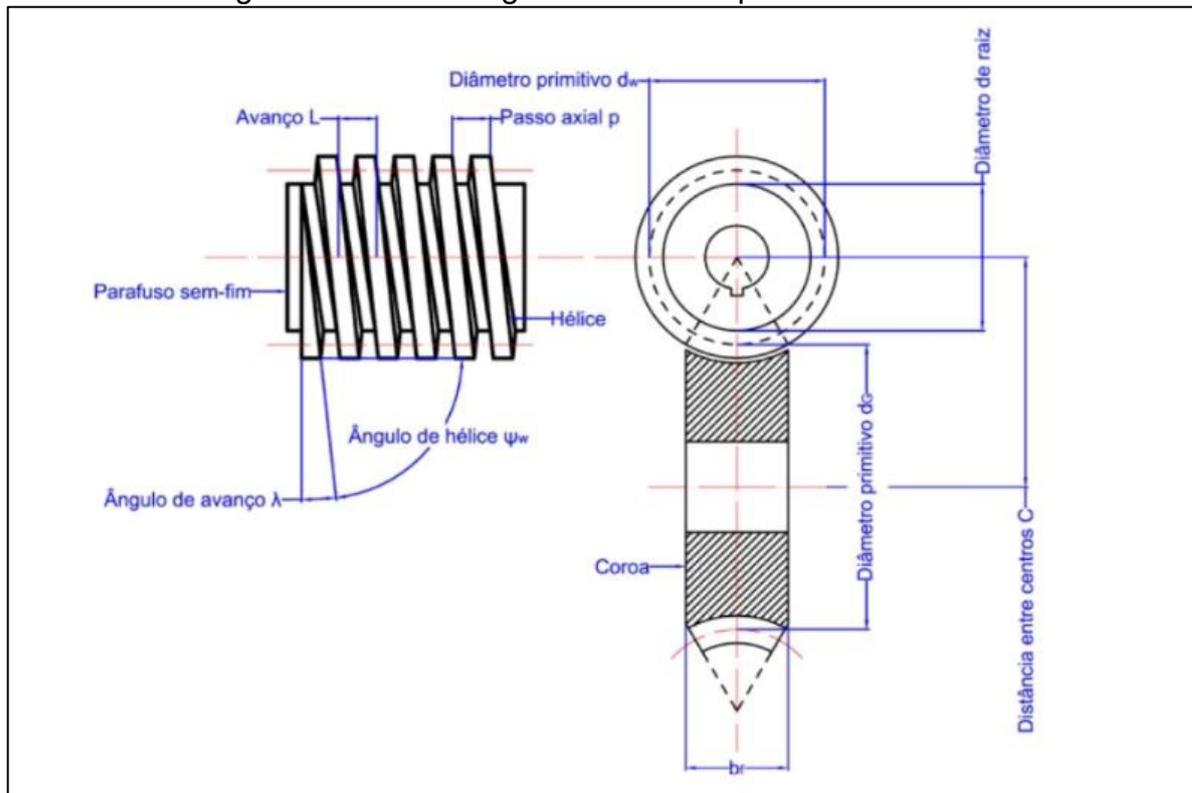
$$tg\lambda_{sem\ fim} = \frac{L}{\mu \cdot d} \quad \text{Equação 3}$$

Norton (2013) menciona que uma das grandes vantagens dos engrenamentos sem-fim sobre outros tipos de combinação de engrenagens é sua habilidade de autotravamento. Se a combinação de sem-fim for auto-travante, ele não retrocederá, isto é, o torque aplicado à engrenagem sem-fim (coroa) não rodará a o eixo sem-fim, conseqüentemente, poderá suportar carga como, por exemplo, em redutores de velocidade utilizados em guinchos e talhas elétricas. Outra razão para escolha desse tipo de engrenamento é por ser um dos mais silenciosos, livre de vibrações e produzirem velocidades de saída constante.

Almeida, Lima e Barbieri (2022) menciona em seu texto que um dos maiores problemas deste tipo de transmissão é o desgaste nos dentes da coroa em virtude do atrito desenvolvido durante movimentação do parafuso sem-fim, motivo pelo qual a coroa necessita de uma lubrificação eficiente e manutenção de acordo com as horas de trabalho. Outra observação feita pelo autor é que o sem-fim deve ser projetado adequadamente para que o contato seja suave, preservando os dentes da coroa, considerando que o desgaste natural da peça.

Conforme Almeida, Lima e Barbieri (2022), os diâmetros primitivos, o módulo, o passo axial, o número de dentes da coroa e a distância entre centros do conjunto engrenagem sem-fim são parâmetros essenciais de um conjunto engrenagem sem-fim. Esses parâmetros são mostrados na Figura 3.

Figura 3 – Terminologia: Par coroa e parafuso sem-fim.



Fonte: Retirado de (ALMEIDA; LIMA; BARBIERI, 2022)

Os sem-fins geralmente têm apenas uma entrada e, portanto, podem produzir relações de engrenagem tão altas quanto o número de dentes da coroa. Em comparação com outros conjuntos de engrenagens que são normalmente limitados a uma relação de transmissão de até 10:1, os conjuntos de engrenagens sem-fim e de roda podem atingir relações de transmissão de até 360:1, embora a maioria dos fabricantes cite faixas entre 3:1 e 100:1. (CHILDS, 2014)

A equação 4 mostra a relação de transmissão para um conjunto de engrenagens sem-fim é dada por:

$$m_G = \frac{N_G}{N_w} \quad \text{Equação 4}$$

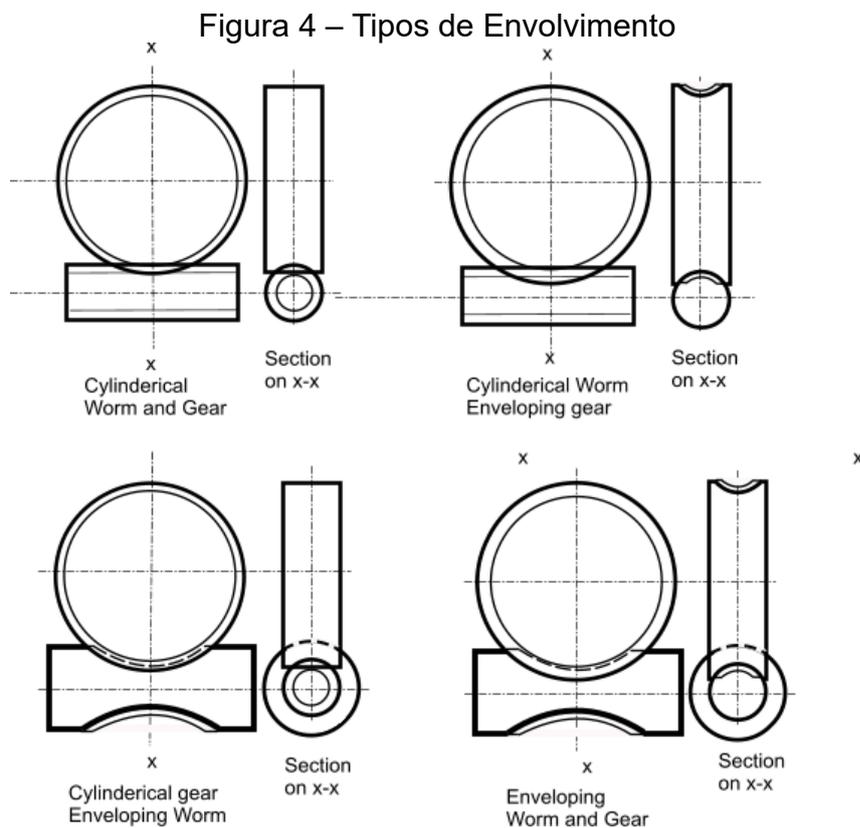
m_G = relação de transmissão;
 N_G = número de dentes da coroa;
 N_w = número de entradas no sem-fim.

A relação de transmissão determina a velocidade e a força transmitidas pelo sistema de transmissão e é um dos fatores importantes a serem considerados na escolha e projeto de engrenagens sem-fim.

Existem três tipos de conjuntos de engrenagens sem-fim, a diferença entre eles depende se os dentes de um ou de ambos se envolvem um no outro(CHILDS, 2014).

- Sem Envolvimento
- Envolvimento Simples
- Envolvimento Duplo

A Figura 4 mostra os possíveis tipos de configuração para engrenagens sem-fim.



Fonte: Retirado de (WORM GEARS, Disponível em:

http://steeljis.com/roymech/drive/worm_gears.php)

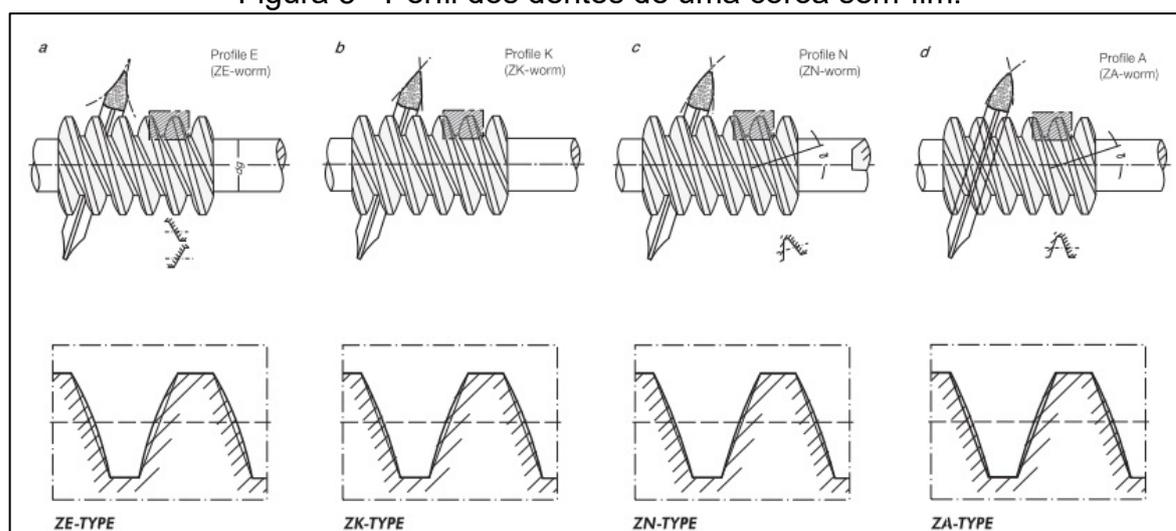
No entanto, as engrenagens sem-fim disponíveis comercialmente estão divididas em duas classes, pela forma externa do sem-fim, uma vez que as coroas comumente usadas são quase exclusivamente pelo sistema globoidal. As duas

classes são as engrenagens de envolvimento simples e engrenagens globoidal ou de envolvimento duplo.

O uso de um sem-fim globoidal estimula uma maior relação de contato e maior capacidade de carga, pois mais dentes estão engatados (CHILDS, 2014). O perfil de rosca de um sem-fim pode ser trapezoidal, involuta ou algum outro perfil, cada um mostrando vantagens e desvantagens em relação ao seu processo de fabricação e tipo de carregamento (OSAKUE; ANETOR, 2022).

A Figura 5 mostra os perfis de rosca sem-fim comuns são designados que são designados como ZA, ZN, ZK e ZE. A engrenagem do tipo ZA tem uma seção trapezoidal com lados retos no plano axial enquanto o ZN tem uma seção trapezoidal com lados retos no plano normal. A ZK tem perfil convexo no plano normal e côncavo na seção axial. A ZE tem um perfil envolvente na seção transversal como uma engrenagem helicoidal (OSAKUE; ANETOR, 2022).

Figura 5 - Perfil dos dentes de uma coroa sem-fim.



Fonte: Retirado de Chongqing Jiangxing Tools (<https://www.jiangxinggongju.com/en/News/50.html>)

Norton (2013) fala que a forma de engrenamento entre o sem-fim e a coroa consiste em uma combinação de rolamento e escorregamento. O contato do tipo escorregamento, domina quando são aplicadas altas taxas de redução. O efeito do escorregamento gera calor no sistema devido ao atrito, o que pode reduzir a eficiência do sistema sem-fim e aumentar o desgaste dos dentes.

Muitas vezes o sem-fim e a coroa podem ser fabricados com dois tipos diferentes de materiais para reduzir o atrito e, portanto, o calor. A combinação mais comum de materiais para conjuntos de engrenagens é um sem-fim de aço e uma

coroa de bronze. Um benefício para este tipo de união é um sistema onde temos baixo ruído do conjunto em operação.

Para melhorar a troca de calor com o ambiente, a maioria das aplicações de conjuntos de engrenagens utilizam um líquido refrigerante ou óleo para retirar o calor dos componentes e evitar desgaste e danos que possam causar falhas no sistema. Essa configuração é uma das melhores alternativas para serem aplicadas a um redutor de velocidade.

3.1.2. Redutores de velocidade

Os redutores de velocidade desempenham um papel crucial na indústria, sendo considerados dispositivos essenciais em uma ampla gama de aplicações industriais. Sua principal função é modificar e controlar características como torque, rotação e velocidade em equipamentos mecânicos.

Esses dispositivos permitem adaptar o movimento dos motores elétricos ou a combustão às necessidades específicas de cada processo, proporcionando uma maior eficiência e precisão nas operações industriais.

Existem vários modelos e tamanhos de redutores. Cada um possui diferentes características para que possa se encaixar nas máquinas e equipamentos, atendendo a necessidade de torque e de velocidade requerida (BONFIGLIOLI RIDUTTOR, 1995).

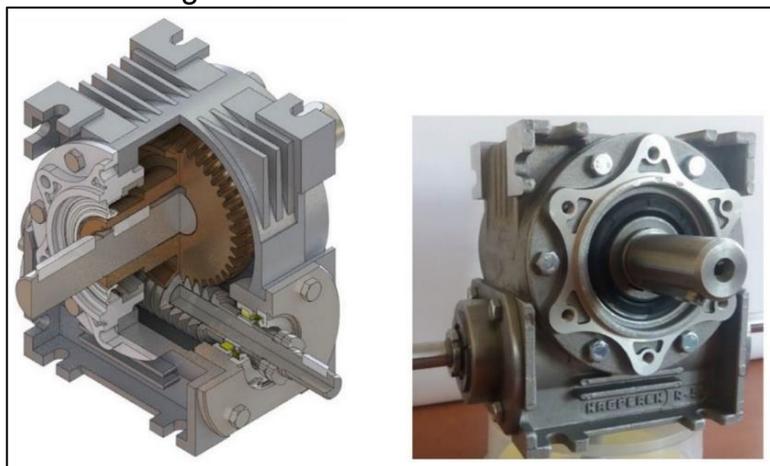
Dentre os principais, pode-se citar os redutores de eixos paralelos, os redutores de eixos perpendiculares, redutores planetários e as caixas de redução de rosca sem-fim (BONFIGLIOLI RIDUTTOR, 1995).

Os redutores de velocidade sem-fim são geralmente usados para aplicações que requerem grandes relações de redução. Eles têm a vantagem de ocupar pouco espaço e possuem uma configuração mais simples em relação aos outros tipos de caixas de engrenagens com a mesma relação de redução.

A potência do motor é transmitida através do eixo do motor para um conjunto de engrenagens em um redutor de velocidade e entregue pelo eixo de saída do redutor. Pode-se definir um redutor de velocidade como um conjunto de

engrenagens que operam dentro de uma caixa metálica. Geralmente, os principais componentes internos dos redutores são: eixo, engrenagens, rolamentos, vedação. A Figura 6 mostra um corte detalhando os componentes internos de um redutor.

Figura 6 – Redutor de Velocidade



Fonte: Retirado de (KACALAK et al., 2021)

Outra vantagem dos redutores é o efeito de travamento automático, baixa folga, tolerância a danos e operação silenciosa.

No entanto, as caixas de engrenagens têm algumas desvantagens devido ao tipo de engrenagens. Elas geram alto atrito em comparação com os outros tipos de redutores de velocidade devido à sua ação deslizante, pela utilização de engrenagens do tipo sem-fim, o que resulta em geração de calor e, portanto, menor eficiência (TAO et al., 2021).

Além disso, o movimento de deslizamento dá origem a desgaste abrasivo e arranhões inevitáveis, portanto, os coroas dos redutores de velocidade sem-fim são geralmente feitos de um material mais macio, normalmente bronze e os parafusos sem-fim são comumente feitos de um aço mais resistente (TAO et al., 2021)

No que diz respeito à seleção de materiais, a solução historicamente mais comum e difundida para transmissão de potência baseia-se no acoplamento entre uma coroa de bronze, normalmente UNS C90700 e um parafuso sem-fim de aço temperado. Este acoplamento é caracterizado por um baixo coeficiente de atrito e boa resistência ao desgaste graças a uma compatibilidade metálica muito baixa (FONTANARI et al., 2013).

No próximo tópico, haverá uma abordagem mais profunda das propriedades do cobre, bem como as vantagens e possíveis desafios que seu uso representa no contexto dos redutores de velocidade e na fabricação de engrenagens, a fim de entender por que este metal e suas ligas têm uma presença tão marcante e é amplamente utilizado.

3.2. Cobre e suas ligas

Os metais e suas ligas são considerados os materiais mais utilizados em engenharia. Em geral, as ligas metálicas são classificadas como ferrosas, aqueles que têm o ferro como elemento principal e as não ferrosas, que não contém ferro como elemento principal (LESKO, 2012).

O cobre foi o primeiro metal descoberto e usado pela humanidade e hoje é terceiro metal mais utilizado no mundo, perdendo para o ferro e alumínio. Com uma produção mundial em 2020 de mais de 20 milhões de toneladas (HENCKENS; WORRELL, 2020).

Esse metal é conhecido por possuir certas qualidades únicas que o tornam um dos melhores materiais de engenharia para aplicações em diversas áreas (NIELSEN, 2023a).

Trata-se de um material com alta condutividade elétrica e térmica, resistente à corrosão, boa usinabilidade, boa resistência mecânica e facilidade de conformação. É um metal não magnético que pode ser soldado com latão, estanho e facilmente usinado (NIELSEN, 2023).

O cobre sólido pode ser descrito como o arranjo dos átomos de cobre em uma rede cristalina cúbica de face centrada (CFC). A rede cristalina CFC é um cubo com um átomo em cada canto e em cada face e tem os átomos compactados da forma teoricamente mais compacta possível. Outros metais que possuem a estrutura CFC incluem alumínio, prata e ouro (NIELSEN, 2023a). Com esta estrutura cristalina, o cobre é macio e dúctil, tendo a capacidade para ser trabalhado a frio quase ilimitado (VERTEL; COGOLLO, 2016).

Devido às suas excelentes propriedades químicas e físicas, o consumo total de cobre e suas ligas é de: 50% do cobre vai para a produção de fios e

condutores, 18% para outros produtos de cobre puro, 27% para a produção de latão e os 5% restantes representam as outras ligas de cobre (VERTEL; COGOLLO, 2016).

Além da aplicação do cobre puro em condutores, as características do metal podem ser melhoradas pela adição de pequenas quantidades de elementos como berílio, silício, níquel, estanho, fósforo, zinco, cromo e prata. Nas ligas à base de cobre são utilizados 14 elementos de liga, quase sempre formando uma solução sólida (COLLINI, 2012).

Os elementos mais comumente ligados ao cobre são alumínio, níquel, silício, fósforo, estanho e zinco. Outros elementos e metais são ligados em pequenas quantidades para melhorar certas características do material, como resistência à corrosão ou usinabilidade. A maioria das ligas industriais são monofásicas e não apresentam alterações alotrópicas durante o aquecimento ou resfriamento. Para algumas ligas à base de cobre é possível o endurecimento por precipitação (COLLINI, 2012).

Segundo Scott (2001) o cobre e suas ligas são divididos em nove grupos principais. Esses grandes grupos são:

- Cobre, que contém um mínimo de 99,3% Cu
- Ligas com alto teor de cobre, que contém até 5% elementos de liga
- Ligas de cobre-zinco (latões), que contém até 40% Zn
- Ligas de cobre-estanho (bronze fosforoso), que contém até 10% Sn e 0,2%P
- Ligas de cobre-alumínio (alumínio bronzes), que contém até 10% de Al
- Ligas de cobre-silício (bronze de silício), que contém até 3% de Si
- Ligas de cobre-níquel, que contém até 30% Ni.
- Ligas de cobre-zinco-níquel (pratas de níquel), que contém até 27% Zn e 18% Ni.
- Ligas especiais, que contém elementos de liga para melhorar uma propriedade ou característica específica, por exemplo, usinabilidade.

As ligas que se enquadram nesses nove grupos são identificadas por sua designação de Sistema Unificado de Numeração (“UNS”, em inglês). Cada designação consiste em cinco números após a letra do prefixo “C”. Neste sistema, as ligas forjadas de cobre são designadas pelos números C1xxxx a C7xxxx, e as ligas fundidas são designadas C8xxxx a C9xxxx.

A Tabela 1 compila as principais famílias com o respectivo identificador UNS:

Tabela 1 - Ligas de Cobre

Ligas para trabalho a frio	
Codificação UNS	Tipo de liga
C1XXXX	Cobre puro ou ligas de elevado teor
C2XXXX	Latões (Cu – Zn)
C3XXXX	Latões com chumbo (Cu – Zn - Pb)
C4XXXX	Latões com estanho (Cu – Zn - Sn)
C5XXXX	Bronzes
C6XXXX	Ligas de Cu -Al, Cu-Si e Cu-Zn
C7XXXX	Alpacas (Cu – Ni e Cu – Ni – Zn)
Ligas para Fundição	
Codificação UNS	Tipo de liga
C80XXX e 81100	Cobre puro
C81XXX e C82XXX	Ligas de elevado teor de Cu
C83XXX e C84XXX	Bronzes especiais
C85XXX	Latões
C86XXX	Latões Especiais
C87XXX	Ligas de Cu-Si
C90XXX até C95XXX	Bronzes e Bronzes especiais
C947XX e C949XX	Ligas de Cu-Sn-Ni
C95XXX	Ligas de Cu-Al
C96XXX	Ligas de Cu-Ni-Fe
C97XXX	Alpacas (Cu – Ni e Cu – Ni – Zn)
C98XXX	Ligas de Cu-Pb
C99XXX	Ligas diversas

Fonte: Retirado e adaptado (MATESO, 2006)

3.3. Bronze UNS C90700

O bronze é uma liga de cobre-estanho em uso desde a antiguidade. Originalmente, o termo bronze era usado para ligas de cobre tendo o estanho como o único ou principal elemento de liga. No uso moderno, o termo bronze raramente é usado sozinho e os termos bronze fosforoso ou bronze de estanho são usados para

indicar ligas de cobre-estanho. De fato, o termo bronze, juntamente com um adjetivo modificador adequado, foi estendido para se aplicar a uma grande variedade de ligas de cobre.(SCOTT, 2001)

Os usos do bronze são variados, em função de suas excelentes propriedades como resistência à corrosão, por esta razão é considerado apropriado para a fabricação de acessórios que devem estar em contato com vapores ou produtos químicos, sua boa maleabilidade e suas propriedades mecânicas e elétricas. (GARCES; HENRIQUEZ; TAPIA, 2003).

Nas ligas de bronze, podem ser adicionados outros tipos de metais como chumbo, alumínio, silício, manganês, níquel, ferro, fósforo, antimônio etc. Os elementos adicionados destinados a modificarem a sua dureza, sua cor, a tenacidade, a flexibilidade e a resistência ao atrito(PERUCH, 2018). Ao adicionar elementos de liga ao bronze, como alumínio, níquel ou silício, é possível obter ligas com diferentes características e capacidade de resposta ao tratamento térmico(JABŁOŃSKA et al., 2019).

O estanho é o elemento de liga mais antigo conhecido no cobre e é um elemento de liga chave em muitos bronzes. O estanho junto com o cobre forma uma solução sólida, onde existe uma melhoria das propriedades mecânicas do cobre. Essas propriedades são melhores do que a adição do zinco, porque menos estanho é necessário para um aumento equivalente de resistência.

Ao contrário do zinco, o estanho também melhora a resistência à corrosão. O estanho reduz a temperatura de fusão do cobre e aumenta a fluidez, tornando as ligas a base de estanho mais fáceis de fundir. O teor de estanho e zinco em ligas de fundição não devem exceder 11,5% caso contrário, a porosidade torna-se um problema (ASM INTERNATIONAL, 2008).

De acordo com a COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION (2016), o fósforo é um aditivo essencial em ligas de bronze, pois aumenta sua resistência ao desgaste e melhora a rigidez da liga. O fósforo atua como um agente de desoxidação durante o processo de fundição, neutralizando o oxigênio e outros gases que podem entrar no metal fundido e causar porosidade ou rachaduras. Embora ele reduza a condutividade elétrica. A estrutura, bem como a fluidez e a

fundição das ligas de cobre são melhoradas quando os óxidos são eliminados.(ASM INTERNATIONAL, 2008)

O bronze fósforos UNS C90700 ou SAE 65 também é conhecido como bronze de engrenagem pois é resistente à corrosão. Isto é adequado para a fabricação de válvulas, caixas de bombas, engrenagens helicoidais, quando o serviço é pesado o bronze muito duro para a velocidade média.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas e Composição Química.

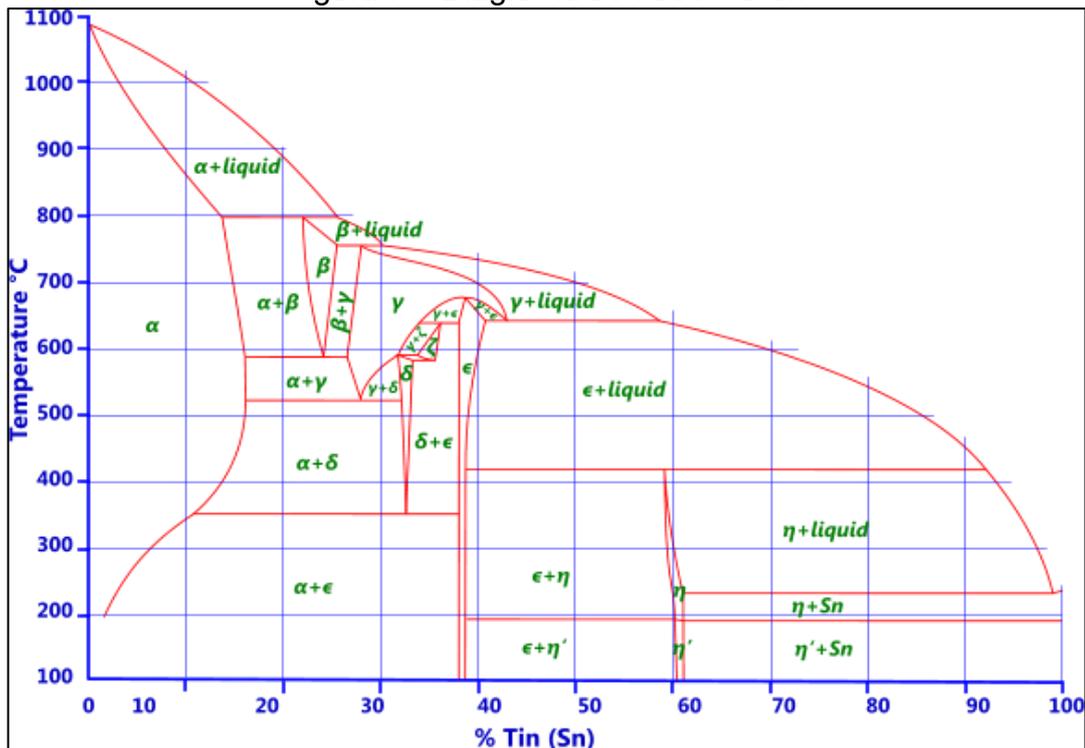
Cu%	Sn%	Zn%	Pb%	Fe%	P%	Ni%	Al%	S%	Sb%	Si%
88-90	10-12	0,50	0,50	0,15	1,5	0,50	0,005	0,05	0,20	0,05

Resistência à tração, mín. MPa	Limite de resistência, a 0,5% de extensão sob carga, min MPa	Alongamento, 50 mm min %	Dureza Brinell HB
276	172	10	102

Fonte: ASTM B505 - Standard Specification for Copper-Base Alloy Continuous Castings e ASTM B427-93a Standard Specification for Gear Bronze Alloy Castings

O diagrama de fases da liga de Cu-Sn apresentado na Figura 7 mostra várias transformações peritéticas e eutéides, cujos produtos são α , β , γ , δ , ϵ dentre outras fases.

Figura 7 – Diagrama de Fase Cu-Sn



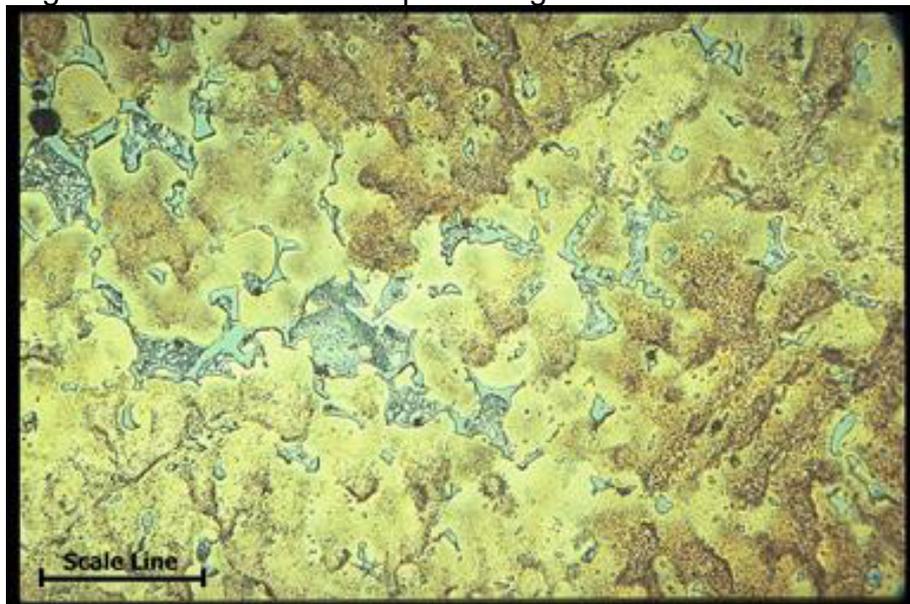
Fonte: <https://www.calqlata.com/productpages/00062-help.html>

Os bronzes de estanho, com até 15,8% de estanho, têm uma microestrutura normalmente monofásica alfa (α). O estanho melhora a resistência do cobre em solução sólida, embora tenha baixa solubilidade à temperatura ambiente. Transformações de fase à temperatura ambiente são lentas e geralmente não ocorrem, portanto, essas ligas são monofásicas (VERTEL; COGOLLO, 2016).

A adição de estanho ao cobre torna a liga dura, substituindo alguns átomos de cobre por átomos de estanho. Durante o processo de fundição outras fases podem ser formadas, os primeiros dendritos a se formarem são ricos em cobre, e os espaços interdendríticos são enriquecidos em estanho, formando um composto de CuSn chamado de "fase delta".

Esta fase delta é muito dura e a presença desta fase proporciona as boas propriedades de desgaste necessárias para a coroa de bronze. A Figura 8 mostra a microestrutura dendrítica típica de um bronze de estanho C90700 com a fase delta mostrada na cor azul claro.

Figura 8 – Microestrutura típica da liga de Bronze UNSC90700



Fonte: https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/cu_tin

O estanho produz um efeito tanto na temperatura de fusão (liquidus) quanto na faixa de solidificação do cobre quando adicionado em quantidades de até 15,8%, que é o limite em ligas comerciais (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2016).

A microestrutura do bronze estanho com chumbo é semelhante a das ligas sem chumbo com adições de partículas de chumbo entre os limites dos dendritos. O chumbo é insolúvel em cobre e se solidifica como chumbo puro nos limites de grãos (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2016).

Embora o chumbo seja insolúvel em cobre, muitos latões e bronzes comerciais contêm quantidades significativas de chumbo. A adição de chumbo em certas circunstâncias é benéfica ao material, pois ajuda a reduzir a porosidade durante a contração normal no final da solidificação. O chumbo também melhora a usinabilidade, proporcionando uma quebra do cavaco, de modo que o metal removido forme pequenos cavacos facilitando a usinagem (ASM INTERNATIONAL, 2008).

No entanto, a presença de grandes quantidades de chumbo reduz a resistência à tração e a dureza do bronze, tornando a liga menos adequada para aplicações que requerem alta resistência ou dureza. usinagem (ASM INTERNATIONAL, 2008).

As propriedades metalúrgicas e mecânicas de uma liga metálica dependem, fundamentalmente, do fenômeno de solidificação e dos parâmetros associados a este.

Compreender as características do material usado na fabricação das engrenagens é fundamental para a análise de falhas. Cada material possui propriedades específicas, como resistência à tração, dureza, resistência ao desgaste, e comportamento sob cargas e temperaturas variadas. Essas propriedades influenciam diretamente o desempenho e a vida útil da engrenagem. Ao analisar falhas, é crucial entender se a falha foi causada por uma escolha inadequada de material, um defeito no material, ou uma condição operacional do equipamento.

3.4. Análise de falha

A técnica de análise de falhas é uma metodologia capaz de entender como os materiais e produtos falham, além dos efeitos das falhas. É uma parte crítica da compreensão para se determinar a possível causa de uma falha, o que

poderia ter sido feito para evitá-la, qual o impacto dela no desempenho de um determinado mecanismo e como alguém poderia evitar falhas semelhantes. Este capítulo discute vários aspectos e terminologias associados à análise de falhas.

Qualquer tipo de falha é, por natureza, indesejável, mas em algumas aplicações as consequências podem ir além da inconveniência ou do custo, e podem se tornar críticas ou fatais, a ponto de, até mesmo uma falha, por mais rara que seja, ser considerada inaceitável.

Quando um sistema de engrenagem quebra, a falha real pode ser bem diferente da falha relatada. Por exemplo, quando os dentes da engrenagem quebram, a investigação pode revelar que eles estavam seriamente desgastados muito antes de quebrarem. O problema então é descobrir por que ocorreu o desgaste anormal.(RADZEVICH, 2021)

Wilfred Lewis, em 1893, fez contribuições significativas ao estudo das falhas em engrenagens, particularmente em relação ao cálculo da resistência à flexão dos dentes das engrenagens. O trabalho de Lewis propõe que um dente de engrenagem funciona como uma viga engastada em balanço, sofrendo tensão de tração de um lado e tensão de compressão do lado oposto. Lewis entendeu que as falhas nos dentes das engrenagens causadas por sobrecarga, geralmente começam com uma trinca na base do dente. (BUDYNAS; NISBETT, 2008; NORTON, 2013).

Engrenagens de metal falham por vários motivos. Alguns estão relacionados ao projeto e fabricação e outros são devidos a fatores relacionados ao serviço, como altas velocidades de operação, altas temperaturas e meios agressivos(STARZHINSKII et al., 2008).

Quando um sistema de engrenagens não está funcionando corretamente, a causa do problema pode vir de qualquer uma das várias áreas. Projeto, Fabricação, Instalação, Meio-ambiente e Operação. (RADZEVICH, 2021)

Radzevich (2021) cita, no

Quadro 3, principais causas de falhas em engrenagens detalhando cada grande área.

Quadro 3 - Principais Causas de Falha.

Nº	Projeto	Manufatura	Instalação	Meio-ambiente	Operação
1	Tipo de engrenagem	Precisão do dente	Fundação	Ar adequado	Amaciamento
2	Projeto	Material do dente (dureza, composição, limpeza)	Alinhamento	Temperatura dentro dos limites de especificação	Atender aos limites de projeto
3	Design do dente	Engrenagens	Sistema de óleo	Proteção adequada contra água	Sobrecarga
4	Projeto do corpo da engrenagem	Carcaças: tamanhos e precisão	Instrumentação	Manutenção	Aplicação incorreta
5	Projeto do eixo	Montagem do Redutor	Montagem na estrutura		Sem torque de partida necessário
6	Projeto do rolamento.				
7	Projeto da carcaça				
8	Projeto da vedação				
9	Projeto dos parafusos				
10	Projeto do sistema de lubrificação				
11	Vibração conhecidas e toleráveis				

Fonte: Adaptado e traduzido de (RADZEVICH, 2021)

Estudos indicam que, em cerca de 74% dos casos, as falhas em engrenagens são atribuídas a causas relacionadas ao serviço, enquanto, aproximadamente, 23% são resultado de erros de projeto e fabricação (JANGRA; MUZAKKIR, 2022).

Esses dados destacam a importância crucial de garantir uma operação adequada e manutenção cuidadosa das engrenagens, a fim de evitar falhas prematuras e maximizar a vida útil dos equipamentos.

Segundo a NBR 5462 (ABNT, 1994) a falha acontece quando um componente perde a capacidade de desempenhar sua função.

Esta norma também estabelece um conceito de critério de falha como um conjunto de regras aplicáveis no julgamento de tipos e severidades de falhas para

definir os limites de degradação aceitáveis até a perda de desempenho. Em especial, em componentes e sistemas de engrenagens este conceito também é importante, adequado e alinhado às normas internacionais.

Existem algumas normas internacionais relevantes para a análise de danos em engrenagens. Entre essas normas, destacam-se a ISO 10825-1:2022 e a AGMA 1010-F14. A BS ISO 10825-1:2022- *Gears - Wear and damage to gear teeth Part 1: Nomenclature and characteristics*, fornece nomenclatura para modos gerais de falha e desgaste nos dentes da engrenagem, permitindo a classificação e identificação dos tipos mais comuns de falhas. Por sua vez, a AGMA 1010-F14, intitulada "*Appearance of Gear Teeth - Terminology of Wear and Failure*", descreve as falhas e o diversos tipos de desgaste das engrenagens.

Os padrões mencionados anteriormente abrangem a descrição de mais de 40 tipos de danos aos dentes de engrenagens, sendo acompanhados por fotos e diagramas que ilustram a classificação e estágio de desenvolvimento do defeito. Os padrões são aplicáveis a todos os tipos de engrenagens, incluindo engrenagens retas, helicoidais, cônicas e sem-fim. Também são aplicáveis a engrenagens feitas de diversos materiais, incluindo aço, ferro fundido, alumínio e bronze.

A AGMA agrupa os modos comuns de falhas em engrenagens em sete classes gerais. Essas classes são subdivididas em modos gerais e específicos. Além disso, a AGMA também inclui nomes comumente utilizadas para descrever esses modos de falha. Essa classificação está apresentada no Quadro 4.

Ao categorizar as falhas, é possível identificar padrões e características específicas associadas a cada tipo de falha, o que auxilia na análise e no desenvolvimento de estratégias de prevenção e correção adequadas (AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2020).

Ao contrário dos testes de laboratório projetados para isolar um modo de falha específico, as falhas de campo podem combinar vários modos. Ademais, danos que acontecem após a primeira falha podem alterar a aparência final das engrenagens danificadas, complicando ainda mais o diagnóstico.

Quadro 4 - Nomenclatura de falha de engrenagem recomendada pela AGMA.

Categoria	Modo de Falha
Desgaste	Adesão por desgaste (leve, moderado e severo)
	Abrasão (leve, moderada e severa)
	Polimento
	Corrosão
	Corrosão por compressão
	Escamação
	Cavitação
	Erosão
	Descarga elétrica
	Ondulação
Arranhões	Arranhões leves, moderados e severos
Deformação plástica	Indentação
	Deformação a frio
	Deformação a quente
	Deformação Plástica(Rolling)
	Impacto
	Ondulação
	Rebarbação
	Rebarba de fabricação
	Deformação da base do dente da engrenagem
	Interferência do formato do dente
Fadiga hertziana (fadiga de contato)	Pitting
	Micropitting
	Fadiga subsuperficial
Trinca ou fissuras	Trincas superficiais
	Trincas de Desgaste
	Trincas na borda e corpo
	Separação do Núcleo da engrenagem
	Trincas por fadiga
Fratura	Fratura frágil
	Fratura dúctil
	Fratura de modo misto
	Cisalhamento do dente
	Fratura após deformação plástica
Fadiga por flexão	Fadiga de baixo ciclo
	Fadiga de alto ciclo

Fonte: Tradução livre de (DAVIS, 2005)

Em transmissões do tipo rosca sem fim, ou engrenagens hipóides, existe o fenômeno do deslizamento que facilita o surgimento de trincas superficiais; desgaste por adesão, por abrasão, por corrosão ou por fadiga superficial são modos potenciais de falha.

A fadiga superficial ou fadiga Hertziana é responsável pelos modos de falha de *pitting* e *micropitting* nos dentes de engrenagens. O *pitting* é um modo de falha comum nos dentes das engrenagens devido às altas tensões de contato hertziano e ao grande número de ciclos de trabalho. (FENG *et al*,2023).

O *pitting* é um fenômeno de fadiga que ocorre quando uma trinca de fadiga se inicia na superfície do dente da engrenagem ou ligeiramente abaixo dela. Essa trinca normalmente se propaga por uma curta distância em direção aproximadamente paralela à superfície do dente antes de se curvar ou ramificar em direção à superfície. (DAVIS, 2005).

À medida que as trincas se expandem, ocorre a separação de um fragmento do material da superfície, resultando na formação de uma cavidade, conhecida como *macropitting*. Quando várias cavidades se unem, originando uma cavidade maior, ela é frequentemente denominada "lascamento". (DAVIS, 2005).

À medida que o *pitting* se desenvolve e cresce, afetando a integridade dos dentes da engrenagem, ocorre uma alteração na distribuição de carga entre os dentes. Isso ocorre devido às mudanças nas características geométricas da superfície de contato e às áreas danificadas. Não há um limite de resistência para a fadiga Hertziana, e o *pitting* pode ocorrer mesmo com baixos níveis de tensão se as engrenagens forem operadas por tempo suficiente para formação. (FENG *et al*,2023).

O lascamento resultante pode levar a uma carga distribuída desigualmente nos dentes da engrenagem, com concentrações de carga ocorrendo nas áreas afetadas pelo lascamento. (FENG *et al*,2023).

Em aplicações práticas, o desgaste abrasivo e a corrosão por fadiga são os dois fenômenos de desgaste mais comuns nos sistemas de transmissão de engrenagens. (FENG *et al*,2023).

Portanto, resultados satisfatórios de operação em elementos potencialmente sujeitos a fadiga superficial somente podem ser obtidos com um projeto adequado, com uma manufatura cuidadosa e com o uso do lubrificante próprio para as condições de trabalho.(CUNHA, 2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho se deu devido a falha prematura de uma talha elétrica. A talha elétrica em questão utiliza um motor elétrico conectado ao eixo do parafuso sem-fim, que aciona um sistema de engrenagens presentes no redutor de velocidade. Uma imagem do sistema é mostrada na Figura 9.

Figura 9 – Talha elétrica



FONTE: <http://www.climber.com.br/produtos/talhas-eletricas>

A falha do equipamento ocorreu enquanto a talha elétrica erguia uma carga de aproximadamente 1.000Kg, sendo o limite operacional de 1.500kg. A coroa de bronze apresentada na Figura 10, que apresentou uma falha, que estava integrada à talha elétrica e será o foco desse trabalho. A Figura 10 mostra a peça real, que foi analisada.

Figura 10 – Coroa de bronze



Fonte: Elaborado pelo autor.

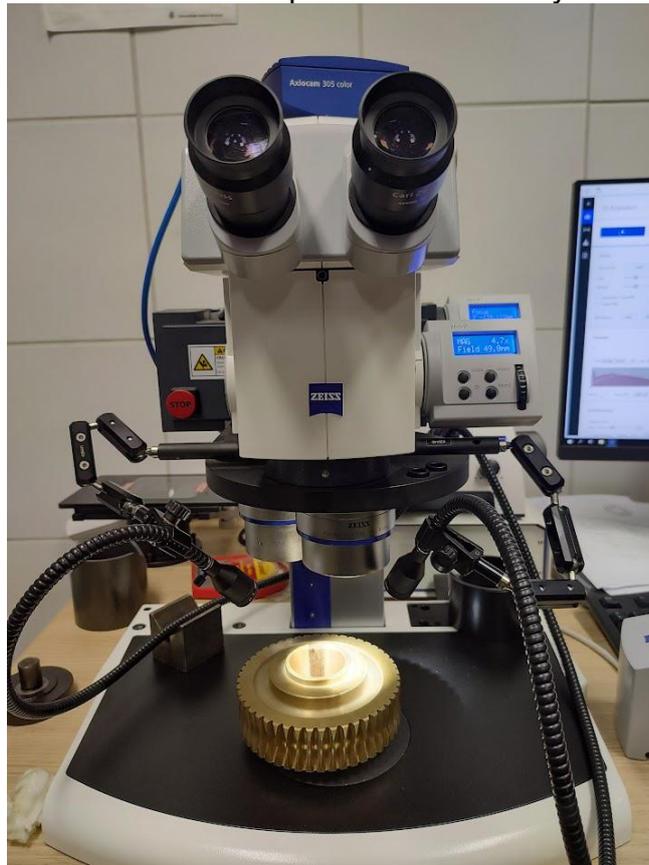
Não foi relatado evidência de danos à estrutura da caixa de redução bem como não foram constatados danos ao parafuso aço sem-fim por uma avaliação visual.

A coroa de bronze foi inspecionada visualmente e macroscopicamente, observando-se os cuidados necessários para preservar a coroa e evitar danos às superfícies fraturadas. Além das análises anteriores, foram realizadas análises químicas, de microestrutura e medição de dureza.

Para a análise fractográfica da falha, a superfície da fratura foi preparada para observação. Já no procedimento de limpeza, a peça foi lavada com água e uma solução desengraxante.

Para inspeção visual utilizou-se o estereomicroscópio Zeiss Discovery V10, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Estereomicroscópio Zeiss Discovery V10



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a inspeção visual, a coroa passou pela análise microestrutural, tendo sido cortada perpendicularmente à superfície da fratura. A amostra retirada foi lixada inicialmente utilizando a lixa de granulação 80 e prosseguindo com as lixas 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*.

Logo em seguida a amostra foi polida com alumina de 3 μ m e pasta de diamante de 1 μ m. Para revelação da microestrutura do material analisado foi realizado um ataque químico com imersão em solução contendo 200ml de água destilada, 10g de cloreto férrico e 50ml de ácido clorídrico por aproximadamente 15 segundos. A análise microestrutural foi realizada sob microscópio óptico ZEISS Observer Z1m AX10 (Figura 12) e microscópio eletrônico de varredura QUANTA 250 FEI (Figura 13).

Figura 12 – Microscópio Zeiss Observer. Z1m AX10



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 – Microscópio Eletrônico de Varredura QUANTA 250 FEI



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a determinação da dureza foram realizadas 03 medidas no centro e na superfície do coroa, seguindo a norma ASTM E10-18 *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, usando um Durômetro Zwick Roell Indentec ZHU250CL.

Figura 14 – Durômetro Zwick Roell Indentec ZHU250CL



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise de composição foi realizada no Analisador de composição Thermo Scientific NITON XI3t Ultra conforme Figura 15.

Figura 15 – Analisador de composição Thermo Scientific NITON XI3t.



Fonte: Elaborado pelo autor

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise química

A Tabela 3 resume a composição química da amostra. A média de composição química encontrada na coroa não correspondeu ao padrão UNS C90700, que é o típico material considerado adequado para essas aplicações.

Tabela 3 - Análise química da liga bronze (% em massa).

Elemento	Cu	Sn	Pb	Ni	V	Ti
Medida 1	85,53	10,08	3,76	0,43	0,04	0,03
Medida 2	85,53	10,08	3,76	0,43	0,04	0,03
Medida 3	86,87	10,06	2,36	0,38	0,05	0,04
Média	85,98	10,07	3,29	0,41	0,04	0,04
Desvio Padrão	0,77	0,01	0,81	0,03	0,00	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor

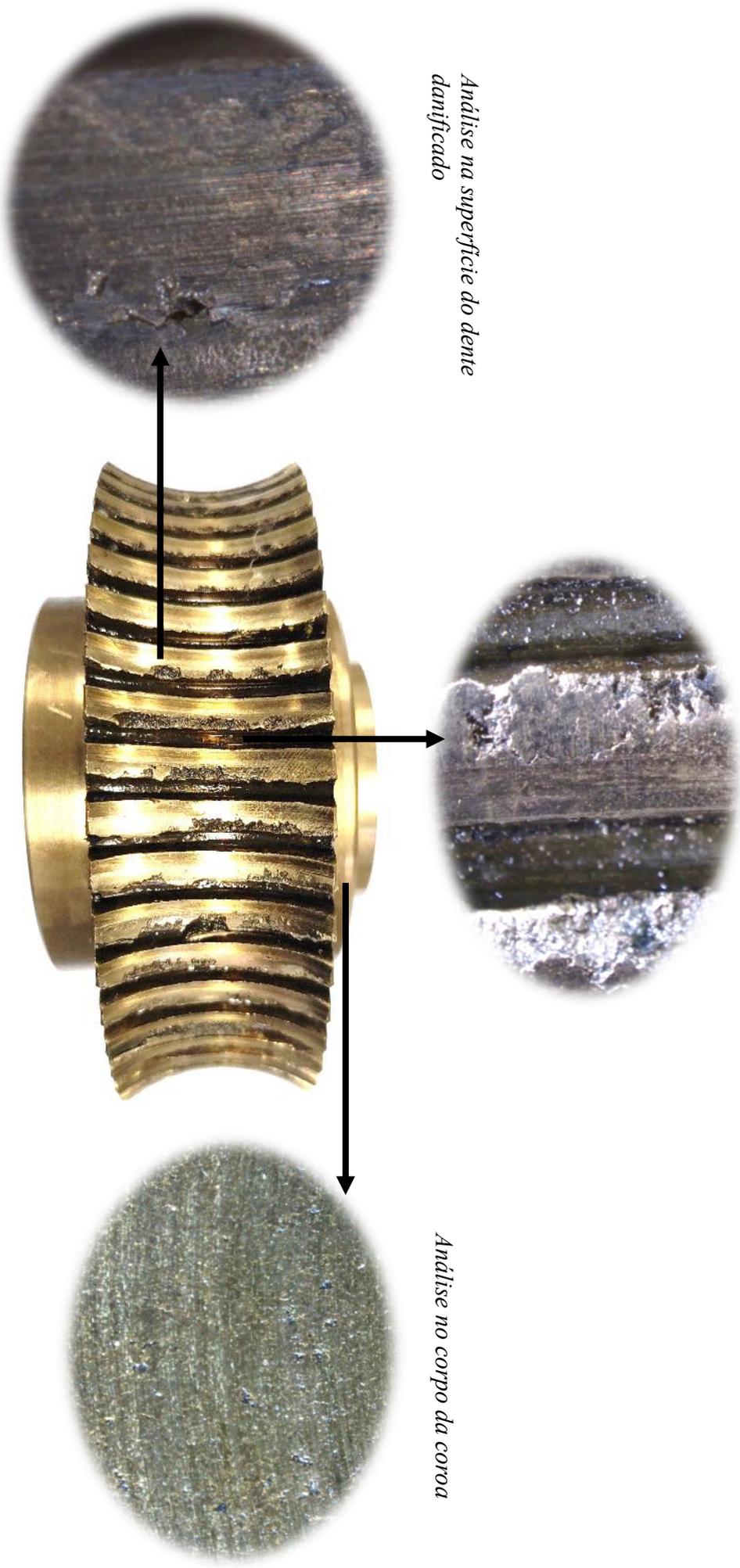
A norma ASTM B505 especifica que o teor de cobre na liga C90700 deve ser superior a 88%. A análise química, no entanto, revelou que a amostra em estudo possuía uma concentração de cobre abaixo do mínimo estabelecido pela norma. A adequada proporção de cobre na liga é essencial para garantir características como resistência mecânica e resistente à corrosão. (COLLINI, 2012)

Quanto ao elemento chumbo, a norma ASTM B505 estabelece um teor máximo de 0,50% na liga C90700. Os resultados da análise química indicaram que a amostra continha uma quantidade de chumbo aproximadamente 6,6 vezes maior do que o máximo permitido pela norma. A presença excessiva de chumbo pode comprometer propriedades mecânicas e de resistência ao desgaste da liga (PRASAD; PATWARDHAN; YEGNESWARAN, 1996a).

4.2. Inspeção visual

A inspeção visual foi realizada na peça conforme recebida a fim de avaliar suas condições após a fratura. A Figura 16 mostra a vista lateral da coroa de bronze fraturada, com detalhes das regiões analisadas neste trabalho. Pode-se observar que a coroa sofreu danos em todos os dentes.

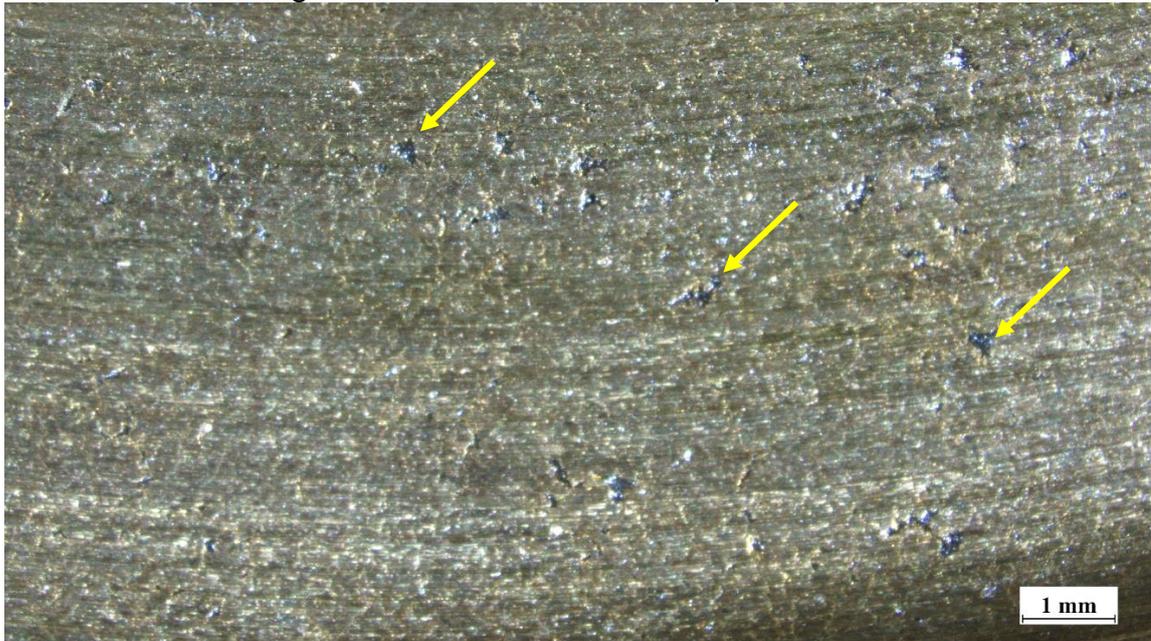
Figura 16 – Detalhes analisados na coroa que falhou
Análise entre os dentes da coroa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a inspeção visual da coroa de bronze, identificou-se a porosidade como um dos defeitos presentes no corpo da peça. Esse defeito é evidenciado pelas setas nas Figura 17 e Figura 18, que ilustram claramente esta característica indesejada. A porosidade se manifesta na forma de pequenas cavidades ou vazios que estão dispersos em todo o material

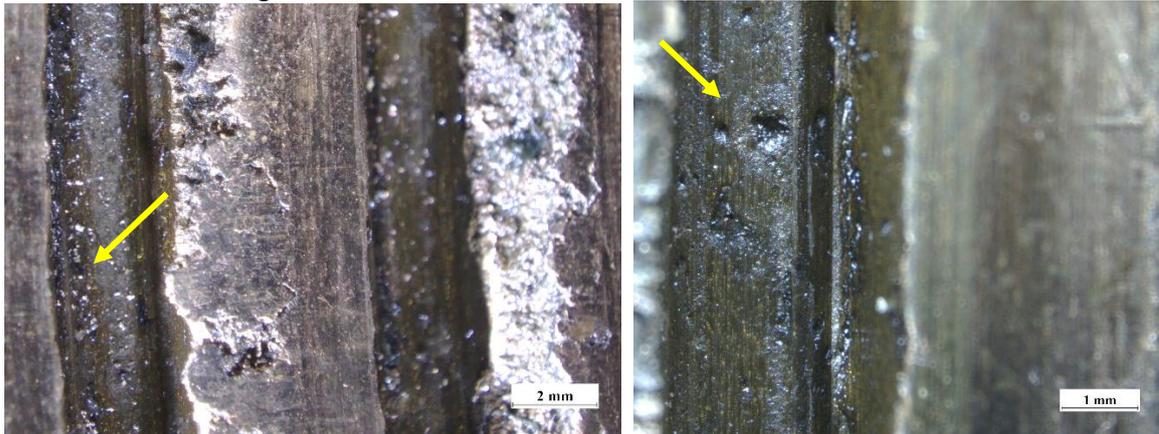
Figura 17 – Porosidades no corpo da coroa.



Fonte: Elaborado pelo autor

Além das porosidades identificadas no corpo da peça, foi observado que este defeito também estava presente de forma significativa na raiz dos dentes da coroa de bronze. Este fenômeno é destacado na Figura 18. A localização dessa porosidade é particularmente crítica, uma vez que a raiz dos dentes é uma região de alta tensão durante a operação.

Figura 18 – Porosidade entre os dentes da coroa.



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se porosidades em todo o corpo da peça, assim como no centro do dente, conforme Figura 19.

Figura 19 – Porosidades na área do dente.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 19, pode-se observar que além da porosidade, há também a presença de uma trinca que se estende a partir da área onde a porosidade foi identificada, sugerindo relação causal entre elas, em que a porosidade atuou como um concentrador de tensão, facilitando a iniciação e propagação da trinca.

É crucial considerar que a coexistência de porosidade e trincas, especialmente em regiões críticas da peça como a base dos dentes, pode significativamente comprometer a resistência mecânica e a durabilidade da coroa de bronze.

Uma observação adicional importante é a presença de porosidade na região da fratura da coroa de bronze, conforme evidenciado na Figura 20. Nessa região crítica, é notável a existência de poros e vazios. Esses poros e vazios podem desempenhar um papel significativo no desgaste da peça (PRASAD; PATWARDHAN; YEGNESWARAN, 1996b).

Figura 20 – Poros no interior da área de fratura.



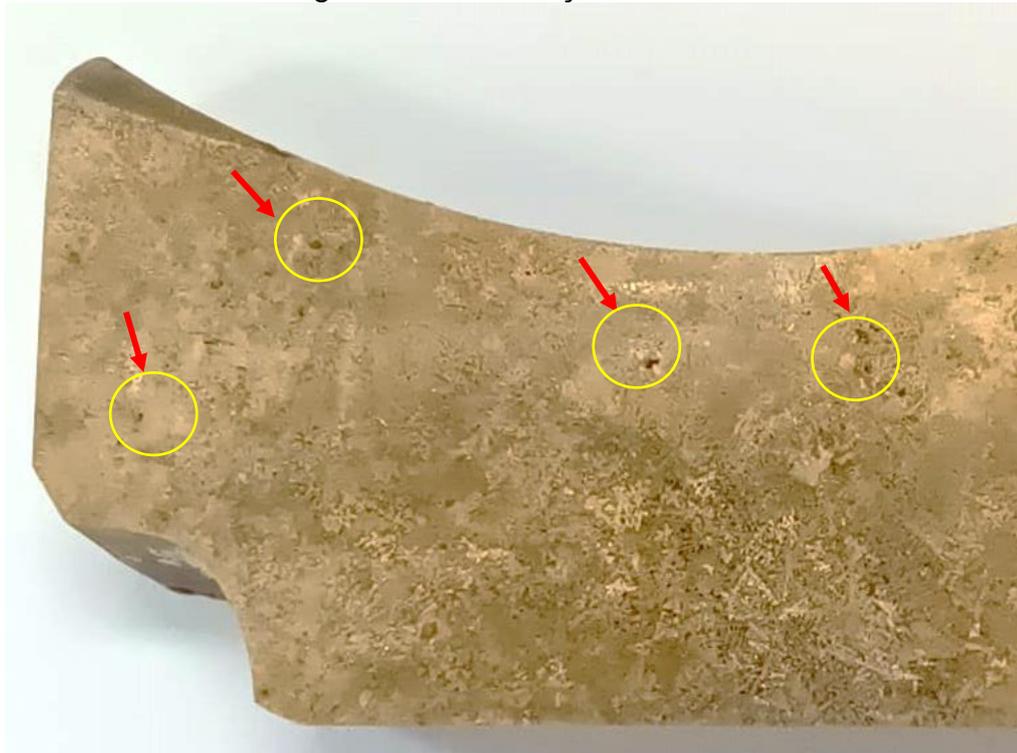
Fonte: Elaborado pelo autor

Os poros atuam como pontos de concentração de tensão, facilitando a iniciação e propagação de microtrincas. Como resultado, a presença de trincas pode levar a um desgaste por adesão acelerado (PRASAD; PATWARDHAN; YEGNESWARAN, 1996b).

Após a preparação metalográfica da região do centro da coroa, observou-se pela macroestrutura da peça, a presença de vazios, conforme Figura 21.

Fazendo análise mais detalhada depois do ataque químico, é possível constatar a presença de vazios em toda a estrutura, sendo mais concentrados no centro da peça.

Figura 21 – Presença de Vazios

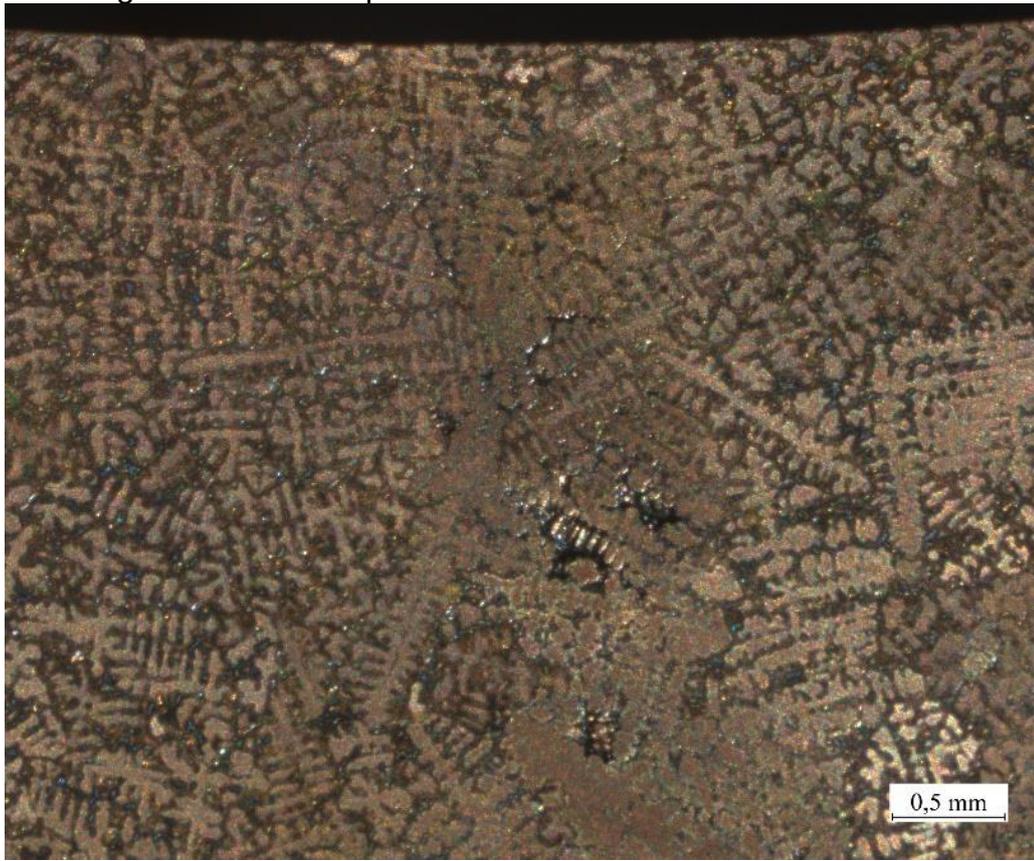


Fonte: Elaborado pelo autor

Esses vazios, que aparecem como espaços escuros na imagem, são indicativos de defeitos que podem ter sido causados por uma série de fatores durante o processo de fundição.

Na Figura 22 se observa a microestrutura da seção transversal da coroa de bronze obtida em microscópio ótico, revelando a presença de vazios no interior da peça.

Figura 22 – Vazios presentes no interior da coroa de bronze.



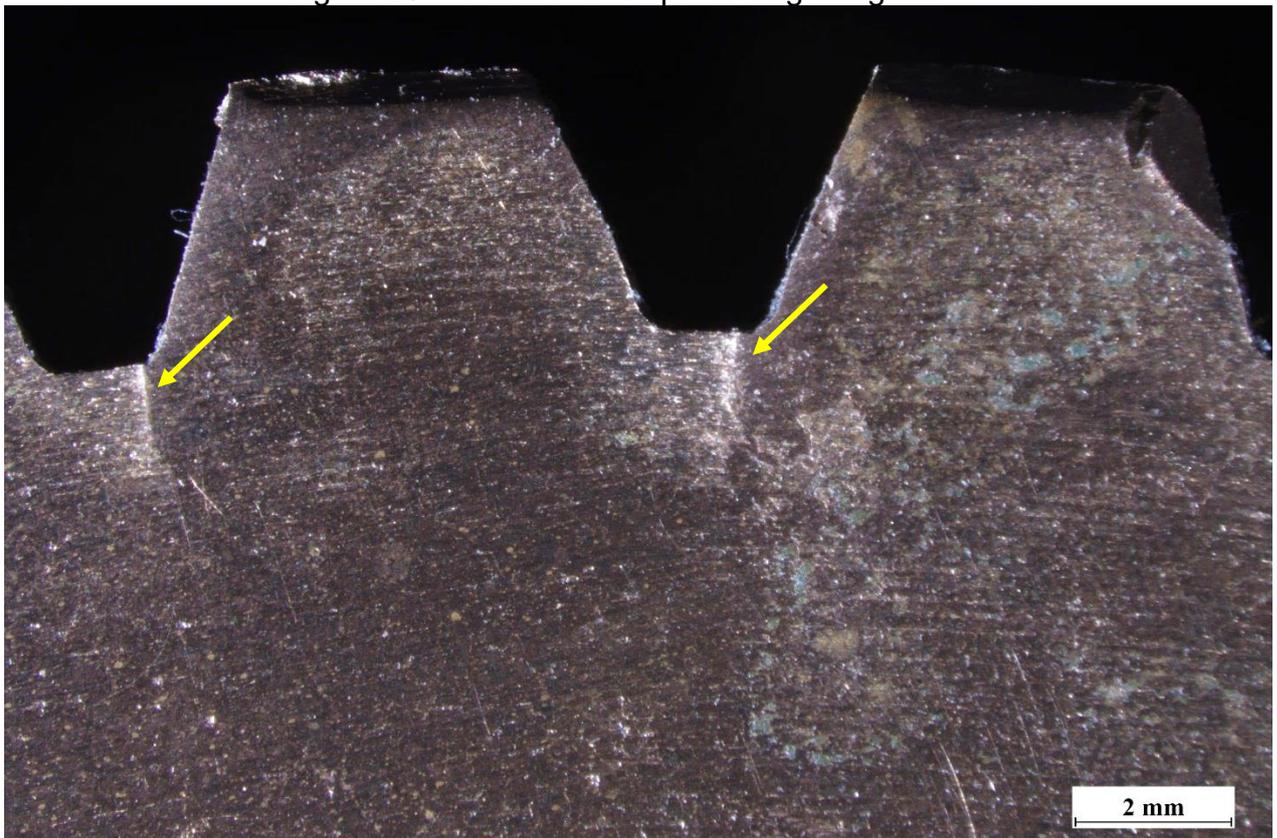
Fonte: Elaborado pelo autor

Os principais fatores para a presença de vazios são gases aprisionados, rechupes, turbulência do metal líquido, temperaturas inadequadas de vazamento e solidificação, podendo ser causas potenciais para a formação desses vazios (BALDAM; VIEIRA, 2014).

É importante ressaltar que a existência desses vazios pode comprometer a integridade estrutural do componente, afetando suas propriedades mecânicas, incluindo resistência e durabilidade (BALDAM; VIEIRA, 2014).

Adicionalmente às porosidades previamente discutidas, foram observadas trincas na base dos dentes da coroa de bronze, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Trincas no corpo da engrenagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

Vale lembrar que a presença de porosidade na região pode ter um papel crucial no desenvolvimento destas trincas. Os vazios atuam como concentradores de tensão, que sob esforços cíclicos ou de carga constante, favorecem a iniciação e propagação de trincas. Além disso, a base dos dentes é uma área que suporta altos níveis de tensão devido à transmissão de torque (OSAKUE; ANETOR, 2022).

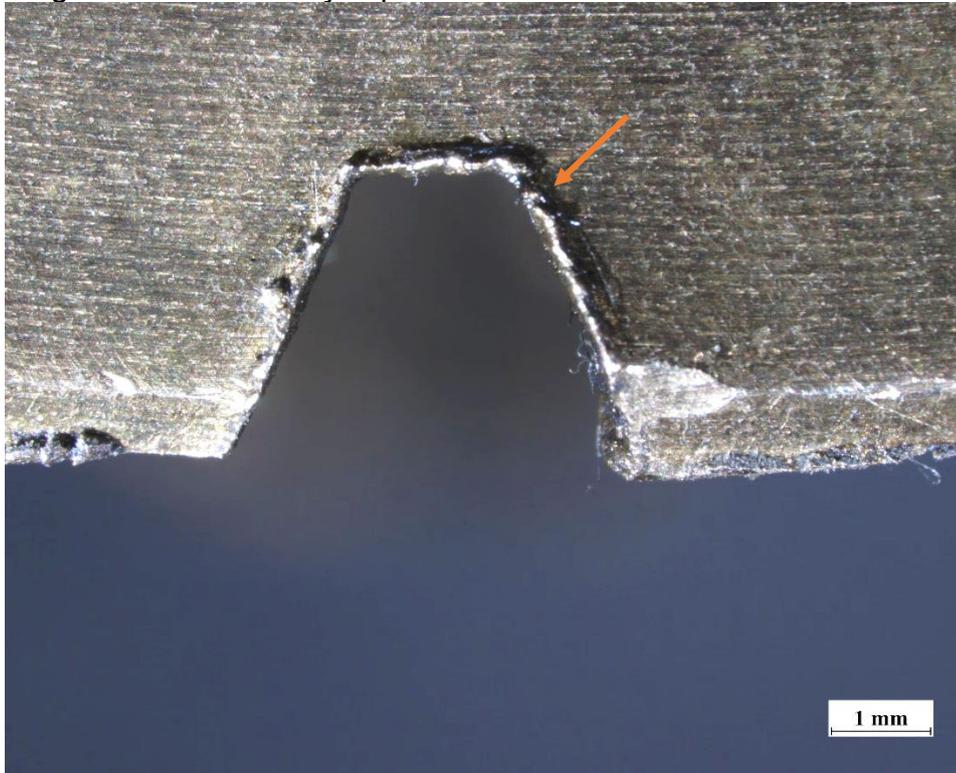
Budynas e Nisbett (2008) menciona que trincas podem ser ocasionadas devido à geração de tensões que excedem o limite de resistência à fadiga do material, mesmo quando essas tensões são significativamente inferiores à tensão de escoamento do material em si.

A combinação de porosidade com as altas tensões nesta região pode, conseqüentemente, acelerar a formação de trincas. À medida que o material é deslocado, ele altera a área de contato do perfil. Essas modificações também alteram a distribuição de tensão nos dentes da engrenagem sob fadiga de contato.

Isso pode levar a uma redução na resistência e integridade da peça, e, em casos severos, pode resultar em falha do componente (RUUSILA et al., 2013).

Outra observação consiste na deformação plástica presente na lateral do dente da engrenagem. Aa Figura 24 mostra essa deformação plástica.

Figura 24 – Deformação plástica visível na extremidade do dente.



Fonte: Elaborado pelo autor

A deformação plástica dos dentes de engrenagens, conforme descrito pela AGMA, refere-se ao processo de deformação permanente que ocorre nas superfícies dos dentes de engrenagens durante a operação. Conforme as cargas são aplicadas, o material do dente pode ceder e fluir, resultando em deformações visíveis, como arredondamento das pontas dos dentes, criação de rebarbas e formação de sulcos nos flancos dos dentes (AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2020).

Essas deformações induzidas pelas cargas dinâmicas ocorrem durante a operação e contribuem para o desgaste do perfil da engrenagem, resultante da combinação de deformação a frio e desgaste.(REXNORD INDUSTRIES GEAR GROUP, 1978)

4.3. Análise de dureza Brinell

As medidas de dureza Brinell foram realizadas no centro da peça e a média obtida de 03 medidas foi de 75 HB, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de dureza obtidos

Medida	Valor
1	70,5
2	75,5
3	79,5
Média	75,0

Fonte: Elaborado pelo autor

A dureza sugerida pela norma ASTM, B427-93 que trata da “Especificação padrão para fundições de liga de bronze de engrenagem” é de 95HB, logo, a dureza obtida na análise está abaixo do especificado.

4.4. A microestrutura da coroa de bronze

Todas as imagens a seguir apresentam as micrografias após polimento e ataque metalográfico conforme método mencionado no capítulo anterior de uma amostra retirada do corpo da coroa, conforme mostrado na Figura 21.

A Figura 25 ilustra a microestrutura dendrítica do metal fundido. A estrutura típica do bronze fundido é caracterizada pela formação de dendritas durante o processo de solidificação. Essas dendritas são ramificações tridimensionais que se assemelham a árvores.

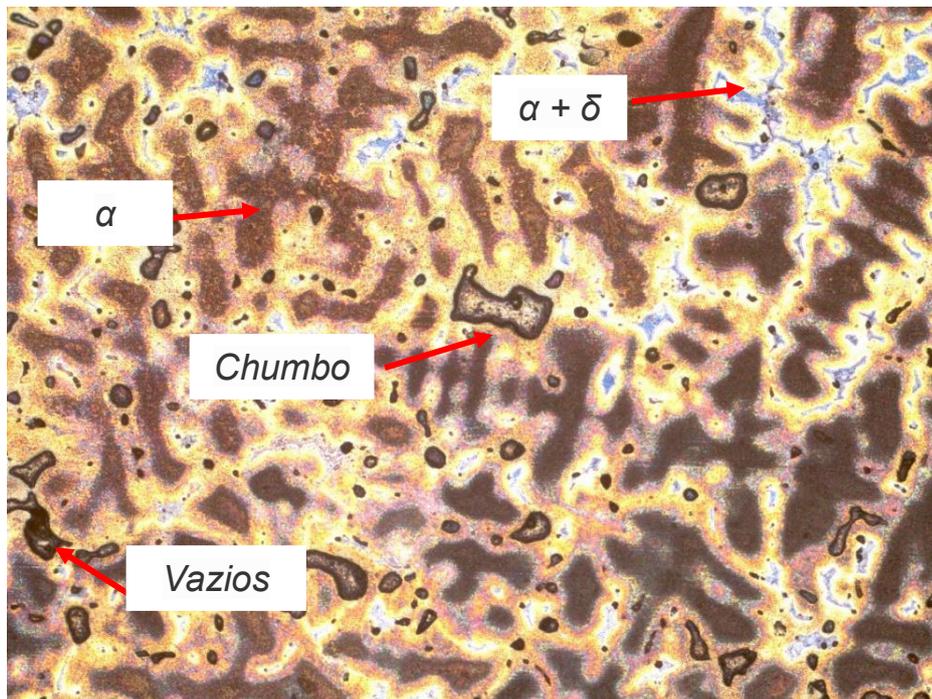
Figura 25 – Microestrutura dendrítica do metal fundido



Fonte: Elaborado pelo autor

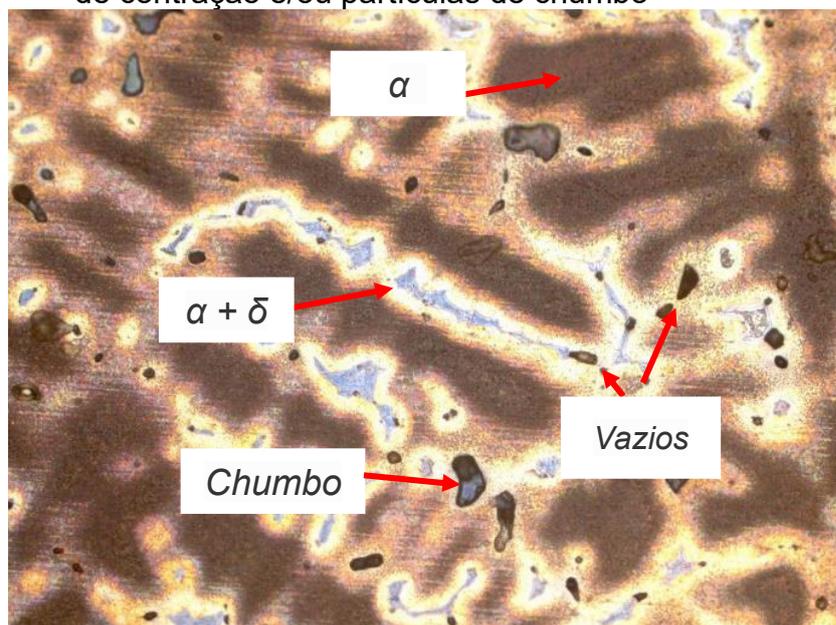
Durante as análises realizadas, observou-se que a microestrutura da amostra da coroa de bronze era composta pela solução sólida α , com a presença do constituinte eutetóide α e δ . Além disso, foram identificados vazios e chumbo na microestrutura, como podem ser vistos e identificados nas Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 – Microestrutura da coroa de bronze com presença de fase eutetóide



Fonte: Elaborado pelo autor

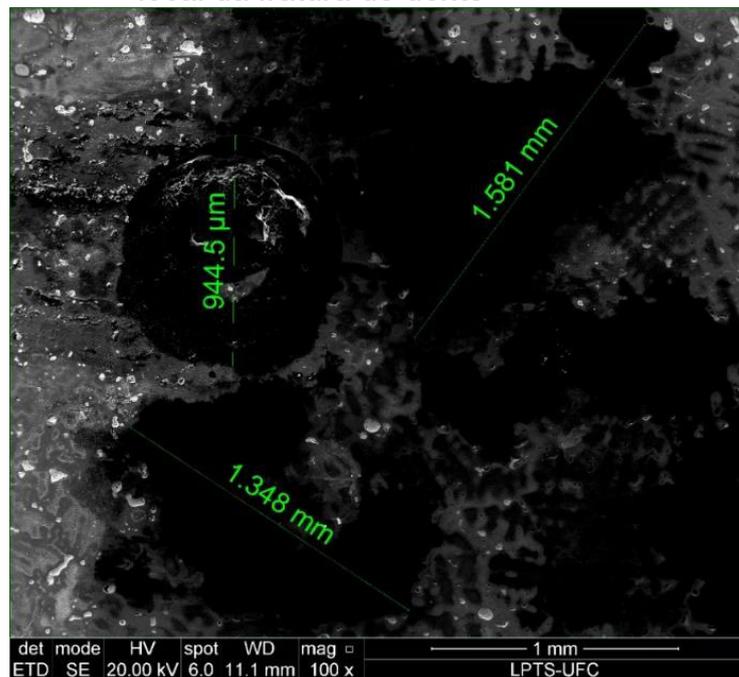
Figura 27 – As áreas pretas nessas micrografias são cavidades de contração e/ou partículas de chumbo



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise de microscopia eletrônica de varredura, a microestrutura observada próxima ao local da fratura do dente mostrou a presença de uma grande quantidade de vazios de fundição, conforme visualizado na Figura 28. Esses vazios estavam predominantemente concentrados nos limites dos grãos e podem ter contribuído para a natureza da falha. O tamanho desses vazios variou na faixa de 0,9 a 1,58 mm.

Figura 28 – Vazios observados na microestrutura próxima ao local da fratura do dente



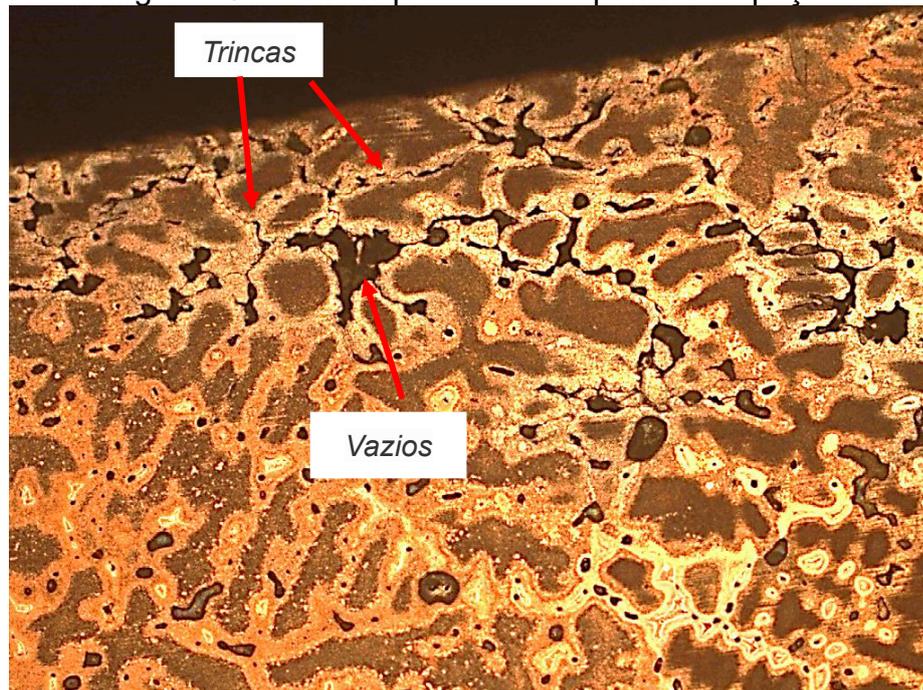
Fonte: Elaborado pelo autor

Durante a análise microestrutural, também foram identificadas trincas em diversos locais da peça. Essas trincas podem ser observadas com detalhe na Figura 28 que destaca a presença e extensão.

As trincas, claramente visíveis nas imagens microscópicas, demonstram uma tendência de se propagar na estrutura do material. Além disso, é possível observar a proximidade e interação das trincas com os glóbulos de chumbo distribuídos na microestrutura, em ampliação na Figura 30.

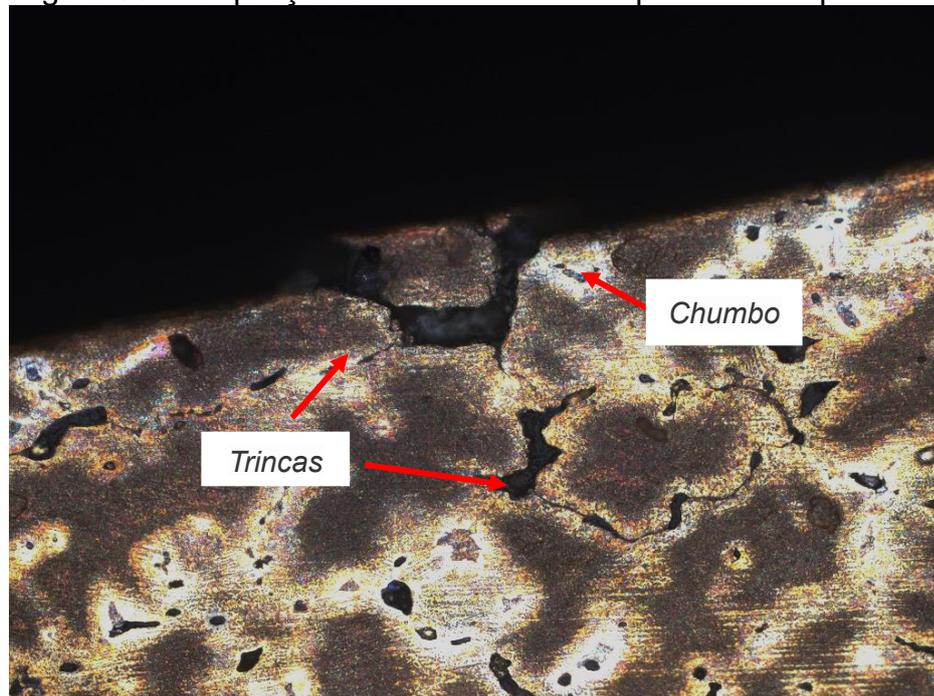
Ruusila et al., (2013), afirma que a presença de vazios favorece uma rápida nucleação e propagação de microfissuras, o que leva a um alto desgaste.

Figura 29 – Trincas próximas à superfície da peça



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Ampliação do detalhe da trinca próxima a superfície.



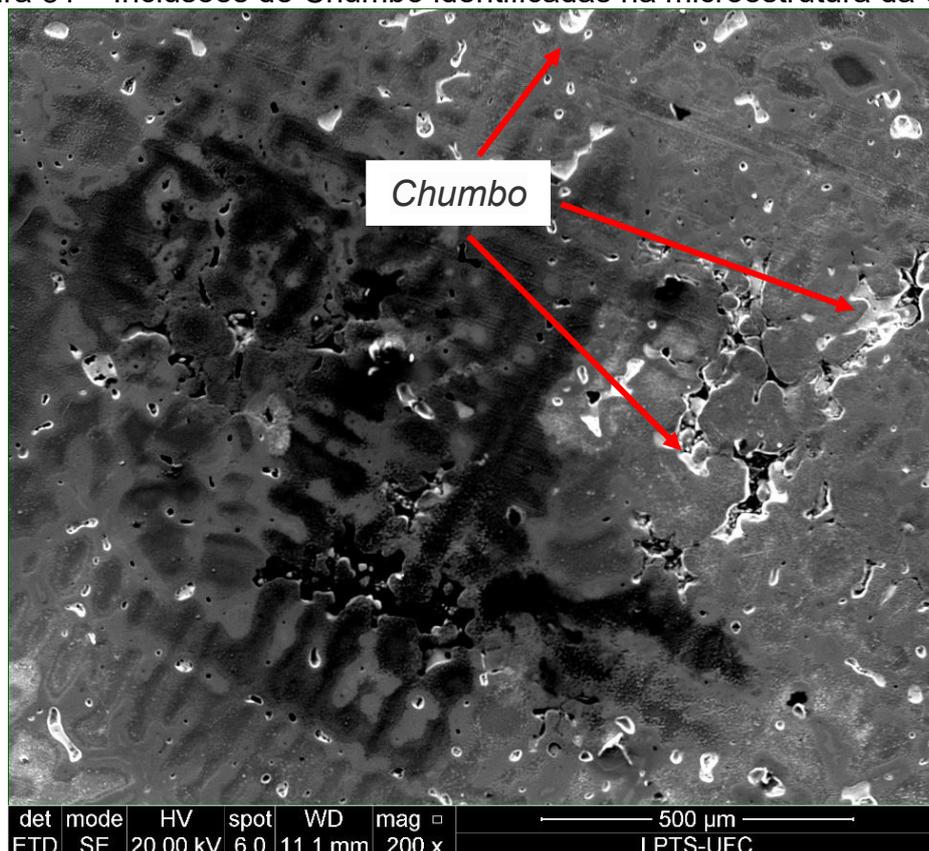
Fonte: Elaborado pelo autor

A interação entre a trinca e o chumbo pode ser entendida pelo fenômeno em que o chumbo é praticamente insolúvel em cobre (NIELSEN, 2023b; SCOTT, 2001b). Logo, a adição de chumbo ao cobre resulta em uma estrutura com chumbo livre distribuído pela liga na forma de glóbulos (SCOTT, 2001a).

Conforme estudou Prasad et al (1996), os limites interfaciais entre os glóbulos de chumbo e a matriz de cobre podem funcionar como concentradores de tensão, resultando na formação de microtrincas. Essas microtrincas se propagam rapidamente e, eventualmente, causam fraturas, resultando em taxas de desgaste aceleradas.

A Figura 31 mostra uma imagem da peça retirada da coroa obtida via microscópio eletrônico de varredura, onde se observa presença nos glóbulos de chumbo na microestrutura, identificadas pelas setas.

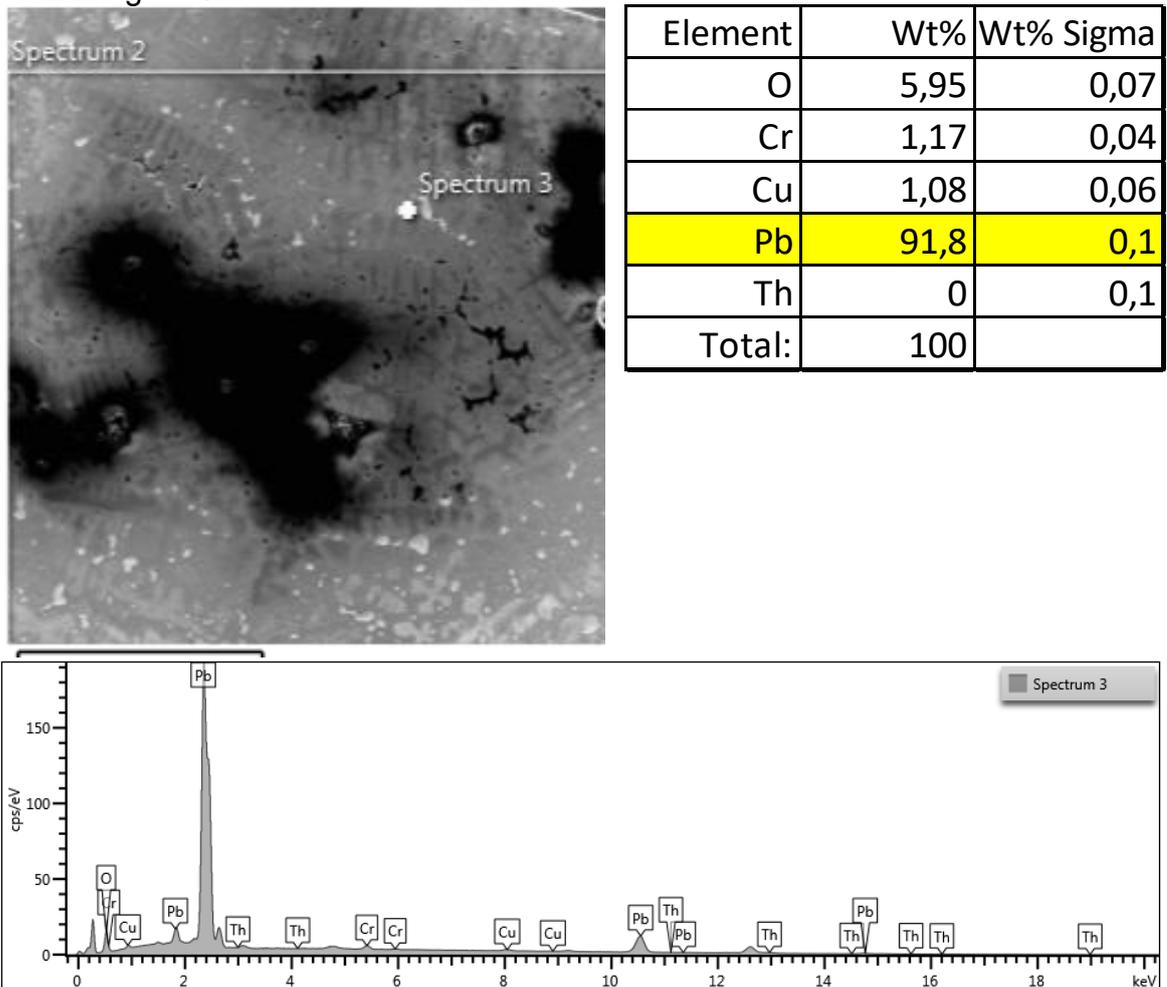
Figura 31 – Inclusões de Chumbo identificadas na microestrutura da coroa



Fonte: Elaborado pelo autor

Para confirmar a presença de partículas de chumbo na amostra analisada foi realizada a análise química feita pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) em MEV, que permitiu avaliar, pontualmente, a composição química de uma fase constituinte da amostra, conforme resultado do *spectrum 3*, mostrado na Figura 32, uma partícula rica em chumbo (Pb), com percentual de 91,8%.

Figura 32 – Análise de EDS realizada em amostra retirada da coroa



Fonte: Elaborado pelo autor

5. CONCLUSÃO

- A amostra da liga C90700 não está em conformidade com os requisitos da norma ASTM B505 em relação aos teores de cobre e chumbo. A composição química inadequada na forma de pequenos glóbulos de chumbo contribuiu para a propagação de microtrincas interdendríticas e gerou uma falha pelo modo de desgaste abrasivo severo.
- A presença de vazios observados na microestrutura pelas técnicas de microscopia, devido ao processo de fundição atua como concentradores de tensão, favorecendo a iniciação de microtrincas por fadiga e o desgaste acentuado na peça, corroborando com o modo de falha.
- As durezas obtidas na seção transversal do dente indicam que as propriedades mecânicas do material estão abaixo do sugerido pelo padrão ASTM B427-93a para fundições de liga de bronze de engrenagem.
- Para obter resultados satisfatórios na fabricação desse tipo de componente mecânico, é recomendado realizar o controle de padrões de composição química conforme normas indicadas para garantir a qualidade do material e ajustar o processo de fundição para minimizar a formação de vazios.
- A engrenagem não atendeu às especificações de materiais da ASTM 505 e ASTM 243 para essa aplicação, influenciando significativamente a falha final.
- Recomenda-se a implementação de um programa de manutenção preventiva para engrenagens, que envolve inspeções visuais regulares para identificar desgaste e danos, inspeção dimensional para verificar as tolerâncias, análise do lubrificante para identificar partículas de desgaste e contaminação e termografia para detectar variações anormais de temperatura.

REFERÊNCIAS

- ALBAN, L. E. **Systematic Analysis of Gear Failures**. [s.l.] American Society for Metals, 1985.
- ALMEIDA, J. C. DE; LIMA, K. F. DE; BARBIERI, R. **Elementos de máquinas: Projeto de sistemas mecânicos**. [s.l.] Editora Blucher, 2022.
- AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. **AGMA 1010-F14 - Appearance of Gear Teeth - Terminology of Wear and Failure**, 2020. Disponível em: <<http://www.agma.org>.>
- ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook Volume 15: Casting**. ASM International ed. [s.l: s.n.].
- BUDYNAS, R. G.; Nisbett, J. Keith. (2011) **Elementos de Máquinas de Shigley 8. ed.** São Paulo: McGraw-Hill.
- BALDAM, R. DE, L.; VIEIRA, E. A. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. 2014.
- BEARDMORE, R. **Worm Gears**.
- BONFIGLIOLI RIDUTTOR. **Gear Motor Handbook**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 1995.
- CHILDS, P. R. N. **Mechanical Design Engineering Handbook**. Em: **Mechanical Design Engineering Handbook**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 439–458.
- COLLINI, L. **COPPER ALLOYS – EARLY APPLICATIONS AND CURRENT PERFORMANCE – ENHANCING PROCESSES**. [s.l.] InTech, 2012.
- CUNHA, R. C. **ANÁLISE DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DE UM REDUTOR DE VELOCIDADE ATRAVÉS DA TÉCNICA DE PARTÍCULAS DE DESGASTE NO ÓLEO LUBRIFICANTE AUXILIADA PELA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES**. [s.l: s.n.].
- DAVIS, J. R. (JOSEPH R.). **Gear Materials, Properties, and Manufacture**. [s.l.] ASM International, 2005a.
- DAVIS, J. R. (JOSEPH R.). **Gear materials, properties, and manufacture**. [s.l.] ASM International, 2005b.
- FENG, Ke et al. A review of vibration-based gear wear monitoring and prediction techniques. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 182, p. 109605, 2023.
- FONTANARI, V. et al. Tribological behavior of the bronze-steel pair for worm gearing. **Wear**, v. 302, n. 1–2, p. 1520–1527, abr. 2013.
- HENCKENS, M. L. C. M.; WORRELL, E. Reviewing the availability of copper and

nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121460, 10 ago. 2020.

JABŁOŃSKA, M. et al. Thermal and structural analysis of high-tin bronze of chemical composition corresponding to the composition of the singing bowl. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 137, n. 3, p. 735–741, 15 ago. 2019.

JANGRA, D.; MUZAKKIR, S. M. **Failure Modes and Effect Analysis of Gear Pair**SPECIAL EDUCATION. [s.l: s.n.].

KACALAK, W. et al. Worm gear drives with improved kinematic accuracy. **Materials**, v. 14, n. 24, 1 dez. 2021.

LESKO, J. **Design industrial: guia de materiais e fabricação**. [s.l.] Blucher, 2012.

MACHADO, G. A. A. **Eficiência de uma transmissão automotiva e do comportamento tribológico em regimes de lubrificação aplicados à engrenagens automotivas**. [s.l: s.n.].

MATESO, V. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. **Análise de solidificação para o projeto de molde e as relações com as propriedades mecânicas na fundição da liga de latão 60/40**, 2006.

NIELSEN, W. D. Metallurgy of Copper-Base Alloys. 2023a.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. [s.l.] bookman editora, 2013.

OSAKUE, E. E.; ANETOR, L. A Contact Stress Capacity Model for Cylindrical Wormsets. **FME Transactions**, v. 50, n. 1, p. 1–15, 2022.

PERUCH, F. **ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DO DEGRASTE POR DESLIZAMENTO ENTRE AS LIGAS DE BRONZE SAE 67 E SAE 841** Wellison Rodrigues da Cruz1. [s.l: s.n.].

PRASAD, B. K.; PATWARDHAN, A. K.; YEGNESWARAN, A. H. **Dry sliding wear characteristics of some zinc-aluminium alloys: a comparative study with a conventional bearing bronze at a slow speed**WEAR ELSEVIER wear. [s.l: s.n.].

PRASAD, B. K.; PATWARDHAN, A. K.; YEGNESWARAN, A. H. **Dry sliding wear characteristics of some zinc-aluminium alloys: a comparative study with a conventional bearing bronze at a slow speed**WEAR ELSEVIER wear. [s.l: s.n.].

RADZEVICH, S. P. **Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture**. Third edition / Stephen P. Radzevich. | Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.: CRC Press, 2016.

RADZEVICH, S. P. **Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture**. Boca Raton: CRC Press, 2021.

REXNORD INDUSTRIES GEAR GROUP. FAILURE ANALYSIS GEARS-SHAFTS-

BEARINGS-SEALS. 1978.

RUUSILA, V. et al. The effect of microstructure and lead content on the tribological properties of bearing alloys. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 227, n. 8, p. 878–887, ago. 2013.

SCOTT, W. W. **ASM Specialty Handbook ® Copper and Copper Alloys**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.asminternational.org>.

SCOTT, W. W. **Copper and Copper Alloys**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.asminternational.org>.

STARZHINSKII, V. E. et al. Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention. **Journal of Friction and Wear**, v. 29, n. 5, p. 340–353, out. 2008.

STIPKOVIC FILHO, M. **Engrenagens - Geometria e Projeto**. 2ª edição ed. [s.l.] LTC, 2017.

TAO, Z. et al. **Failure Analysis of Worm Gear in Worm Transmission**. Journal of Physics: Conference Series. **Anais...**IOP Publishing Ltd, 13 jul. 2021.

VERTEL, J. L. C.; COGOLLO, J. A. DE O. **MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO UNS A906061, DEL BRONCE UNS C90700 Y DEL LATÓN UNS C38500**. Montería, Córdoba: [s.n.].

Chongqing Jiangxing Tools, **Worm Wheel Hob**. Disponível em: <https://www.jiangxinggongju.com/en/News/50.html>. Acesso em: 10 jul. 2023.