UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE FALHAS E SIMULAÇÃO DE UM EIXO EXCÊNTRICO DE BRITADOR DE MANDÍBULAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FERNANDO JACQUES DALL'AQUA

RIO GRANDE, RS
2025

FERNANDO JACQUES DALL'AQUA

ANÁLISE DE FALHAS E SIMULAÇÃO DE UM EIXO EXCÊNTRICO DE BRITADOR DE MANDÍBULAS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Gustavo Mendes Platt
Coorientador: Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

RIO GRANDE, RS
2025

D145a Dall'Aqua, Fernando Jacques
Análise de falhas e simulação de um eixo excêntrico de britador de mandíbulas / Fernando Jacques Dall'Aqua. – 2025.
66 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientador: Dr. Gustavo Mendes Platt.
Coorientador: Dr. Jorge Luis Braz Medeiros.

1. Engenharia Mecânica. 2. Elementos de máquinas. 3. Eixos. 4. Resistência dos materiais. I. Platt, Gustavo Mendes. II. Medeiros, Jorge Luis Braz. III. Título.

CDU 621

Catalogação na fonte: Bibliotecário Clériston Ribeiro Ramos CRB10/1889

Ata n° **09/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e nove dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dez horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **FERNANDO JACQUES DALL'AQUA**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Engenharia de Soldagem e Materiais, com o seguinte título: **ANÁLISE DE FALHAS E SIMULAÇÃO DE UM EIXO EXCÊNTRICO DE BRITADOR DE MANDÍBULAS**, sob a orientação de Gustavo Mendes Platt e coorientação de Jorge Luís Braz Medeiros. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Gustavo Mendes Platt, Luciano Volcanoglo Biehl e o convidado Ivan Napoleão Bastos sob a presidência do Professor Gustavo Mendes Platt. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Gustavo Mendes Platt: APROVADO
2. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
3. Ivan Napoleão Bastos: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

gov.br Documento assinado digitalmente
GUSTAVO MENDES PLATT
Data: 01/09/2025 09:31:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

1. _____
CPF: 044.087.637-05

gov.br Documento assinado digitalmente
LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 01/09/2025 10:34:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

2. _____
CPF: 575.195.100-00

gov.br Documento assinado digitalmente
IVAN NAPOLEAO BASTOS
Data: 01/09/2025 09:34:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

3. _____
CPF: 553.306.906-25

gov.br Documento assinado digitalmente
FERNANDO JACQUES DALL AQUA
Data: 01/09/2025 10:55:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Fernando Jacques Dall'Aqua: _____

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação ao meu filho, Antônio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e por me conceder forças para enfrentar e superar esta caminhada acadêmica.

À minha esposa, Miriam Albanus, pelo amor, compreensão, incentivo constante e paciência em todos os momentos.

Aos meus pais, Renato e Maria do Carmo, pelo apoio incondicional, sempre foram base sólida na minha formação pessoal e profissional.

Ao meu irmão, Marcelo, pela amizade e orientação ao longo desta trajetória.
Ao meu tio, Paulo, pela compreensão e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus sogros, Cezar e Regina, pelo incentivo e pela confiança no meu potencial.

Ao Prof. Dr. Jorge Braz e Prof. Dr. Gustavo Platt, pela orientação técnica, disponibilidade, contribuições valiosas que enriqueceram esta pesquisa e imenso incentivo para finalizar esta etapa acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio institucional e fomento à pesquisa.

À Universidade Federal do Rio Grande (FURG), pela oportunidade de formação acadêmica e pelos recursos oferecidos para o desenvolvimento deste trabalho.

“Clean your room!” - Jordan Peterson

RESUMO

Os elementos de máquinas são componentes essenciais para que os equipamentos cumpram satisfatoriamente suas funções operacionais. Seus projetos devem ser desenvolvidos conforme aplicação específica e requerem controle rigoroso das etapas de fabricação. Em todas as etapas de fabricação de metais existem efeitos térmicos e mecânicos que podem gerar tensões residuais que influenciam no desempenho final dos diversos componentes. Os eixos têm a função de transmitir movimentos e suportar cargas rotativas. Ainda que as metodologias e tecnologias de análise de falha tenham evoluído de forma significativa nas últimas décadas, ainda existem severas lacunas de conhecimento sobre as inúmeras condições que levam à ruptura prematura dos eixos. Estas lacunas são mais intensificadas em aplicações como em britadores onde efeitos de vibrações, impacto, dissipação de calor e contaminação por partículas estão presentes. Neste estudo foi desenvolvido um sistema de avaliação associando análise de falha convencional e análise por elementos finitos de eixos de britadores de mandíbulas. Foram considerados os efeitos da composição química, conformação mecânica (laminação), usinagem, tratamento térmico e alívio de tensões. Também foram analisadas condições de contornos como nível de empenamento original, microestrutura, propriedades mecânicas e tensões residuais. Os resultados demonstraram que a utilização de eixos brutos de laminação, sem aplicação de tratamentos térmicos de homogeneização do tamanho de grão austenítico tem enormes consequências na ruptura por fadiga em eixos de britadores. Esta condição gera inúmeras regiões com tensões de tração que se caracterizam como facilitadoras de nucleação de microtrincas e trincas que evoluem para falhas com características catastróficas.

Palavras-Chave: Eixos; Aços Baixa Liga; Falha; Britadores.

ABSTRACT

Machine elements are essential components for equipment to perform their operational functions satisfactorily. Their design must be adapted to applications and require systematic and meticulous control over the manufacturing stages. Throughout these stages of metal manufacturing, thermal and mechanical effects can generate residual stresses that influence the final performance of components. Shafts are responsible for transmitting motions and supporting components with rotating loads. Even though failure analysis methodologies and technologies have evolved significantly in recent decades, there are still severe knowledge gaps regarding the conditions that lead to premature shaft failures. These gaps are critical in applications such as crushers, which are subjected to vibration, impact, heat dissipation and particle contamination. This study developed an evaluation system integrating conventional failure analysis and finite element analysis of jaw crusher shafts. The investigation considered the effects of chemical composition, mechanical forming (rolling), machining, heat treatments and stress relief. Contours conditions such as initial warping level, microstructure, mechanical properties, and residual stress were also analyzed. The results demonstrated that using raw rolled shafts, without applying heat treatments for austenitic grain size homogenization, has enormous consequences on fatigue failure in crusher shafts. This condition generates tensile stresses zones which are characterized by facilitating the nucleation of microcracks and cracks that evolve into failures with catastrophic characteristics

Keywords: Shafts; Low Alloy Steels; Failure; Crushers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Eixos excêntricos avariados.....18

Figura 2 - Vista lateral de um britador de mandíbulas.....21

Figura 3 - Processo de forjamento a quente 25

Figura 4 - Gráfico tensão x deformação. 29

Figura 5: Características típicas a estrutura, tipos de macrosegregação e outros defeitos de um lingote. 31

Figura 6 - Vista explodida do rebritador 34

Figura 7 - Especificações do rebritador MR-832 34

Figura 8 - Dimensões principais do eixo excêntrico em metros. 36

Figura 9 - Método Constraint entre pontos de referência e superfícies.....36

Figura 10 - Condições de contorno Displacement/rotation.....37

Figura 11 - Condições de contorno aplicadas ao eixo.....38

Figura 12 - Ordenação dos nós em elementos com 8 nós.....38

Figura 13 - Fluxograma Metodológico.....39

Figura 14 - Microestruturas junto à superfície. Corte longitudinal (a) e corte transversal no núcleo (b). 41

Figura 15 - Comportamento de microdureza junto ao início da falha em direção ao núcleo.....42

Figura 16 - Micrografia da fratura do eixo. Verifica-se elementos concentradores de tensão, microtrincas e microalvéolos coalescidos. 43

Figura 17 - Microsonda EDS do substrato do aço SAE 8640. Elementos de liga e carbono apresentam-se sem anomalias no perfil semiquantitativo e qualitativo da microssonda EDS.....44

Figura 18 - Locais de avaliação para refinamento da malha.....45

Figura 19 - Resultados normalizados com relação aos valores da malha mais grossa dos parâmetros mecânicos. 46

Figura 20 - A direita o desenho do eixo com ressalto (49mil elementos) e a esquerda eixo sem ressalto (18mil elementos). 47

Figura 21: Elementos selecionados para análise de tensão Von Mises para as diferentes simulações. Vista localizada do ressalto. 48

Figura 22- Distribuição de tensão sobre o eixo. 49

Figura 23: Corte longitudinal. 50

Figura 24: Corte transversal na seção mais solicitada, simulação com 132 mil elementos. 50

Figura 25: Corte transversal na seção mais solicitada, simulação com 8 mil elementos. 51

Figura 26. Imagem superior (a), distribuição de tensão simulada. Inferior (b), eixo avariado. 51

Figura 27: Tensão VM-tempo de um elemento selecionado de região de maior solicitação 53

Figura 28: Tensões normais-Tempo de um elemento selecionado de região de maior solicitação 54

Figura 29: Tensões cisalhantes-tempo de um elemento selecionado de região de maior solicitação 55

Figura 30 - Gráfico tensão x deformação 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química do eixo 40

Tabela 2 - Valores absolutos de propriedades para convergência de malha.....46

Tabela 3: Fatores de Marin. 56

LISTA DE ABREVIATURAS

SMB	Setor Mineral Brasileiro
BM	Britador de Mandíbulas
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração Mineral
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	Society of Automotive Engineers
DEM	Modelagem de Elementos Discretos
CSS	Closed Side Setting (Configuração do Lado Fechado)
HSI	Britador de Impacto Horizontal
MEF	Método dos Elementos Finitos
OM	Microscópio Óptico
SEM	Scanning Electron Microscopy
FIB	Focused Ion Beam
ANN	Redes Neurais Artificiais
TTT	Total time on test

SUMÁRIO

1 JUSTIFICATIVA DO TEMA 16

2 OBJETIVOS 19

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 19

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20

3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE BRITADORES DE MANDÍBULAS 20

3.2 EIXOS 23

3.3 PROCESSO DE MANUFATURA DOS EIXOS. 24

3.4 CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES NOS EIXOS 25

3.5 MODOS DE FALHA DE EIXOS 27

3.6 ANÁLISES NUMÉRICAS 28

3.7 AÇOS FUNDIDOS APLICADOS EM EIXOS 31

3.8 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 33

4 MATERIAIS E MÉTODOS 34

4.1 ANÁLISE QUÍMICA 35

4.2 VERIFICAÇÃO MICROESTRUTURAL 35

4.3 DETERMINAÇÃO DAS MICRODUREZA 35

4.4 ANÁLISE DE FALHA 35

4.5 ANÁLISE POR ELEMENTO FINITOS 35

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 40

5.1 ANÁLISE QUÍMICA 40

5.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL 41

5.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA 42

5.4 ANÁLISE DE FALHA 43

5.5 ANÁLISE NUMÉRICA 44

5.5.1 CONVERGÊNCIA DE MALHA 44

5.5.2 ANÁLISE DE TENSÕES 49

5.6 ANÁLISE DE FADIGA 56

6 CONCLUSÕES 57

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 58
8 REFERÊNCIAS 59
8.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS 59
8.2 REFERÊNCIAS POR ESTRATO 64
8.3 REFERÊNCIAS POR DATA 65
8.4 REFERÊNCIAS POR QUALIS 66

1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

O setor mineral brasileiro (SMB) é um importante setor da economia nacional, pois o país possui vastas reservas e ocupa uma importante posição no comércio mundial de commodities minerais. No ano de 2024, o setor totalizou um faturamento de R$ 270,8 bilhões (excluindo petróleo e gás), as exportações minerais alcançaram US$ 43,4 bilhões e o saldo comercial mineral de US$ 34,9 bilhões representou 47% do saldo comercial brasileiro [1] Em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) do país, o SMB representa cerca de 3% [2].

No mesmo período, a arrecadação foi de R$86 bilhões, com a Compensação Financeira de Exploração Mineral (CFEM) sendo recolhida em 2.805 municípios, o que representa metade das cidades do país. Atualmente, existem mais de 7.300 empresas e microempreendedores individuais, gerando mais 221 mil empregos, diretamente, e 2,5 milhões ao longo da cadeia produtiva. São 93 tipologias mineiras produzidas, sendo as principais: minério de ferro, minério de ouro e minério de cobre, representando 59,35%, 8,81% e 7,49%, respectivamente, na participação no faturamento do setor [1].

Apesar de sua importância, a indústria da mineração tem um histórico de ter programas de manutenção menos avançados comparada a outros setores industriais. As atividades de manutenção têm como objetivo reduzir as paradas inesperadas e melhorar o desempenho operacional [3]. As interrupções resultam em perda de produção, custos adicionais com manutenção e reparos, e potencialmente impactam os prazos de entrega do produto. Em média, os custos de manutenção de equipamentos flutuam entre 40 e 70% das despesas de instalação de 20 a 60% das despesas operacionais [4, 5].

No processo de cominuição, os britadores de mandíbulas (BM) têm papel fundamental na etapa primária da fragmentação do minério, que é transportado diretamente da mina para o equipamento, normalmente por caminhões. Desta maneira, o britador de mandíbula é alimentado por minério de granulometria variada. Sua operação contínua e eficiente é vital para garantir a fluidez do ciclo de produção e para minimizar os custos operacionais [6].

O britador de mandíbulas é uma máquina concebida há mais de cem anos. Seu princípio de funcionamento é fragmentar o material entre duas mandíbulas, uma

estática e outra em movimento. Esse deslocamento é devido a um eixo excêntrico (Figura 1) que é rotacionado através de um sistema de polias e correias ligadas a um motor, geralmente elétrico. Portanto, é de extrema importância para o funcionamento do britador que o eixo excêntrico seja devidamente projetado e fabricado, pois uma falha no eixo ocasiona a paralisação da máquina e, por consequência de todo processo de beneficiamento. Além da parada inesperada de produção ocasionando uma menor eficiência na operação de mineração, uma falha no eixo ocasiona um dispêndio em manutenção elevado, pois requer mão de obra especializada para a retirada e desmontagem. A produção de um eixo específico para um britador pode demorar mais de 30 dias, pois depende da disponibilidade de material, processos de usinagem e tratamento térmicos e deslocamento ao local. Por fim, o processo de montagem é demorado, pois envolve peças pesadas e requer perícia para não ocorrer danos e acidentes durante o evento.

Figura 1 - Eixos excêntricos avariados.

Fonte: Autor (2025)

Considerando o papel essencial do eixo excêntrico no processo de beneficiamento do minério e os custos que uma falha pode acarretar para empresa, esse trabalho pretende estudar seu processo de fabricação e os tratamentos térmicos envolvidos, o projeto mecânico, incluindo desenho até a escolha do material adequado. Além disso, se buscará investigar possíveis causas de falhas e propor soluções para mitigá-las.

2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo avaliar o material utilizado no eixo excêntrico de um britador de mandíbulas, o aço SAE 8640, que foi avariado.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar composição química do material, assim como sua microestrutura e teste de dureza.
- Analisar por MEV (microscopia eletrônica por varredura) para classificar tipo de fratura.
- Realizar simulação de elementos finitos para analisar comportamento mecânico do eixo excêntrico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

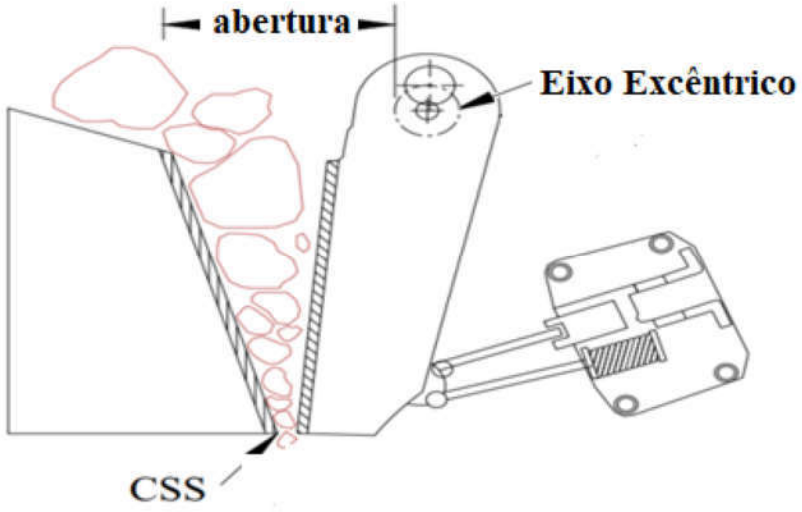
3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE BRITADORES DE MANDÍBULAS

Britadores de mandíbulas (BM) são essenciais na indústria de agregados, são máquinas que reduzem o tamanho do minério proveniente do sítio de detonação. Sua capacidade de produção pode variar de 30 a 1200 ton/hora. Apesar de ter sido inventado há mais de cento e setenta e cinco anos, seu projeto ainda é objeto de estudos. Com intuito de melhorar performance, foram desenvolvidos modelos numéricos de um britador para investigar melhorias no seu desenho avaliando o comportamento da capacidade produtiva e energia consumida para diferentes tamanhos de materiais na entrada. Utilizou-se princípios da cinemática do escoamento para modelagem e pretende futuramente ser calibrado para seus resultados serem validados [6]. Também se investigou a análise dinâmica e identificação do caso de um BM de pêndulo composto com folga nas juntas. O estudo estabelece um modelo dinâmico do mecanismo de funcionamento do BM utilizando o método dos multiplicadores de Lagrange e verifica sua correção por meio de simulações. Os efeitos da velocidade de acionamento e do tamanho da folga no fenômeno de choque são analisados. Conclui-se que ao aumentar a velocidade de acionamento e reduzir o tamanho de folga pode enfraquecer a intensidade do impacto, melhorar o desempenho dinâmico, aumentar a estabilidade operacional e prolongar a vida útil da fundação. Além disso, determina-se uma combinação ótima de velocidade de acionamento e tamanho da folga, fornecendo uma base teórica para otimizar a força de vibração do BM [7].

Como foco da pesquisa sobre eficiência energética, foram estudadas as causas da baixa eficiência e pesquisadas recomendações para melhor aproveitamento. Um britador em laboratório foi utilizado para testes e um método de otimização evolucionária (algoritmo genético) foi utilizado para otimizar o desempenho do britador para uma maior eficiência energética. Uma modelagem de elementos discretos (DEM) também foi desenvolvida para um caso específico da otimização. Conclui-se que o DEM é capaz de simular a cominuição de material, porém necessita-se de grande potência computacional para tal, e que algoritmos evolucionários são ferramentas capazes de otimizar a utilização do britador. Por fim, necessita-se de mais dados

experimentais para avaliar as tendências entre as variáveis observadas com maior confiança [8]. Paralelamente, foi utilizado um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS) para predizer o consumo de energia de um britador de mandíbulas. Com uma precisão de 96% em comparação com correspondentes dados de testes experimentais, o modelo conseguiu prever o consumo de energia para diferentes configurações de desempenho, com variações nos seguintes parâmetros: razão de redução do minério, abertura, material a ser fragmentado e configuração do lado fechado (CSS) (Figura 2) [9]. Por fim, investigou-se os efeitos da quantidade e tamanho do material a ser alimentado no britador em relação a intensidade de fragmentação, foi utilizado um britador em um laboratório para obter dados experimentais. Utilizando a metodologia de resposta por superfície, conclui-se que a quantidade de material na alimentação é associada com a energia consumida pelo britador, também se conclui que o tamanho do material de alimentação um é fator predominante na sua redução [10].

Figura 2 - Vista lateral de um britador de mandíbulas



Fonte: Adaptado de Abuhasel (2019)

O produto da fragmentação também é foco de estudo, pois é importante que o material tenha uma gradação e forma adequada para sua utilização final, além das propriedades mecânicas dentro das capacidades requisitadas. A base de pavimento asfáltico foi, portanto, objeto de pesquisa, ou seja, material com mais de 90 mm de tamanho. O estudo investigou a influência da gradação de tamanho na alimentação do britador, a taxa de alimentação, velocidade e configurações do britador durante a

operação. Através de avaliações qualitativas em laboratório e análises estatísticas, conclui-se que o formato do produto é o parâmetro mais influenciado pela variação do CSS do britador; a redução na velocidade do britador aumenta o consumo de energia específico; a redução na taxa de alimentação diminui a gradação do produto e o contato entre as partículas individuais do próprio material é pré-requisito para obtenção de um produto no formato cúbico [11].

Também foram investigados diferentes tipos de minérios para britadores de mandíbulas e britadores de impacto horizontal (HSI). Uma análise gráfica e estatística foi utilizada para comparar o formato do produto fragmentado em cada britador. Entre as características de formato avaliado estão: planicidade, taxa de alongamento, fator de forma, esfericidade e textura. Os minérios avaliados foram mármore, calcário e tufo. Conclui-se que os produtos em formatos de discos são resultado, principalmente, do britador de mandíbulas enquanto o HSI produz material da forma cúbica; o tipo de minério tem importante influência na textura do material final, o mármore produzido pelo Britador de Mandíbulas (BM) tem baixa qualidade de formato, ou seja, não é cúbico [12].

Durante o processo de fragmentação, os britadores são submetidos a grandes esforços e forças de impacto de maneira não distribuída. Portanto as mandíbulas são expostas a esforços não homogêneos podendo causar deformações e falhas por fratura. As deformações na mandíbula ocasionam redução na eficiência do britador, aumentando o custo de operação. Além disso, o processo de substituição das mandíbulas, realizado após seu esgotamento, é demorado e custoso. Levando isso em conta, buscou-se otimizar o perfil da mandíbula, espessura e peso utilizando MEF no software Ansys. Os resultados da otimização chegaram a números precisos formando uma base para futuros estudos [13]. Ainda, foi realizada pesquisa com foco no desgaste da mandíbula do britador, componente composto de aço manganês (Hadfield). O desgaste abrasivo foi avaliado em duas peças com diferentes concentrações de manganês, 12 e 20%. Através de análises com Microscópio Óptico (OM), Microscopia eletrônica por varredura (MEV) e Feixe de íon focalizado (FIB) conclui-se que há um maior desgaste no componente de mandíbula fixo em relação ao componente de mandíbula móvel; altas concentrações de manganês tendem a ser mais resistentes para as mandíbulas fixas; na mandíbula móvel há uma

predominância de micro indentações enquanto na fixa, os micros mecanismos predominantes foram micro corte e micro arado [14].

A fim de melhorar o desempenho e aumentar a confiança operacional, realizou-se estudo de caso examinando as falhas do britador de mandíbulas para identificar seus componentes críticos em uma grande fábrica de processamento de minerais durante dois anos. Para análise foram utilizados diferentes métodos estatísticos, em especial TTT-plot. Conclui-se que o aumento da taxa de falhas está relacionado com o aumento do desgaste de seus componentes, indicando que a manutenção preventiva é essencial para que não ocorra nenhuma falha grave na unidade [15].

Outro desafio existente nos BM é a frequente falha de eixos excêntricos devido a carregamentos de impactos intermitentes e cíclicos. Em razão disso, foram investigados os efeitos da excentricidade do eixo na vida útil dos britadores, culminando numa otimização do projeto de eixo de forma a mitigar as frequentes falhas. Segundo histórico de falhas e tempo de vida útil de doze eixos mensurados, chegou-se à conclusão de que a razão entre o diâmetro do eixo na posição do rolamento externo e a excentricidade deve ser dez [16, 17, 18].

3.2 EIXOS

Os eixos desempenham um papel essencial em equipamentos rotativos, pois eles são responsáveis pela transmissão de movimento, torque ou momento fletor. Eles podem ser classificados pelo tipo de carregamento que estão submetidos: mandris são submetidos a flexão, eixos de transmissão ao torque e eixos rotativos suportam cargas flutuantes que abrange tanto momento fletor quanto torque ocasionando concentração de tensão [19].

A seleção do material a ser empregado no eixo depende das propriedades mecânicas requisitadas como resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste. Tratamentos térmicos são realizados para alcançar tais requisitos. Geralmente, para eixo submetidos a baixas cargas o aço carbono comum é utilizado. Já as ligas metálicas de médio e baixo carbono são utilizadas em caso de eixos submetidos a altas cargas. Enquanto ferro fundido dúctil e outros ferros fundidos de alta resistência são utilizados em eixos com geometria complexa como virabrequins e eixos de comando de válvulas, isto deve-se ao bom desempenho de fundição, facilidade de

fundição em formas complexas, amortecimento de vibrações e baixa sensibilidade à concentração de tensões.

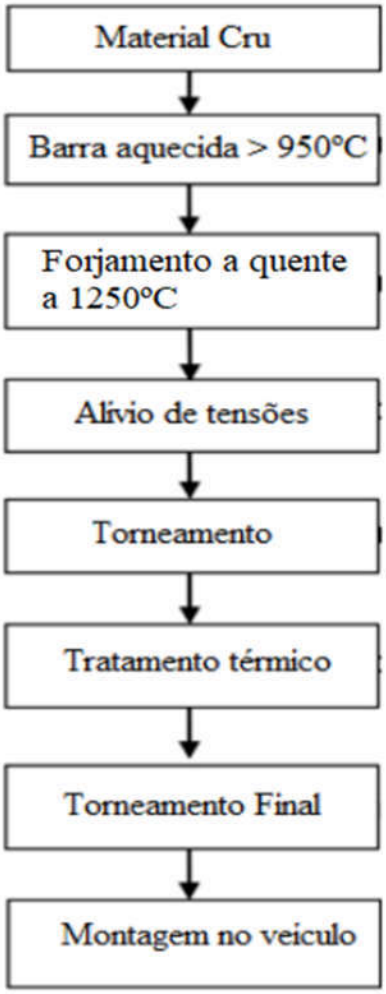
Geralmente ocorre o tratamento térmico de revenido, sendo em alguns casos somente necessário normalização da peça. Para eixos com especificações mais elevadas, tratamento superficiais e químicos, como nitretação e cementação são necessários.

As condições do ambiente de trabalho no qual o eixo é exposto é de extrema importância, pois podem alterar propriedades do material, degradando quimicamente, ou modificar geometria e carregamento submetido levando a uma falha. Para identificação destas falhas muitas técnicas são utilizadas: análise metalográfica, ensaios não destrutivos, inspeção microscópica, inspeção de fraturas e muitas outras.

3.3 PROCESSO DE MANUFATURA DOS EIXOS.

Os eixos de aço podem ser fabricados usando diferentes métodos. Um método convencionalmente utilizado para fabricação de eixo de entradas automotivas é o processo de forjamento a quente (Figura 3). Este processo é geralmente utilizado em eixos com dentes de engrenagens devido ao grau de deformação, à disponibilidade da capacidade da prensa e às variações de diâmetro. O processo se inicia pela escolha do material bruto, o tarugo é , então, aquecido além de 950ºC para ser forjado a quente, após ocorre um alívio de tensão e usinagem. Para se obter resistência mecânica para a peça suportar os diferentes tipos de carregamento durante uso, é feito um tratamento térmico para, enfim, ocorrer a usinagem final onde a peça é ajustada geometricamente para ser montada na devida máquina. [20].

Figura 3 - Processo de forjamento a quente



Fonte: Adaptado de Magendran (2017)

Atualmente, considerando novas tecnologias, o processo de forjamento a frio vem sendo objeto de pesquisa. As vantagens seriam um produto com melhores propriedades mecânicas, custo-benefício e ambientalmente mais favorável. [20].

3.4 CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES NOS EIXOS

No projeto de máquinas, componentes cilíndricos são utilizados para transmitir movimento rotacional. Os eixos são responsáveis pela rotação de diversos componentes acoplados e transmitem torque entre eles. Em muitos casos os eixos sofrem mudança de diâmetro para um acoplamento ideal com outra peça, essa mudança de diâmetro forma geometrias chamadas de ombros ou ressaltos.

Nessa região ocorre uma concentração de tensão, de forma que esses ressaltos são arredondados com intuito de reduzir a concentração de tensão. Foi publicado um estudo com fatores de concentração formados sob carregamentos de tração, torção e flexão em eixos de ombros filetados [21]. Na década de noventa este estudo foi reavaliado, tendo sido realizado um trabalho sobre a distribuição de tensão nos ombros de eixos submetidos à tração e torção, através do método de elementos finitos (MEF) investigou-se raios de entalhes. Da análise, calculou-se fatores de concentração de tensão (K_t), os quais foram comparados com a literatura vigente. Conclui-se que os K_t para torção são similares, porém para tração os valores excederam em 30% em relação ao primeiro estudo explica-se que a metodologia utilizada por anteriormente não foi conservadora. Por fim, recomenda-se a publicação de resultados confiáveis produzidos pelo MEF para aumentar a precisão e a quantidade de dados na literatura [22].

Posteriormente, uma nova reavaliação dos fatores de concentração de tensão foi realizada, tendo sido analisada detalhadamente através do método de elementos finitos em uma ampla gama de geometrias de eixos com filetes para definir três relações úteis para cargas de flexão e tensão. A análise referiu-se aos fatores de concentração de tensão elástica revisados, aos fatores de concentração de tensão equivalente de Von Mises elástica revisados e ao local de tensão máxima no filete. As primeiras duas relações revelaram o estado completo de tensão e deformação multiaxial elástica na localização de tensão máxima. Foi verificado que a influência da geometria na localização de tensão máxima pode ser útil para determinação experimental de deformação ou monitoramento da nucleação de trincas por fadiga. Foram apresentados gráficos atualizados para uma gama mais ampla de geometrias, que proporcionaram maior precisão e ofereceram vantagem adicional de identificar o local da tensão máxima no filete. Os resultados de elementos finitos foram validados em relação a valores publicados na literatura para várias geometrias e com dados experimentais limitados [23].

Já nesta década, utilizou-se os dados de estudos anteriores para criar um modelo em MEF, e uma geometria em 3D foi criada para realizar análises paramétricas a partir de resultados de estudos anteriores, cujos valores obtidos foram considerados similares. Após, modelos de redes neurais artificiais (ANN) foram desenvolvidos para determinação dos fatores de concentração de tensão para um de

acordo com a especificidade do eixo [24]. Também foram revisitadas as tabelas de fatores de concentração de tensão utilizando uma MEF, e foi proposto um formato elíptico para atenuar a tensão nos filetes dos eixos [25].

3.5 MODOS DE FALHA DE EIXOS

Neste subcapítulo o trabalho de Hou et al. [19] é fonte única, pois ele realizou um trabalho de revisão de mais de 20 anos de pesquisas desenvolvidas sobre análise de falhas em eixo, concluindo que o mecanismo de falha mais comum é a fratura por fadiga devido aos ciclos de cargas. Os modos de falha de um eixo foram classificados de acordo com as características morfológicas e externas, eles são:

- Falha por fratura:

A fratura pode ser dúctil ou frágil e, também, podem coexistir. A fratura dúctil apresenta deformação plástica devido a uma tensão nominal superior à tensão de escoamento. A fratura dúctil pode ser plana ou inclinada e apresenta uma superfície fibrosa e zonas de cisalhamento. Medidas preventivas à fratura frágil são: reduzir a concentração refazendo o projeto; selecionar material adequado; melhorar processo de fabricação para reduzir tensões residuais e prevenir de operações com excesso de carga.

Fratura frágil refere-se a fratura abrupta, sem deformação plástica. A superfície de fratura, nestes casos, é plana e perpendicular à tensão normal. Fratura frágil se divide em fratura transgranular e intergranular. Entre outras causas, um tratamento térmico inadequado pode resultar uma excessiva dureza. Como prevenção, materiais com alta tenacidade podem ser selecionados, redução de concentração de tensões, além de um tratamento térmico com alta qualidade que deve ser realizado.

- Falha por fadiga:

Definida como uma fratura devido a carregamento cíclico, a falha por fadiga é devido a um efeito cumulativo e é o modo de falha mais comum para eixos. Ela ocorre com níveis de tensões abaixo da tensão de escoamento do material. Ela se inicia com trincas em locais de concentração de tensão que se propagam com os ciclos devido a tensões alternativas até reduzir a área transversal mínima que acaba se rompendo de maneira abrupta.

- Falha por corrosão:

Este tipo de falha deve-se a exposição da peça a ambientes corrosivos, ocasionando interações químicas e eletroquímicas que modificam as propriedades mecânicas do material. Uma corrosão uniforme ao longo do material, geralmente, não é a causa de falhas. Porém, a corrosão localizada pode induzir outros danos que ocasione a falha. A corrosão por pites e fissuração por corrosão sob tensão são as mais prejudiciais.

- Falha por desgaste:

Durante a operação, deslizamentos relativos podem ocorrer entre a superfície do eixo e outros componentes a ele fixados. Esse movimento ocasiona deslocamento de material e, gradualmente, pode reduzir o tamanho do eixo gerando falhas. Falha por desgaste pode ser dividida em: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste por fretting e desgaste por fadiga de contato.

- Falha por deformação:

Processo que ocorre gradualmente não é tão catastrófico quanto aos outros tipos de falhas. O eixo se deforma permanentemente devido a tensões acima da tensão de escoamento de maneira que não pode exercer a sua função específica. Para eliminar esse tipo de falha o projeto do eixo pode ser modificado, a tensão de escoamento pode ser elevada através de tratamentos térmicos ou escolha de outro material.

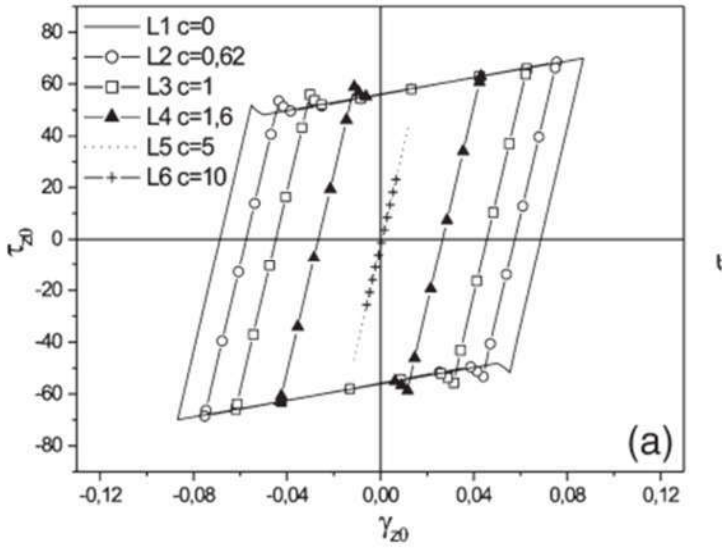
3.6 ANÁLISES NUMÉRICAS

Foi estudado o comportamento mecânico de um eixo excêntrico de um britador giratório. Determinaram-se as reações e forças exercidas sobre o eixo analítica e numericamente. Uma análise estática em elementos finitos foi conduzida para determinar a magnitude e distribuição da tensão, verificando-se que os locais de maior concentração de tensão estão nos rolamentos de suporte [26].

Também se realizou uma análise de elementos finitos de um eixo entalhado sob carregamento multiaxial não proporcional, combinando tensões de tração e torção. O comportamento elastoplástico do material foi caracterizado pelo critério de escoamento de Von Mises em conjunto com a regra de endurecimento cinemática de

Prager-Ziegler. A fim de avaliar o comportamento sob fadiga, foi feita uma análise da influência na forma como os carregamentos são aplicados, cíclica e constante. Também, a razão entre magnitude e amplitude dos componentes de tensão constante e cíclica foi avaliada. Para o caso de tensão de tração constante e torção cíclica notou-se que quanto maior a relação entre a componente constante sobre a cíclica, menor é a deformação plástica cíclica (Figura 4) [27].

Figura 4 - Gráfico tensão x deformação.



Fonte: Savaidis (2001)

Ainda, foi desenvolvida uma metodologia numérica, baseada no método dos elementos finitos, para prever o desgaste por fretting em eixos com ajuste de interferência. O modelo considera a remoção de material por desgaste segundo a abordagem energética e foi implementado no software ABAQUS, avaliando parâmetros como tamanho de malha, técnica de salto de ciclos e número de incrementos por ciclo. A validação foi realizada a partir de ensaios experimentais de fretting sob flexão rotativa, condição que impõe esforços alternados devido à rotação do eixo. Os resultados mostraram boa concordância entre as previsões numéricas e as medições experimentais da largura e profundidade da cicatriz de desgaste, confirmando a aplicabilidade do modelo para estimar o perfil do desgaste em ajustes por interferência submetidos a esse tipo de carregamento [28].

As causas de fratura em eixos motores de bombas de engrenagens também foram investigadas. No estudo foram feitas análises de dureza que resultaram em

valores acima do esperado, conclui-se que o processo de têmpera e revenimento deve ser otimizado para obtenção dos valores recomendados. Pela análise da morfologia por SEM, conclui-se pelas imagens que ocorreu uma fratura frágil no eixo. Também foram feitos cálculos teóricos que posteriormente foram comparados com resultados da análise de elementos finitos, os resultados teóricos foram mais elevados possivelmente devido às simplificações no modo como a pressão hidráulica foi representada. A influência da geometria do sulco no eixo foi estudada, quanto maior a suavidade no arco de transição do sulco menor é a tensão máxima obtida no local, obtendo-se uma redução de quase 16% do valor. Por fim, as maiores causas para a fratura são sobrecarga ou travamento do eixo durante o serviço [29].

As falhas por fadiga em eixos de um turbocompressor de um motor de caminhão fora-de-estrada também foram investigadas. Tais eixos são submetidos a carregamento cíclico de flexão o que é uma das principais causas de fratura, em alguns casos há torção constante também. Tais fraturas ocorrem na transição de diâmetro do eixo, onde existe alta concentração de tensão. Ensaios experimentais e simulações numéricas (ANSYS e MSC Fatigue) foram realizados em 8 eixos, comparando com o projeto original. Verificou-se que o carregamento torcional simultâneo diminui a vida útil em fadiga do eixo em cerca de 55%. Além disso, o raio de curvatura da transição de diâmetro influência na vida da peça. Aumentando o raio para 2 mm reduziu as tensões máximas e elevou a vida útil em 50% a 130%, dependendo da condição de carregamento [30].

Da mesma forma, avaliou-se uma metodologia de previsão de vida à fadiga baseada na abordagem deformação–vida, combinando o modelo de encruamento cinemático de Chaboche, para determinação dos campos de tensão e deformação, e o critério de Fatemi–Socie, para estimativa do número de ciclos até a falha. A validação foi realizada utilizando dados experimentais da literatura para um eixo entalhado em aço SAE 1045, ensaiado sob carregamentos combinados de flexão e torção, em fase e fora de fase. A comparação entre as vidas previstas e observadas apresentou boa correlação, situando-se dentro de uma banda de fator 3 para a faixa de baixo a alto número de ciclos (até 10^6 ciclos). Para vidas superiores a 10^6 ciclos, as previsões mostraram-se conservativas, permanecendo dentro de uma banda de fator 10 [31].

3.7 AÇOS FUNDIDOS APLICADOS EM EIXOS

Os lingotes de aço, utilizados posteriormente no forjamento de eixos, também são objetos de estudos devido às suas características como porosidade, inclusões, macrosegregações, microsegregações, cavidades de contração são relevantes para obtenção dos parâmetros mecânicos ideais no projeto final do produto (Figura 5). O controle de tais defeitos é essencial para garantir a qualidade do lingote. Simulações numéricas é um método efetivo de pesquisa para avaliar tais defeitos. Tais pesquisas têm colaborado com uma variedade de indústrias, por exemplo, a nuclear, a naval, a aeroespacial e a de máquinas industriais [32].

Modelos numéricos multifásicos têm sido propostos para simular a macrosegregação nos lingotes, principal defeito causado pela partição do soluto e convecção do fundido durante o processo de solidificação. Um modelo trifásico representado líquido, colunas de dendritos e grãos equiaxiais para simular a macrosegregação de um lingote de aço com 36 toneladas foi proposto. Equações de conservação foram utilizadas para simular o efeito de movimento das três fases. O modelo teve sucesso em prever a segregação negativa na região inferior e segregação positiva na superior, assim como outras características típicas de segregação [33].

Figura 5: Características típicas a estrutura, tipos de macrosegregação e outros defeitos de um lingote.

Fonte: Adaptado de Li, 2020.

Foi apresentada uma revisão sobre modelos que tentam prever múltiplos defeitos em lingotes de aço. O processo de solidificação de um lingote de aço envolve complexos mecanismos de transferência de calor e massa, redistribuição química e inúmeras outras etapas que tornam a produção de uma simulação algo não trivial. Os primeiros modelos analíticos de macrosegregação datam da década de sessenta, apesar de terem sido validados experimentalmente eles não consideraram o escoamento do líquido em todas as regiões do processo. Os modelos separam a região pastosa de líquido e sólido da região líquida com barreiras restritas. Os modelos contínuos baseados na teoria da mecânica contínua para fluidos vieram para tentar resolver esta simplificação. Os modelos contínuos tiveram sucesso em prever as segregações tipo A, utilizando as equações de Navier-Stokes e assumindo fluido como newtoniano e escoamento laminar. No entanto, os modelos não conseguem prever satisfatoriamente o movimento das partículas sólidas no fluido. Assim, na década de noventa uma abordagem de média volumétrica foi base para modelos multifásicos que surgiram para tentar representar as interações multiescalares entre as fases líquidas e sólidas. Os modelos iniciais tinham somente duas fases, porém com o avanço da pesquisa foi incluída novas fases representando elementos específicos objeto de estudo. Infelizmente estes modelos ficaram muito específicos e complicados para serem utilizados em escala industrial, pois além disso, eles têm um custo computacional muito alto. Os modelos multifásicos têm uma boa previsibilidade e são muito utilizados para o estudo da formação de defeitos, assim como das suas interações [34]. Apesar de não haver um modelo que preveja a formação de múltiplos defeitos, através de estudos paramétricos é possível reduzir a sua incidência e entender os mecanismos de formação [35].

Por mais avançados que sejam estes modelos, ainda não foi considerado a fragmentação de dendritos como a origem de cristais equiaxiais. O processo de fratura de dendritos ainda não foi totalmente modelado para grandes lingotes. Atualmente, se tem uma expectativa que *machine learning* consiga fazer com que estes complexos modelos sejam utilizados em escala industrial devido a sua capacidade de acelerar a pesquisa na área de ciência dos materiais e da sua propriedade inerente de predição baseado em dados históricos [34].

3.8 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

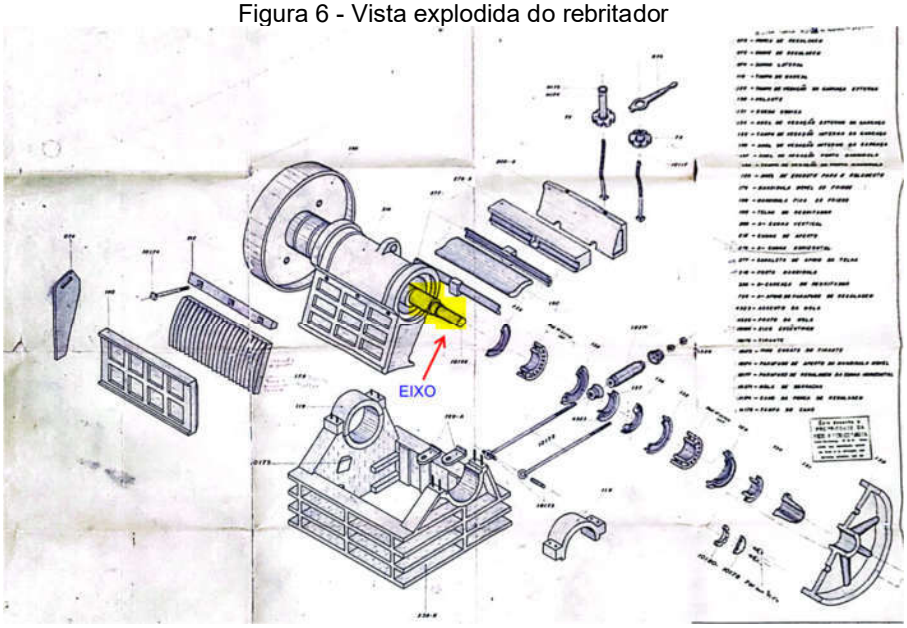
As técnicas analíticas proporcionam a realização de cálculos capazes de inferir dados de deslocamento, propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais. Esta condição é possível a partir do conceito de infinitos pontos. Mas existem limitações de aplicações. O método dos Elementos Finitos (MEF) originou-se do desenvolvimento de procedimentos de forma aproximada que são aplicados de forma independente do carregamento e da morfologia [36]. O MEF tem inúmeras aplicações nas áreas de Física, Matemática, Engenharia, Inspeção entre outros, sendo capaz de analisar transferência de massa, calor, estruturas, balanço de força, oscilações, eletromagnéticas e vibrações. As aplicações são devidas às condições rígidas de aproximações e utilização de dados físicos [37]. É um sistema aproximado de cálculo de forma contínua que divide geometrias contínuas em partes finitas. A subdivisão de pontos gera uma malha onde equações diferenciais ou outras são aplicadas [37]. O método gera uma série elevada de equações algébricas, que são resolvidas de forma computacional. Desta forma, são utilizadas metodologias padronizadas em sistemas discretos, sem envolver decisões de engenharia durante a análise computacional [37]. Existem vários programas comerciais de elementos finitos, entre eles o programa ABAQUS que se divide em duas partes, uma para a modelagem e outra para processamento [38]. Com esta ferramenta é possível aplicar diferentes tipos de cargas, considerando os tipos de esforços aplicados e seu efeito de tração, compressão, flexão, flambagem, dobramento, torção e embutimento [38].

.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

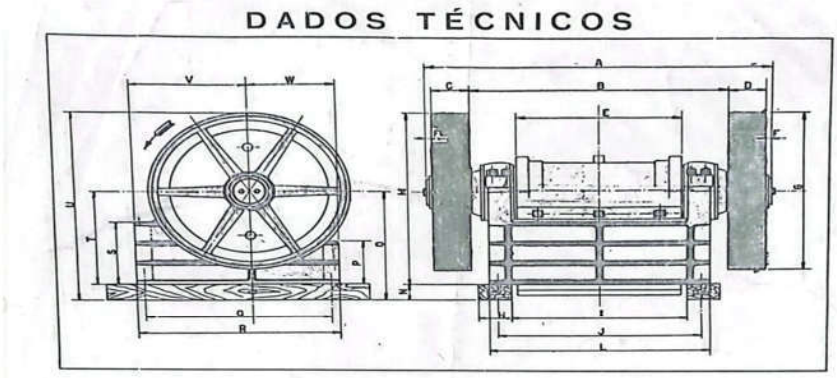
O componente analisado neste estudo é o eixo excêntrico do rebritador de mandíbulas modelo MR-832 da marca Plangg. As Figuras 6 e 7 apresentam a vista explodida do equipamento e sua configuração estrutural, respectivamente.

Figura 6 - Vista explodida do rebritador



Fonte: Adaptado de Manual de Aços-Plangg.

Figura 7 - Especificações do rebritador MR-832



DADOS TÉCNICOS

MODÊLO	MR-832	FÔRÇA NECESSÁRIA	30-40 CV
CAPACIDADE NOMINAL	10/15 m3/h	PÊSO APROXIMADO	3.300 kg
ABERTURA DE BÔCA	20x80 cm	ROTAÇÃO DE TRABALHO	250/280 RPM

DIMENSÕES PRINCIPAIS DA MÁQUINA EM mm

A	1756	G	1000	N	100	T	590
B	1306	H	160	O	690	U	1290
C	185	I	870	P	282	V	565
D	185	J	1010	Q	920	W	435
E	810	L	1090	R	1000		
F	40	M	1190	S	408		

Fonte: Manual de Aços-Plangg.

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química foi realizada em espectrômetro de emissão óptica marca Oxford Foundry Master Pro. A partir delas foi determinada a classe de aço utilizado na fabricação dos eixos pesquisados.

4.2 VERIFICAÇÃO MICROESTRUTURAL

As análises microestruturais foram realizadas em microscópio óptico marca Olympus e em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Enviromental Jeol, com microssonda EDS acoplada. O ataque químico foi realizado com reagente Nital 2%, após a aplicação dos procedimentos convencionais de metalografia consistindo em corte, lixamento e polimento com pasta de diamante.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS MICRODUREZA

As microdurezas das amostras foram determinadas em microdurômetro Mitutoyo HTM 1. Os valores foram convertidos em limite de resistência utilizando. Foram realizadas medidas junto à superfície e na região de núcleo das amostras.

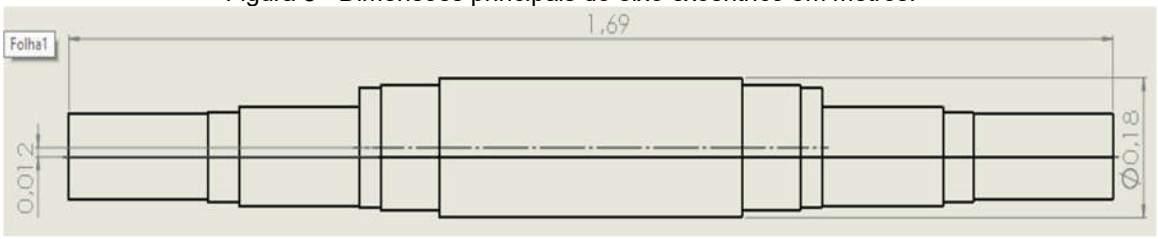
4.4 ANÁLISE DE FALHA

Os procedimentos convencionais de análise de falha foram aplicados. A partir dele foram verificados de forma experimental todos os seus efeitos nas ocorrências de falhas. De uma forma detalhada, as etapas de fabricação foram estudadas até o desenvolvimento de sistemática própria de determinação de falhas.

4.5 ANÁLISE POR ELEMENTO FINITOS

Foi utilizado o software de elementos finitos Abaqus/CAE 2017 para fazer um estudo da distribuição da tensão no eixo com as seguintes dimensões (Figura 8):

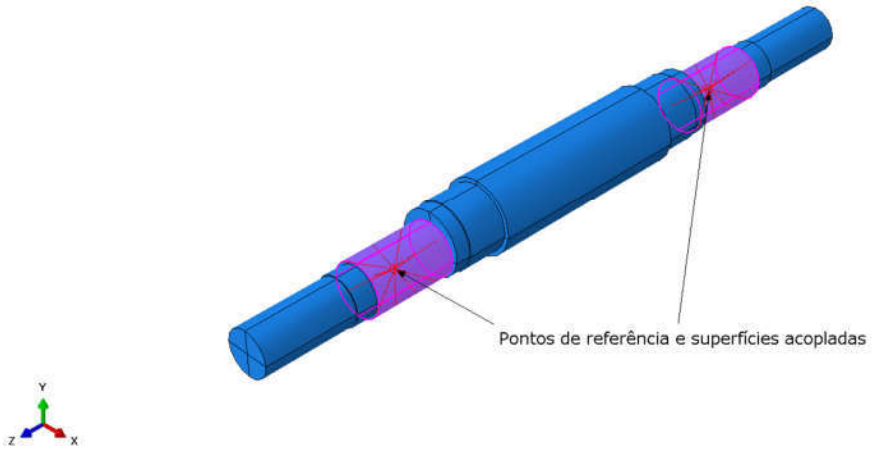
Figura 8 - Dimensões principais do eixo excêntrico em metros.



Fonte: Imagem do SolidWorks adaptada pelo autor.

Com intuito de simular movimento de rotação da peça, o método *Constraint* foi aplicado entre Pontos de referência (PR) e superfícies da peça (Figura 9) utilizando uma análise estática. Nesse método, os agentes selecionados se relacionam no modo *master/slave*, no caso, todas restrições incluídas nos PR (*master*) serão obedecidas pelas superfícies (*slave*).

Figura 9 - Método Constraint entre pontos de referência e superfícies

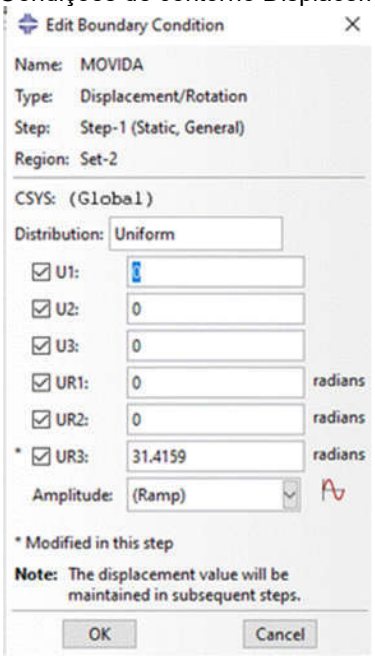


Fonte: Imagem obtida no Abaqus pelo autor

Assim, os Pontos de referência foram selecionados para serem aplicadas a condição de contorno *Displacement/rotation.* Conforme a Figura 10, nota-se que no termo UR3 foi aplicado uma magnitude de 31,41 radianos para se obter o total de cinco voltas completas em 1 segundo (tempo da simulação). Desta forma, obtém-se a velocidade de rotação do eixo de 300 rpm, conforme equação abaixo:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f .$$

Figura 10 - Condições de contorno Displacement/rotation



Fonte: Imagem obtida no Abaqus pelo autor.

Os termos 1,2 e 3 referem-se, respectivamente, aos eixos X,Y e Z. Sendo U1, deslocamento ao longo do eixo X e UR1, rotação em torno do eixo X.

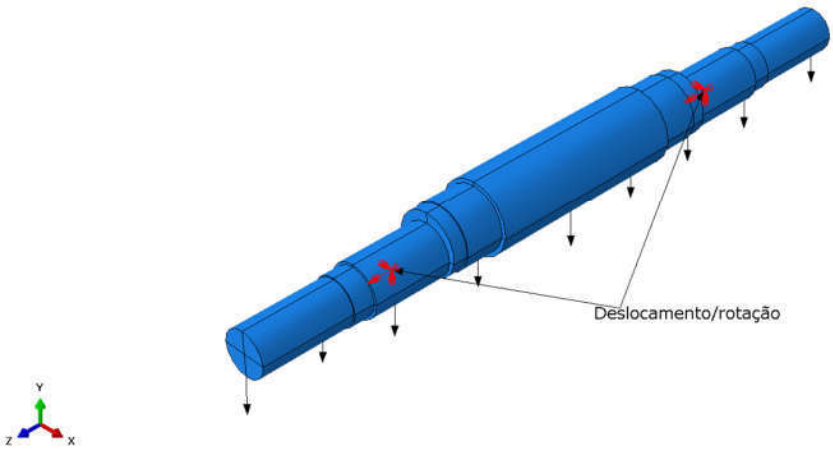
Além disso, foi aplicada a força da gravidade sobre todo o volume da peça, inserindo a magnitude de aceleração de -9.81m/s² no eixo Y (Figura 11). O valor da força da gravidade é obtido automaticamente ao selecionar a região onde será aplicada através da equação:

$$F = \rho \cdot V \cdot g$$

Onde *F*, força da gravidade, ρ é a densidade do material, *V* o volume da peça e *g* a gravidade.

O material escolhido foi o aço 8640 e foi modelado como elástico linear com módulo de Young de 200 GPa, coeficiente de Poisson de 0,33 e densidade de 7800 kg/m³. Na figura 11 pode-se verificar a aplicação das duas condições de contorno, a gravidade e *Displacement/rotation*.

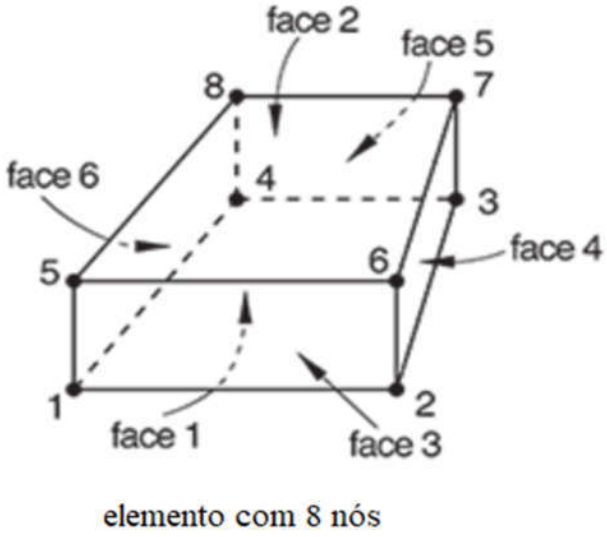
Figura 11 - Condições de contorno aplicadas ao eixo



Fonte: Imagem obtida do Abaqus retirada pelo autor

O método de elementos finitos divide a peça em pequenos elementos onde a força, deslocamento e outros parâmetros mecânicos são calculados e transmitidos aos elementos vizinhos. Para esta simulação o elemento C3D8R (Figura 12) foi escolhido, elemento contínuo hexaédrico de 8 nós, com 3 graus de liberdade por nó (U1,U2,U3), o sufixo R indica que há 1 ponto de integração em vez de 8.

Figura 12 - Ordenação dos nós em elementos com 8 nós

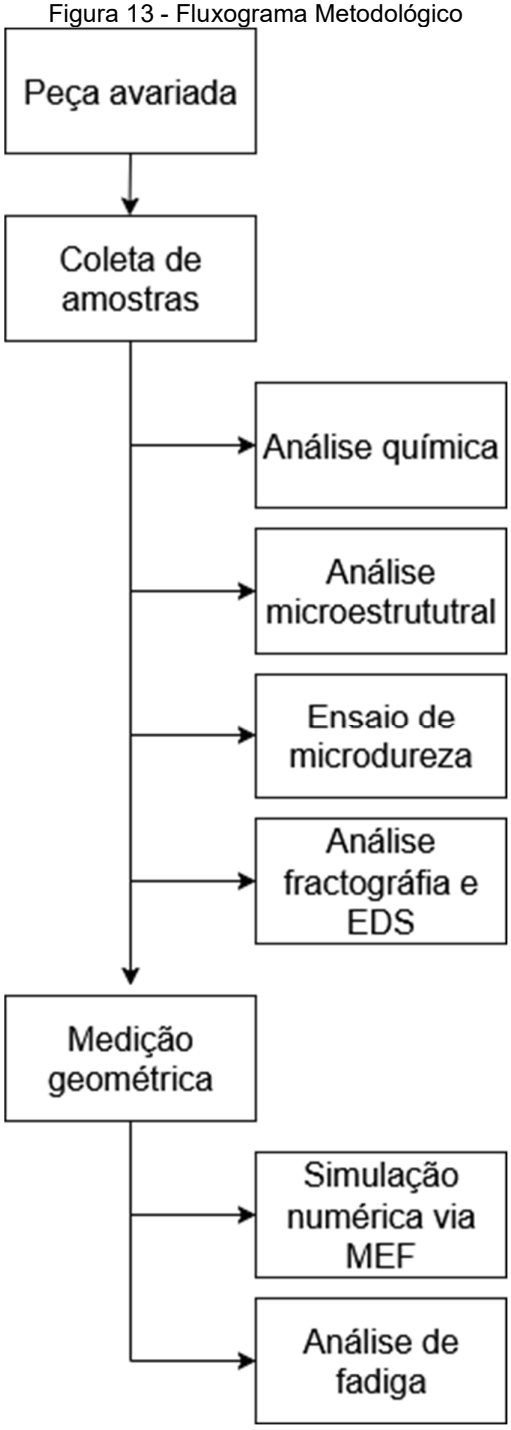


Fonte: Adaptado do Abaqus Manual Documentation.

O fluxograma apresentado na figura 13 resume os procedimentos realizados.

FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

Figura 13 - Fluxograma Metodológico



Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE QUÍMICA

Foram analisadas a composição química de três amostras do eixo, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise química do eixo

Amostra	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr	%Mo	%Ni	Al
1	0,39	0,80	0,20	0,03	0,03	0,50	0.20	0,60	0,05
2	0,39	0,80	0,20	0,03	0,03	0,51	0,20	0,60	0,05
3	0,39	0,80	0,20	0,03	0,03	0,49	0,20	0,60	0,05
Média	0,39	0,80	0,20	0,03	0,03	0,50	0,20	0,60	0,05

Fonte: Próprio autor.

A composição química verificada nas amostras identifica o aço como sendo da classe SAE 8640, classificado como aço de baixa liga. Este aço apresenta os elementos de liga Cr, Ni e Mo, que aumentam sua temperabilidade, pois, dissolvidos na austenita, retardam a nucleação e o crescimento dos produtos de transformação. O percentual de alumínio (0,05%) contribui para a ancoragem do tamanho de grão austenítico e desoxidação do aço, sendo o principal elemento nesta função junto com o manganês e silício [39].

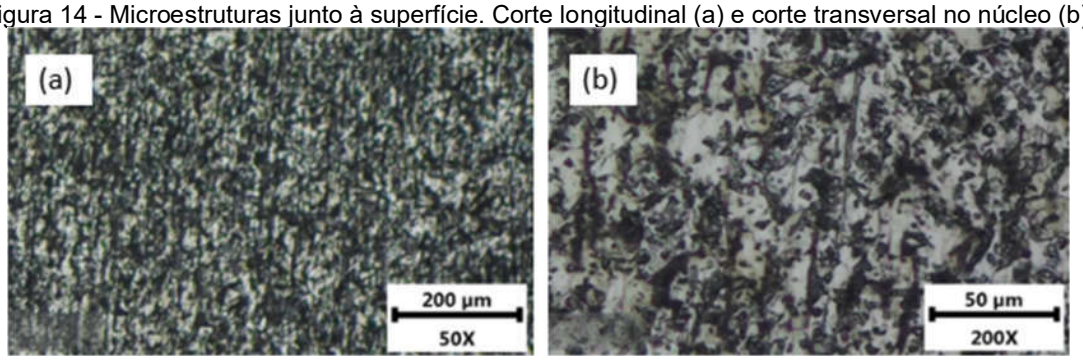
Verificou-se ainda que os teores de enxofre e fósforo detectados (0,03%) se encontram próximo ao limite superior recomendado [40]. Estes elementos são deletérios às propriedades em fadiga, especialmente em eixos submetidos a carregamentos cíclicos. O fósforo, por exemplo, confere uma fragilidade a frio ao aço, pois se dissolve na ferrita, endurecendo-a e aumentando o tamanho do grão do material. No entanto, seu efeito em aços de baixo carbono é menor, além disso ele melhora a resistência à corrosão e a usinabilidade dos aços. O enxofre, assim como o fósforo, tem influência mínima nas propriedades mecânicas do aço quando o teor de carbono é baixo. Contudo, também é indesejável devido a formação de sulfetos, que podem resultar em fragilidade a quente [41].

Ainda que o aço SAE 8640 seja adequado para aplicações com exigência moderada, existem outros aços de baixa liga com melhor balanceamento químico para aplicações em eixos sujeito à fadiga, como os aços SAE 4140 e SAE 4340. No entanto, a seleção do material deve estar ajustada às cargas aplicadas, condições de operação, custo-benefício e disponibilidade.

5.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A microestrutura detectada nos eixos analisados é constituída por ferrita, perlita e bainita (Figura 14). Estas microestruturas são típicas do aço SAE 8640 na condição bruta de laminação. Para a obtenção de microestrutura homogênea o tratamento térmico mais indicado é o de normalização após a laminação [42]. O tamanho de grão austenítico verificado foi de 5 a 6 ASTM, identificando recuperação dinâmica e recristalização mesmo sem o tratamento térmico de normalização. Este fenômeno se associa ao número de reduções da barra laminada e aos ciclos de reaquecimento entre as etapas de conformação mecânica.

Figura 14 - Microestruturas junto à superfície. Corte longitudinal (a) e corte transversal no núcleo (b).



Fonte: Próprio autor.

Verifica-se, ainda, o bandeamento de perlita no corte longitudinal sendo este mais acentuado em regiões próximas à superfície. O bandeamento microestrutural afeta diretamente a direção de crescimento da trinca por fadiga, influenciando a morfologia de fratura e o desvio do caminho da trinca. A depender da orientação do carregamento em relação às bandas, a trinca pode sofrer deflexão e embotamento da ponta, o que reduz a taxa de crescimento [43].

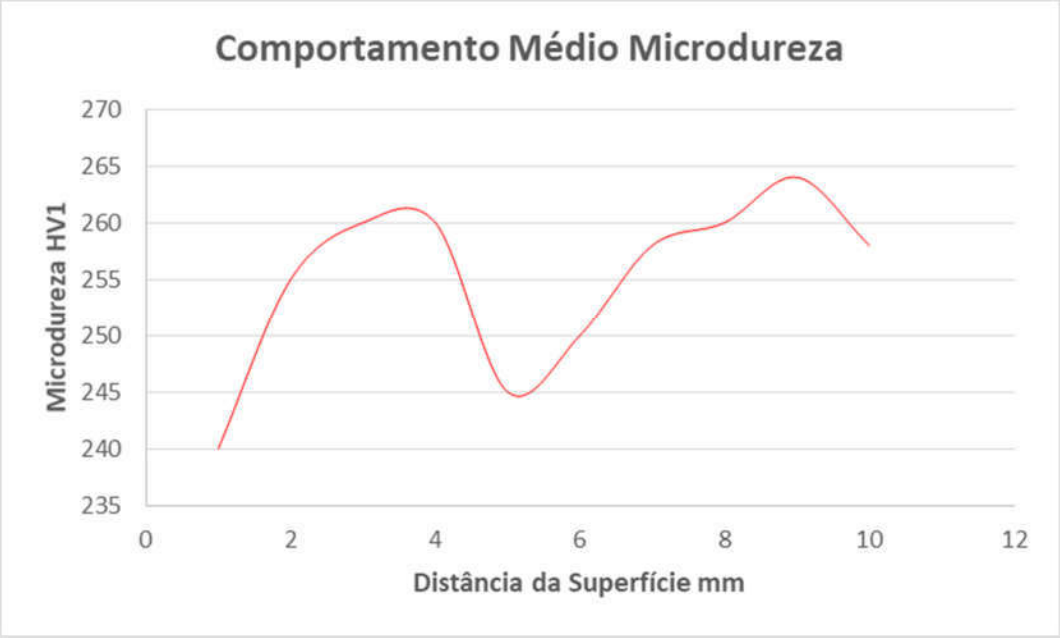
A presença de bainita superior está associada à temperabilidade do aço SAE 8640, decorrente do teor médio de carbono e a presença dos elementos de liga Cr, Ni e Mo. Após o resfriamento do processo de laminação, o calor armazenado no núcleo das barras de diâmetros maiores se transfere para superfície, dificultando o resfriamento uniforme e favorecendo a presença de bainita em regiões internas. A bainita em aços baixa liga laminados contribui para aumento da tensão de escoamento, que teoricamente é favorável à vida em fadiga. Porém, por se encontrar de forma heterogênea muitas vezes se distribui com tensões trativas que favorecem

a nucleação e propagação de trincas, ocasionando falhas com caráter catastrófico em eixos.

5.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA

Os valores obtidos no ensaio de microdureza estão apresentados no perfil da Figura 15. Observa-se uma flutuação nos valores da dureza ao longo da seção transversal analisada, com variações entre 240 e 265 HV1. Essa oscilação corrobora os resultados obtidos na análise microestrutural, indicando heterogeneidade na distribuição das fases, especialmente nas regiões intermediárias, onde se identificou mistura de perlita bandeada, ferrita e bainita superior.

Figura 15 - Comportamento de microdureza junto ao início da falha em direção ao núcleo.



Fonte: Próprio autor.

O valor máximo próximo à superfície pode estar relacionado à presença de perlita compacta e ferrita menos recozida, enquanto a queda entre 4 e 6 mm pode coincidir com regiões em que a microestrutura apresenta maior fração de bainita, geralmente associada a maiores tensões residuais internas. A elevação posterior da dureza em direção aos 8-11 mm refere-se ainda à região subsuperficial e pode estar relacionada à redução da fração de ferrita livre e a maior continuidade de perlita nessa faixa.

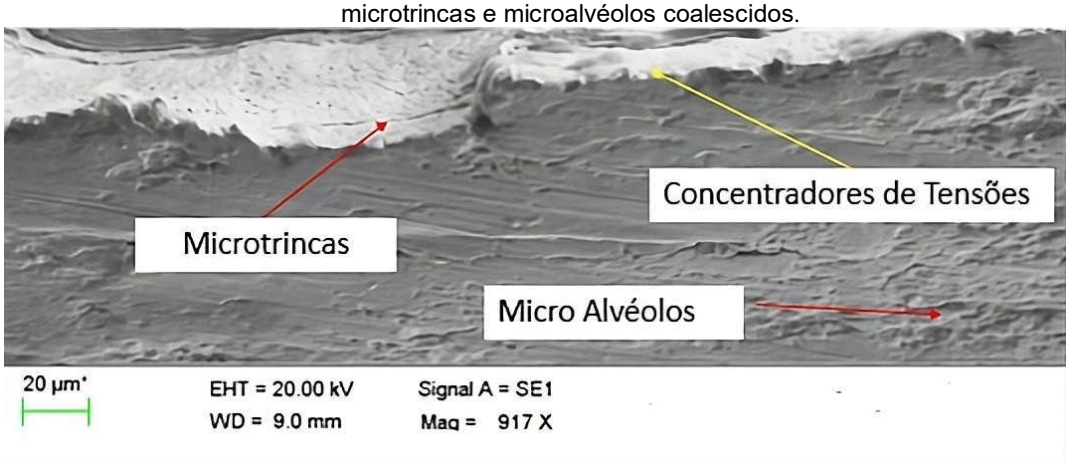
5.4 ANÁLISE DE FALHA

Nas micrografias MEV (Figura 16) obtidas na região da fratura verificou-se a presença de microalvéolos (dimples) coalescidos em praticamente todo campo, com diâmetro equivalente da ordem de dois a seis micrometros, caracterizando fratura dúctil por coalescência de microvazios [44]. No setor superior da Figura 15, a transição geométrica (degrau) atua como concentrador de tensões, do qual surgem microtrincas, sendo coerente com a análise de elementos finitos (seção 5.6).

Na microssonda EDS (Figura 17) mostrou Fe como matriz e Cr, Mn, Ni, Mo e Si, compatíveis com o aço SAE 8640. Não foram detectados, nas regiões analisadas, de forma significativa a presença de elementos deletérios para as propriedades mecânicas dos aços como micro e macroinclusões não metálicas de sulfeto de manganês (MnS), Sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3) ou aluminato de cálcio.

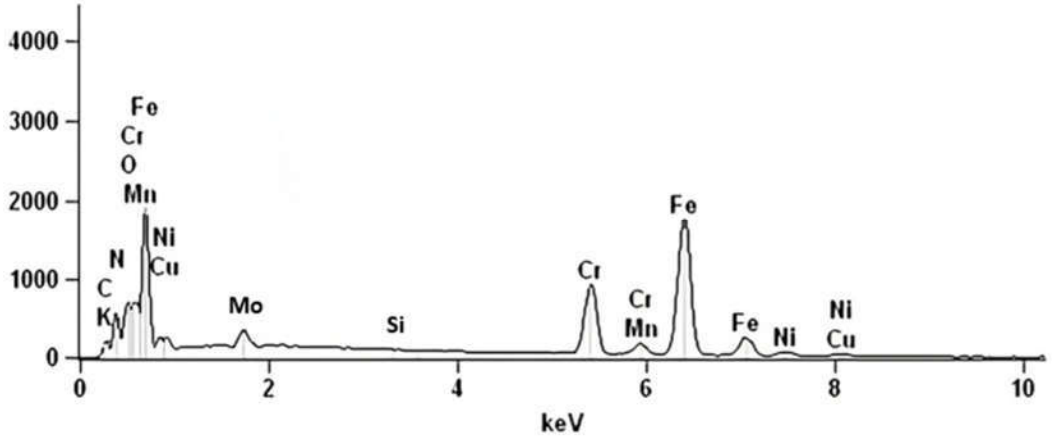
A propagação das trincas ocorreu de forma gradual com reduzida cinética não sendo influenciada por fatores anisotrópicos do material. Porém sua condição isenta de tratamento térmico de normalização, têmpera e revenimento foi deletéria para o material. A presença de bandeamento de perlita não apresentou relação direta com a ruptura catastrófica.

Figura 16 - Micrografia da fratura do eixo. Verifica-se elementos concentradores de tensão, microtrincas e microalvéolos coalescidos.



Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Microsonda EDS do substrato do aço SAE 8640. Elementos de liga e carbono apresentam-se sem anomalias no perfil semiquantitativo e qualitativo da microssonda EDS.



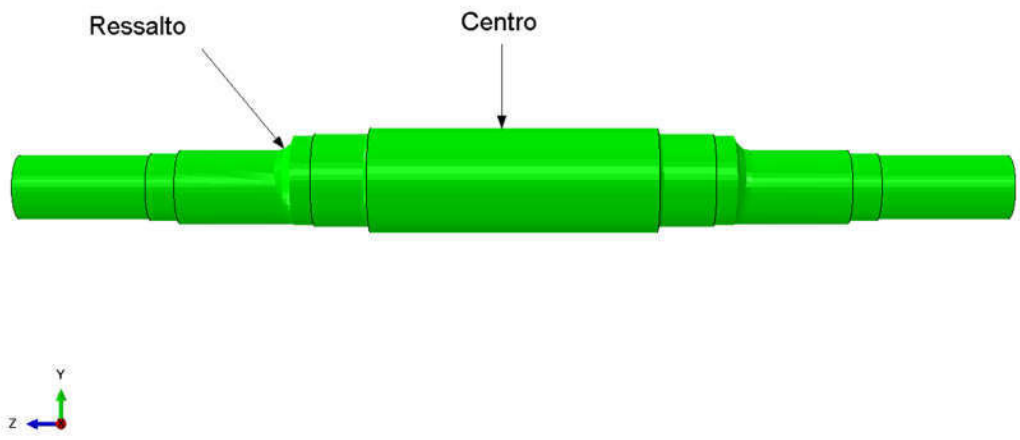
Fonte: Próprio autor.

5.5 ANÁLISE NUMÉRICA

5.5.1 CONVERGÊNCIA DE MALHA

Para o estudo de refinamento da malha foram avaliados dois componentes mecânicos, tensão de von Mises e deformação (LE23). A avaliação foi realizada em regiões críticas do eixo, especificamente no centro longitudinal e nos ressaltos geométricos, conforme ilustrado na Figura 18. Cabe ressaltar que no ressalto foram considerados ambos os parâmetros enquanto na região central analisou-se exclusivamente a tensão.

Figura 18 - Locais de avaliação para refinamento da malha



Fonte: Imagem obtida no Abaqus pelo autor.

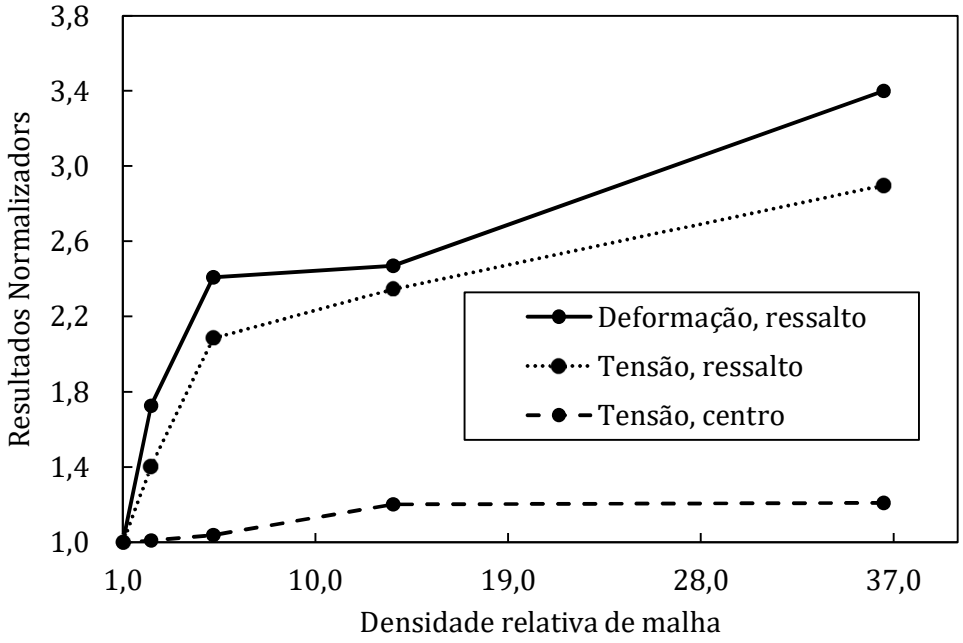
Na Tabela 2 pode-se verificar os valores nominais para cada parâmetro analisado. Observa-se que o tempo de simulação é um critério relevante no estudo, seguindo uma tendência não linear conforme aumenta o número de elementos, o que evidencia o custo computacional associado ao refinamento da malha. Os valores da tensão no ressalto, conforme mostrado na Figura 19, seguem uma tendência de aumento à medida que se refina a malha. Pode-se explicar esse comportamento devido ao ressalto ser uma região de concentração de tensão e um possível ponto de singularidade de tensão, teoricamente neste ponto a tensão tende ao infinito. Já a tensão de von Mises no centro da peça demonstra convergência clara, após uma variação relativa de 16% entre as simulações de 18 mil e 49 mil elementos, encontrou-se uma estabilidade com a simulação de 132 mil elementos, com uma variação relativa de 0,7%. Por fim, o comportamento de deformação no ressalto também não apresenta uma convergência, apesar de haver uma inicial convergência nas primeiras 4 simulações, há uma variação 26% na última simulação de 132 mil elementos. A explicação anterior sobre o ponto de singularidade de tensão também se aplica para o caso da propriedade mecânica de deformação.

Tabela 2 - Valores absolutos de propriedades para convergência de malha

Nº de elementos	Tempo de simulação (horas)	Tensão, ressalto (MPa)	Tensão, centro (MPa)	Deformação, LE23
132.113	99,4	377,0	127,2	1,733E-03
49.231	15,0	305,1	126,3	1,259E-03
18.840	4,0	269,7	109,3	1,228E-03
8.396	2,0	182,7	106,3	8,800E-04
3.616	0,3	130,1	105,2	5,098E-04

Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Resultados normalizados com relação aos valores da malha mais grossa dos parâmetros mecânicos.

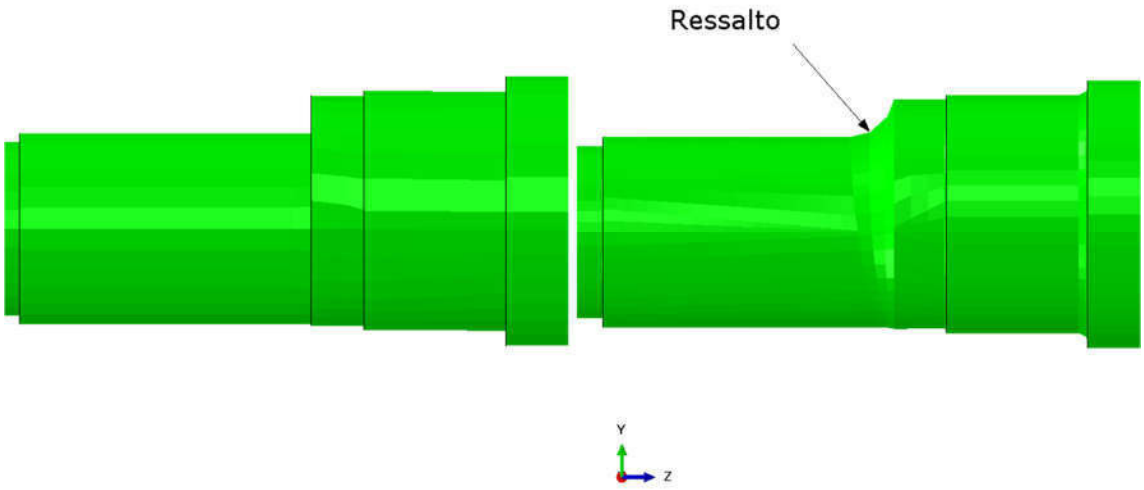


Fonte: Próprio autor.

Uma possível explicação para a não convergência dos resultados de deformação e tensão no centro deve-se ao fato que no modelo com malha mais refinada houve uma alteração na geometria dos ressaltos, conforme explicitado pela Figura 20. Essa modificação justifica-se pelo fato de que, com número maior de elementos é possível fidelizar a geometria da peça à sua forma original, evitando cantos vivos artificiais, pois o tamanho de cada elemento é menor que a curvatura do

ressalto. A curvatura do ressalto, aliás, foi objeto de estudo que avaliou o melhor formato de um filete num eixo com cotovelos de maneira que a tensão equivalente no local seja a menor possível. Através da simulação de elementos finitos e de um procedimento de otimização do formato global da peça, obtiveram-se fatores de concentração de tensão próximo a unidade [45].

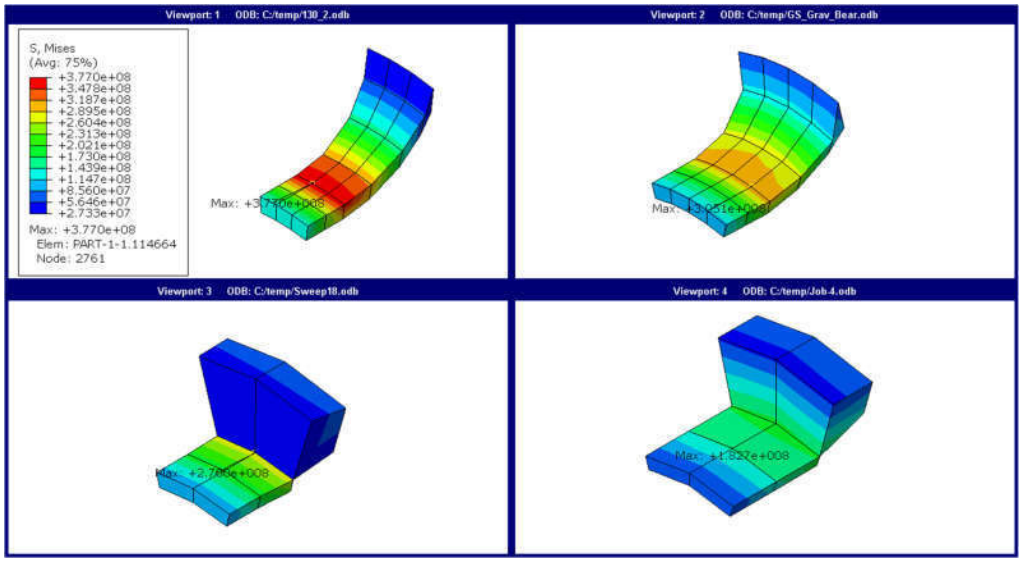
Figura 20 - A direita o desenho do eixo com ressalto (49mil elementos) e a esquerda eixo sem ressalto (18mil elementos).



Fonte: Imagem do Abaqus obtida pelo autor.

Na figura 21, pode-se verificar a obtenção dos valores de tensão de Von Mises no ressalto da peça. A figura apresenta as imagens das simulações de 49 mil, 8 mil, 18 mil e 132 mil seguindo sentido horário, todas na mesma escala. Para aquisição dos valores foi selecionado uma quantidade de elementos na região verificada, nota-se que quanto mais refinada a malha maior a quantidade de elementos selecionados para representar a região. Também podemos verificar que o nó de valor máximo se desloca do canto vivo para o plano que segue o eixo longitudinal do eixo a medida que se refina a malha.

Figura 21: Elementos selecionados para análise de tensão Von Mises para as diferentes simulações. Vista localizada do ressalto.



Fonte: Próprio autor.

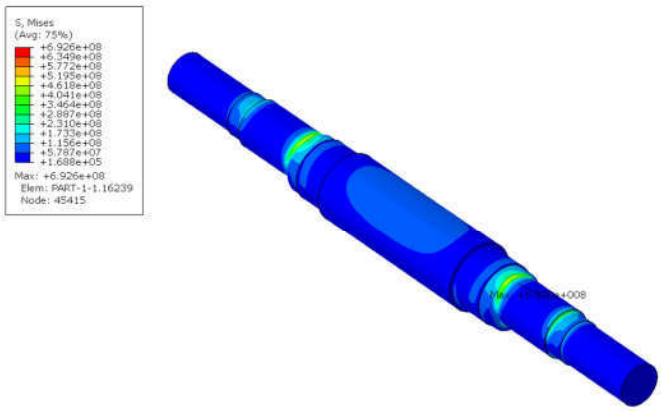
O estudo de convergência de malha permitiu validar os resultados obtidos, além de avaliar o tempo computacional necessário, fator relevante para a agilidade da pesquisa. Assim, o estudo de malha é crucial para o conhecimento da malha ideal, estabelecendo um equilíbrio adequado entre precisão dos resultados, tempo de simulação e capacidade computacional disponível. Conclui-se que a malha com 18.840 elementos gera resultados satisfatórios dentro de um tempo razoável, obtendo tendências do comportamento das propriedades mecânicas. Porém, para análises mais minuciosas e precisas, onde o fator de segurança é um parâmetro importante, uma simulação com maior número de elementos se faz necessária.

Como alternativa para se obter resultados satisfatórios em uma menor custo computacional, recomenda-se a utilização do método *partition* do Abaqus para produzir malhas mais densas somente em locais que haja maior variação numérica, no caso os ressaltos. Nas áreas onde as variações de resultados são menores, pode-se utilizar malhas mais grosseiras. Deve-se atentar para que a mudança de tamanho entre elementos vizinhos entre zonas refinadas e não refinadas seja suave e que o formato de cada elemento não exceda um limite proporcional de 1:8 entre suas dimensões.

5.5.2 ANÁLISE DE TENSÕES

Na Figura 22 podemos observar a distribuição da tensão de von Mises ao longo da peça. Nota-se que o valor máximo de tensão (692 MPa) ocorre na região de concentração tensão do ressalto, decorrente da variação de diâmetro do eixo e local de excentricidade geométrica de 12 mm. Além do local citado, é possível verificar que as outras regiões de maior solicitação estão nos ressaltos adjacentes e no centro do eixo. Por fim, podemos constatar que a distribuição de tensão é assimétrica em relação à sua circunferência devido à excentricidade conforme pode ser visto na Figura 22, que mostra a distribuição da tensão no interior da peça através de um corte longitudinal.

Figura 22- Distribuição de tensão sobre o eixo.

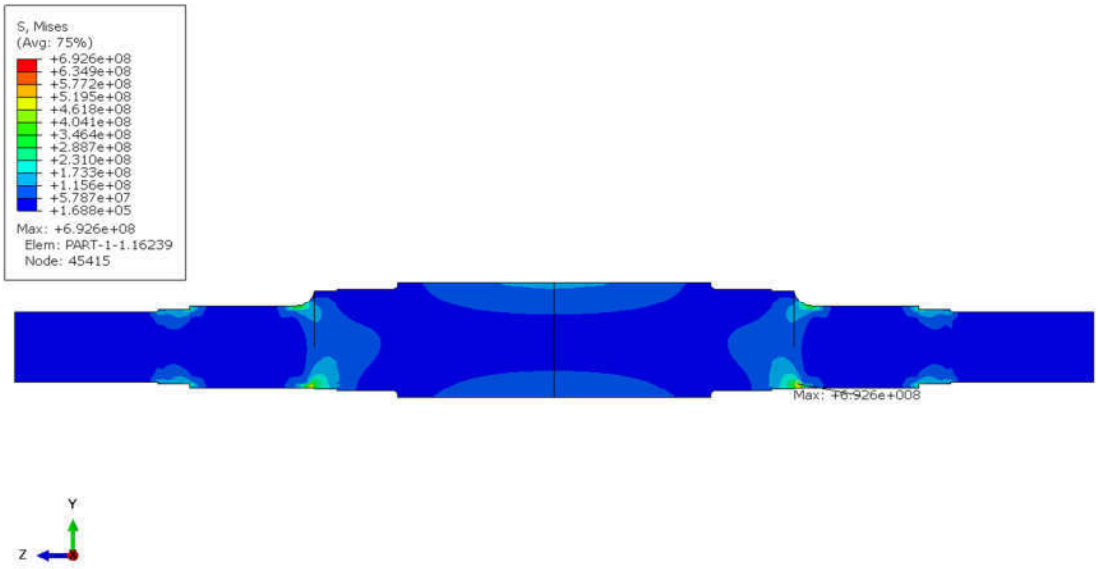


Fonte: Imagem extraída do software Abaqus pelo autor.

Na Figura 23, pode-se notar que a local de tensão máxima se encontra na parte interna da peça. Além disso, o local fica no lado oposto do ressalto devido a excentricidade, o que não é esperado. No entanto, a Figura 24 pode explicar um valor elevado em tal região. Nela podemos notar que há uma sequência de elementos no sentido circunferencial com formato não uniforme (suas dimensões laterais são desproporcionais), o que não é aconselhado. Essa desproporção pode ter gerado um desequilíbrio nos cálculos numéricos o que resultou no resultado elevado. Esta constatação pode ser confirmada pela Figura 25, que apresenta corte transversal na mesma seção, porém com simulação com malha mais grosseira.

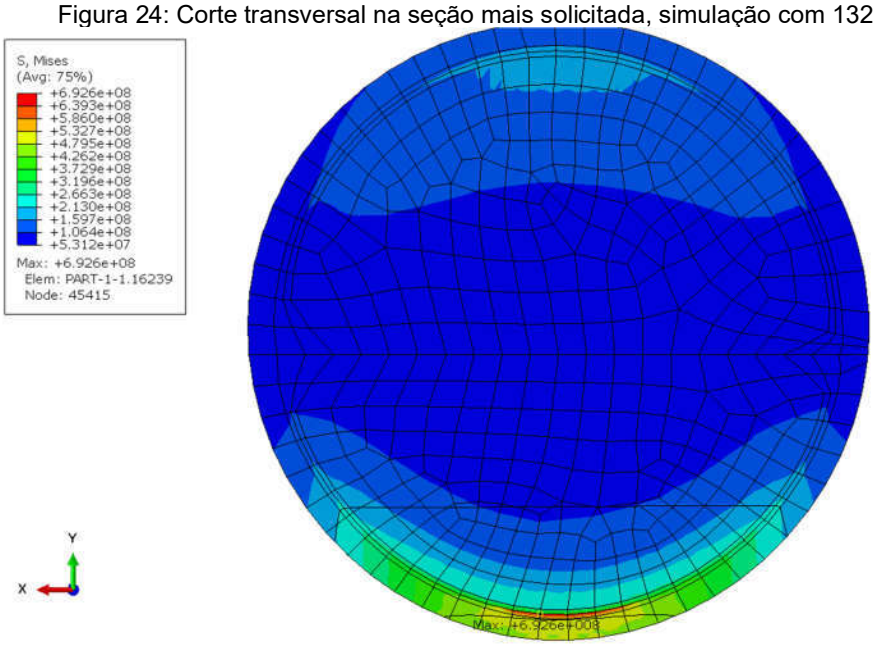
Constata-se que na malha mais grosseira o local de maior solicitação se encontra na superfície, enquanto na malha refinada está na parte interna da peça. Isto pode ser explicado pelo formato dos elementos que podem gerar inconsistências numéricas.

Figura 23: Corte longitudinal.



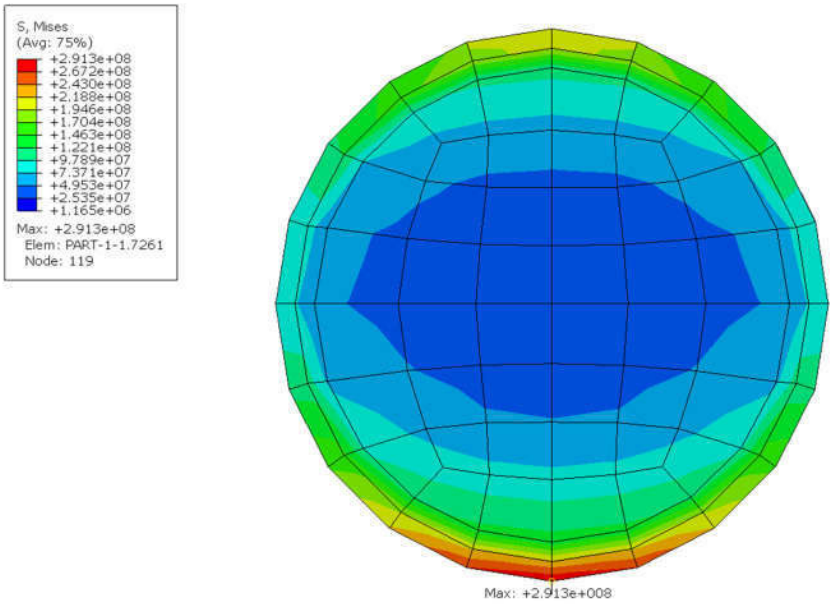
Fonte: Próprio autor.

Figura 24: Corte transversal na seção mais solicitada, simulação com 132 mil elementos.



Fonte: Próprio autor.

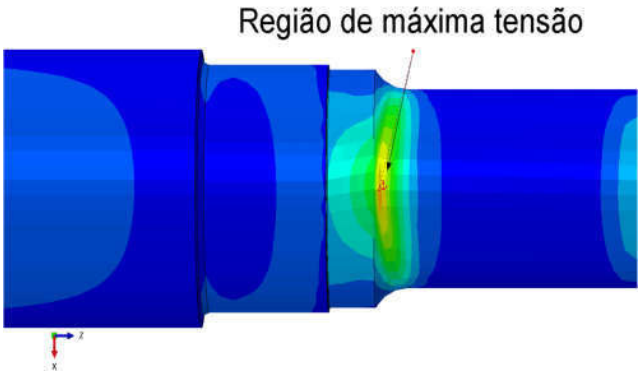
Figura 25: Corte transversal na seção mais solicitada, simulação com 8 mil elementos.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 26a, apresenta-se uma visualização em detalhe da região de maior tensão simulada. Verifica-se, através da Figura 26b, que os resultados da simulação se correlacionam com o comportamento real, pois o local de máxima tensão coincide com a seção da peça onde ocorreu a ruptura.

Figura 26. Imagem superior (a), distribuição de tensão simulada. Inferior (b), eixo avariado.



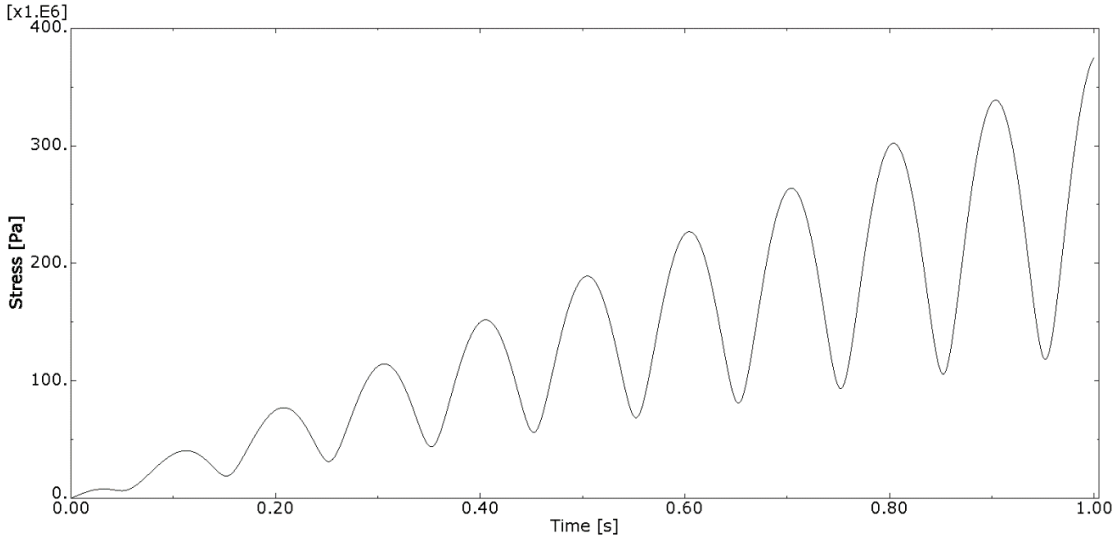
a)

b
)

Fonte: Imagem superior extraída do Abaqus/2017 e inferior foto de eixo excêntrico avariado, ambas realizadas pelo autor.

Na Figura 27 pode-se verificar o gráfico tensão de von Mises-tempo de um elemento localizado na região de maior solicitação. Podemos notar o comportamento cíclico devido ao movimento de rotação da peça. A cada ciclo o pico de tensão se eleva, tendendo ao infinito com o aumento dos ciclos. Este comportamento não é ideal e não corresponde à realidade, pois em um segundo se obtém um valor considerável de 400 MPa. Esta inconsistência pode ser resultante do modelamento do material no qual foi configurado sua parte elástica, não sendo explicitado seu limite de escoamento e de ruptura (parte plástica). Além disso, as condições de contorno de deslocamento rotacional podem também ter sido a causa de tal inconformidade na reprodução do gráfico. Pois, o deslocamento prescrito é aplicado em ambos os lados do eixo negligenciando assim o componente de torção que ocorre na realidade, no qual o eixo é acionado somente num extremo por sistemas de correias.

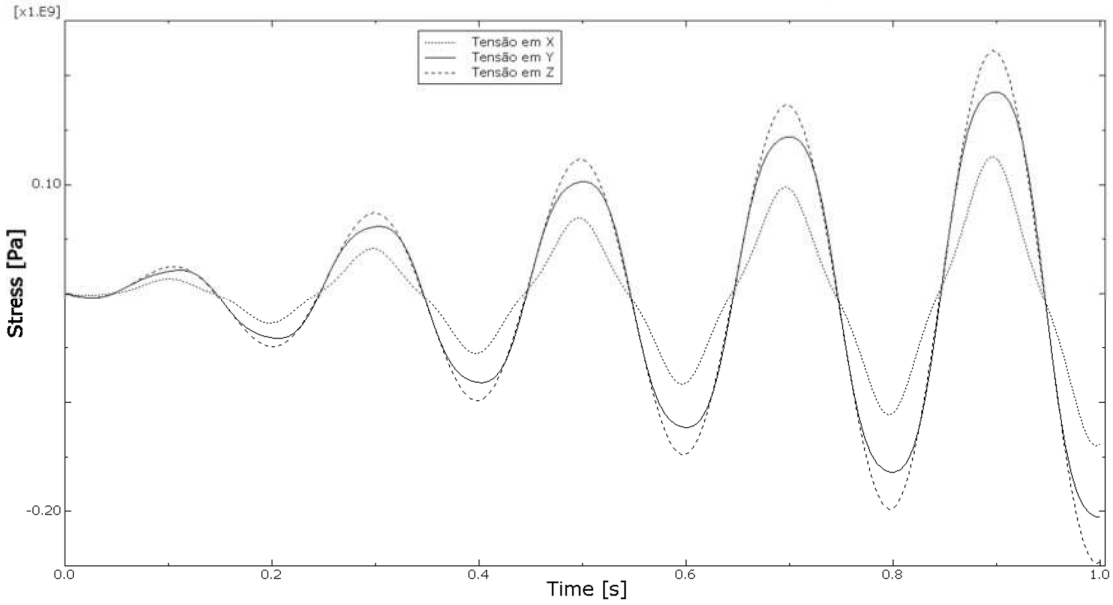
Figura 27: Tensão VM-tempo de um elemento selecionado de região de maior solicitação.



Fonte: Obtida do Abaqus pelo próprio autor.

O comportamento das tensões normais está representado na Figura 28. Onde a tensão no eixo Z é colinear com o eixo da peça. Novamente, se observa a representação do movimento rotacional, com os picos e vales tendendo ao extremo a cada ciclo. A tensão normal em Z tem relativamente valores mais elevados, seguido da tensão em Y. A diferença de formato da curva da tensão normal em X se deve ao formato excêntrico da peça.

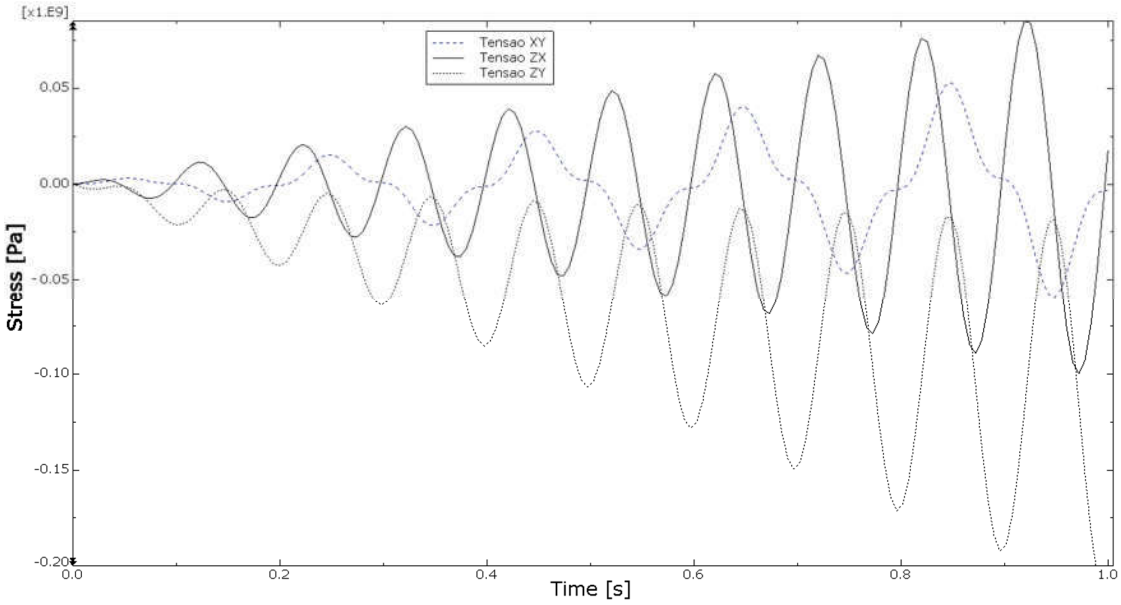
Figura 28: Tensões normais-Tempo de um elemento selecionado de região de maior solicitação



Fonte: Próprio autor.

As tensões cisalhantes-tempo apresentam comportamentos únicos. Podemos verificar na figura 29 que a tensão cisalhante XY tem um período diferente das outras duas plotadas no gráfico, ela representa a soma tensão devido a torção, teoricamente deveria ser zero devido as condições de contorno de deslocamento rotacional em ambos os lados da peça, e tensão devido ao momento fletor. A tensões cisalhantes ZY e ZX apresentam mesmo período, porém fases diferentes.

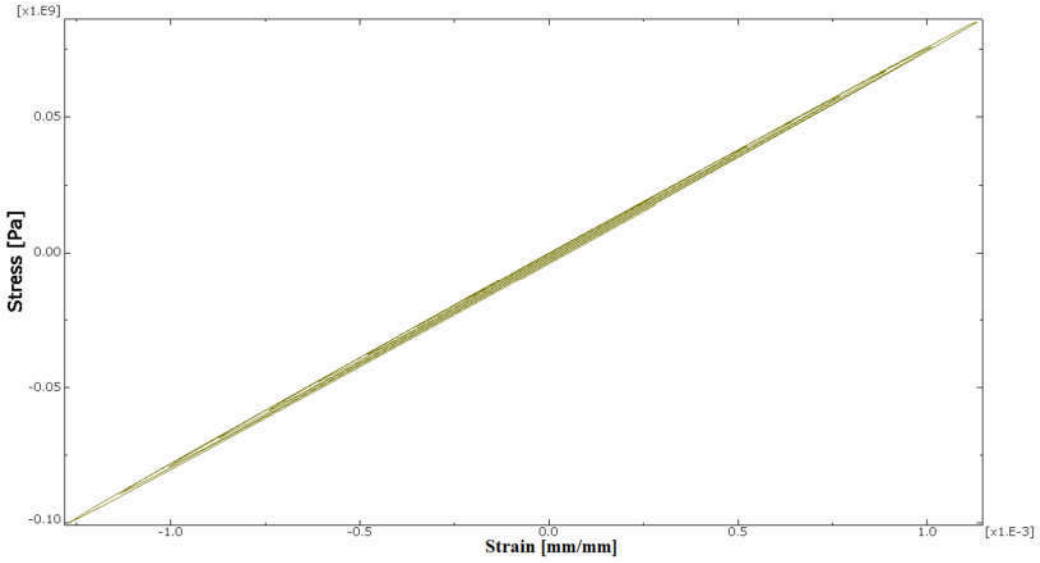
Figura 29: Tensões cisalhantes-tempo de um elemento selecionado de região de maior solicitação.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 30, é apresentado o gráfico tensão-deformação obtido na simulação. O diagrama apresenta um padrão cíclico característico de movimento rotacional, porém seu comportamento difere da literatura técnica, conforme figura 4, pois o modelo do material não engloba o regime plástico. A tensão e deformação selecionada para o gráfico foi a cisalhante XZ.

Figura 30 - Gráfico tensão x deformação



Fonte: Imagem extraída do software Abaqus pelo autor.

5.6 ANÁLISE DE FADIGA

Com intuito de verificar os resultados obtidos, vamos fazer uma análise de fadiga com abordagem de altos ciclos S-N de forma analítica. Primeiramente, estima-se o limite de resistência a tração S_{ut} a partir da dureza obtida no teste da seção 5.3 através da equação:

$$S_{ut} = 3xHB$$

$$S_{ut} = 690MPa$$

Com a resistência a tração conseguimos estimar o limite de endurança (S_e') através da equação:

$$S_e' = 0{,}5\ S_{ut}$$

Assim, $S_e' = 345MPa$. A seguir analisando os fatores de Marin através da tabela 3:

Tabela 3: Fatores de Marin.

Fator	Característica	valor
ka (acabamento)	usinado	*0,798*
kb (tamanho)	120 mm	*0,712*
kc (tipo de carga)	combinado	*1*
kd (temperatura)	35ºC	*1*
ke (confiabilidade)	*50%*	*1*

Fonte: Próprio autor.

Adequando aos fatores de Marin, o limite de endurança do eixo (S_e) fica igual a 196 MPa.

Para análise do critério de Goodman, os valores da simulação já contemplam os fatores do entalhe, portanto basta utilizar diretamente as tensões fornecidas de 330 MPa e 80 MPa, para tensão Von Mises alternada e tensão Von Mises média. Conforme Figura 28, notamos que o comportamento da tensão é oscilante ascendente, os valores considerados para essa análise foram definidos do quinto ciclo.

Aplicando a equação de Goodman, resulta-se em fator de segurança igual a 0,56. Sendo n<1, ponto crítico está fora da zona segura e falha por fadiga é provável nas condições atuais.

6 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foram analisadas as condições de falhas em um eixo excêntrico utilizado em britadores de mandíbulas, foram empregadas técnicas numéricas e caracterizações de materiais por análise química, microestrutural, microdureza e de fratura. A partir dos resultados e discussões conclui-se que:

- As tensões trativas devido ao desbalanceamento dos eixos foram críticas para a ruptura por fadiga;

- A microestrutura constituída por ferrita, perlita e bainita foi favorável a menor rigidez nos eixos estudados;

- Os dados obtidos por simulação apresentaram diferenças significativas em relação aos experimentais;

- O refino dos dados de propriedades mecânicas e metalúrgicas são fundamentais para a simulação por elementos finitos de eixos para britadores.

- Foi determinado na simulação a possível ruptura por fadiga e alto ciclo.

- O estudo de convergência de malha permitiu validar os resultados obtidos, além de avaliar o tempo computacional necessário, fator relevante para a agilidade da pesquisa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da descarbonetação superficial na nucleação de trincas por fadiga.

- Determinação por elementos finitos o efeito dos rasgos de chaveta na propagação de trincas.

- Eficiência do martelamento a frio, na superfície de eixos, e o efeito na sua vida em fadiga.

8 REFERÊNCIAS

8.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS

[1] INFOGRAFICO mineração em números 2024. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/ Acesso em: 17 ago. 2025.

[2] CONTRIBUIÇÃO do setor mineral no produto interno bruto brasileiro. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10606/1/Radar_65_contribuicao_setor_mineral.pdf. Acesso em: 22 nov. 2023.

[3] DAYO-OLUPONA, O.; ISHOLA, A.; SALAMI, A.; ADEBAYO, O.; AKINLABI, I. Adoptable approaches to predictive maintenance in the mining industry: An overview. **Resources Policy**, v. 86, p. 104291, 2023.

[4] DHILLON, B. S. Mining equipment reliability. **London**: Springer, 2008.

[5] SHARMA, N. R.; MISHRA, A. K.; JAIN, S. OEE improvement of mining shovels by survival analysis and linear optimization as per sustainable development goals. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 36, n. 5, p. 323-355, 2022.

[6] JOHANSSON, M.; NIKOLIĆ, M.; LINDQVIST, M.; ELIASSON, L. A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. **Minerals Engineering**, v. 105, p. 69-78, 2017.

[7] WANG, Shenpeng; CUI, Yan; WANG, Chune. Dynamics Analysis and Chaos Identification of Compound Pendulum Jaw Crusher with Joint Clearance. **Applied Sciences**, A3 v. 13, n. 1, p. 238, 2022.

[8] LEGENDRE, D.; ZEVENHOVEN, R. Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. **Energy**, v. 74, p. 119-130, 2014.

[9] ABUHASEL, K. A. A comparative study of regression model and the adaptive neuro-fuzzy conjecture systems for predicting energy consumption for jaw crusher. **Applied Sciences**, v. 9, n. 18, p. 3916, 2019.

[10] KÖKEN, E.; LAWAL, A. I. Investigating the effects of feeding properties on rock breakage by jaw crusher using response surface method and gene expression programming. **Advanced Powder Technology**, v. 32, n. 5, p. 1521-1531, 2021.

[11] FLADVAD, M.; ONNELA, T. Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. **Minerals Engineering**, v. 151, p. 106338, 2020.

[12] KAMANI, M.; AJALLOEIAN, R. The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117016, 2020.

[13] MURITHI, M.; MUHIA, P.; KIPKOECH, R. Optimization of the swinging jaw design for a single toggle jaw crusher using finite element analysis. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, p. 1-8, 2022.

[14] MACHADO, P. C.; PEREIRA, J. I.; SINATORA, A. Abrasion wear of austenitic manganese steels via jaw crusher test. **Wear**, v. 476, p. 203726, 2021.

[15] SINHA, R. S.; MUKHOPADHYAY, A. K. Failure rate analysis of jaw crusher: a case study. **Sādhanā**, v. 44, p. 1-9, 2019.

[16] BABU, A. N.; SRINUVAS, P.; AHMED, M. Y. Design and optimization of eccentric shaft of pilger milling machine. **International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering**, v. 2, n. 1, p. 608-612, 2013.

[17] CULPEPPER, M. L.; KARTIK, M. V.; DIBIASIO, C. Design of integrated eccentric mechanisms and exact constraint fixtures for micron-level repeatability and accuracy. **Precision Engineering**, v. 29, n. 1, p. 65-80, 2005.

[18] OKE, P. K.; ALONGE, A.; OLAIYA, N. G. Performance optimization of jaw-type rock crushing machine through shaft eccentricity redesign. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, v. 12, n. 4, p. 435-442, 2020.

[19] HOU, N. et al. Failure modes, mechanisms and causes of shafts in mechanical equipment. **Engineering Failure Analysis**, v. 136, p. 106216, 2022.

[20] MAGENDRAN, G. Alternate manufacturing process for automotive input shafts. **SAE Technical Paper**, 2017.

[21] PETTERSON, R. E. Stress concentration design factors. 1953.

[22] GOOYER, L. E.; OVERBEEKE, J. L. The stress distributions in shouldered shafts under axisymmetric loading. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 26, n. 3, p. 181-184, 1991.

[23] TIPTON, S. M.; SOREM, J. R.; ROLOVIC, R. D. Updated stress concentration factors for filleted shafts in bending and tension. 1996.

[24] OZKAN, M. T.; ERDEMIR, F. Determination of stress concentration factors for shafts under tension. **Materials Testing**, v. 62, n. 4, p. 413-421, 2020.

[25] PEDERSEN, N. L. Aspects of stress in optimal shaft shoulder fillet. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 53, n. 5, p. 285-294, 2018.

[26] ILIEV, Z.; DINEV, G. Computer aided research of the shaft of a rotor crusher of an eccentric type. **Fundamental Sciences and Applications**, p. 135, 2017.

[27] SAVAIDIS, A.; SAVAIDIS, G.; ZHANG, C. FE fatigue analysis of notched elastic–plastic shaft under multiaxial loading consisting of constant and cyclic components. **International Journal of Fatigue**, v. 23, n. 4, p. 303-315, 2001.

[28] ZHANG, Y. et al. Finite element modeling and experimental validation of fretting wear scars in a press-fitted shaft with an open zone. **Tribology Transactions**, v. 61, n. 4, p. 585-595, 2018.

[29] XU, L.; YU, X.; HOU, Z. Analysis of the causes of driving gear shaft fractures in gear pumps. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 20, n. 1, p. 242-248, 2020.

[30] SEIFOORI, S.; PARRANY, A. M.; KHODAYARI, M. A high-cycle fatigue failure analysis for the turbocharger shaft of BELAZ 75131 mining dump truck**. Engineering Failure Analysis,** v. 116, p. 104752, 2020.

[31] MELLO, L. H. B. C. de. **Predição de vida à fadiga de eixo entalhado sob flexão-torção baseada na abordagem deformação-vida**. 2013. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

[32] XIE, M.; SHEN, H. Multiphase model for the prediction of shrinkage cavity, inclusion and macrosegregation in a 36-ton steel ingot. **Frontiers in Materials**, v. 7, p. 577290, 2020.

[33] CHEN, Z.; SHEN, H. Simulation of macrosegregation in a 36-t steel ingot using a multiphase model. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 27, n. 2, p. 200-209, 2020.

[34] LI, J. et al. A review on prediction of casting defects in steel ingots: from macrosegregation to multi-defect model. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 29, n. 12, p. 1901-1914, 2022.

[35] LI, D. et al. Inclusion flotation-driven channel segregation in solidifying steels. **Nature Communications**, v. 5, p. 5572, 2014.

[36] LIU, W. K.; LI, S.; PARK, H. S. Eighty years of the finite element method: Birth, evolution, and future. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 29, n. 6, p. 4431-4453, 2022.

[37] PRINN, A. G. A review of finite element methods for room acoustics. In: **Acoustics**. MDPI, 2023. p. 367-395.

[38] DASSAULT SYSTÈMES. Abaqus finite element analysis software overview. Vélizy-Villacoublay, 2023. Disponível em: https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus. Acesso em: 14 ago. 2025.

[39] RIDLO, F. et al. Influence of aluminum on microstructure and mechanical properties of air-hardened medium manganese steel. **Steel Research International**, v. 96, n. 7, p. 2400869, 2025.

[40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **(ABNT). SAE J404**: composição química dos aços-carbono ligados ao sistema de classificação dos aços. 2000.

[41] POLISHKO, S. Complex effect of sulfur and phosphorus on the characteristics of wheel steel of KP-T brand before and after modification. **Technology Audit and Production Reserves**, v. 2, n. 1, p. 58, 2021.

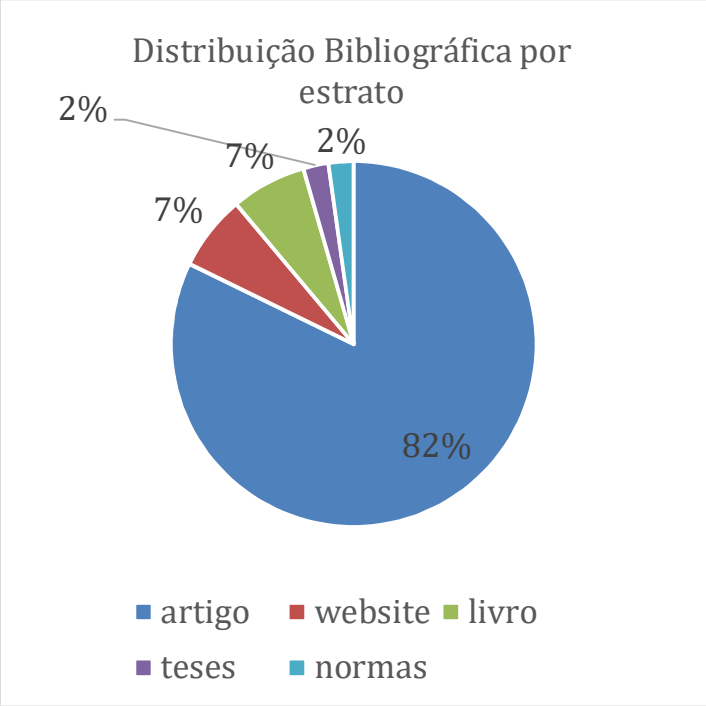
[42] GRANGE, R. A. Effect of microstructural banding in steel. **Metallurgical Transactions**, v. 2, p. 417-426, 1971.

[43] ZHAN, N.; HU, Z.; ZHANG, X. Experimental investigation of fatigue crack growth behavior in banded structure of pipeline steel. **Metals**, v. 10, n. 9, p. 1193, 2020.

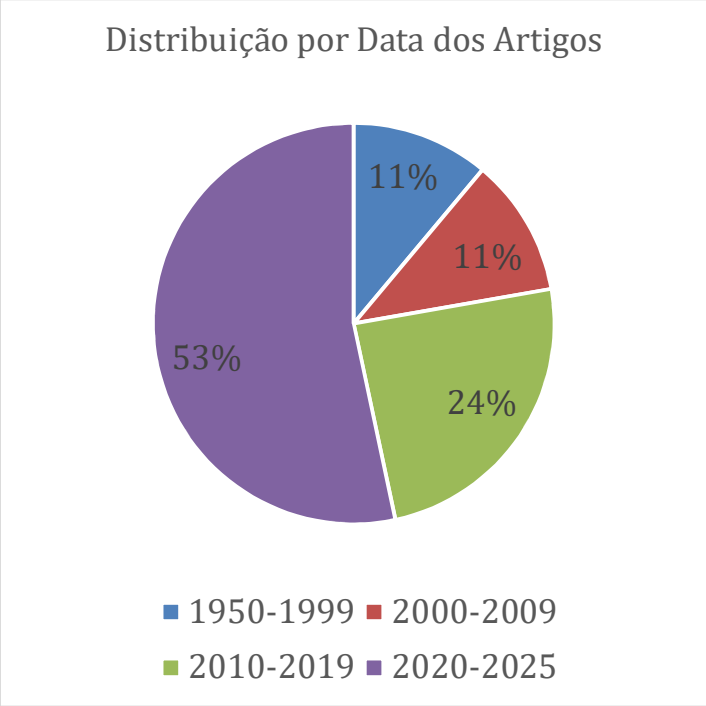
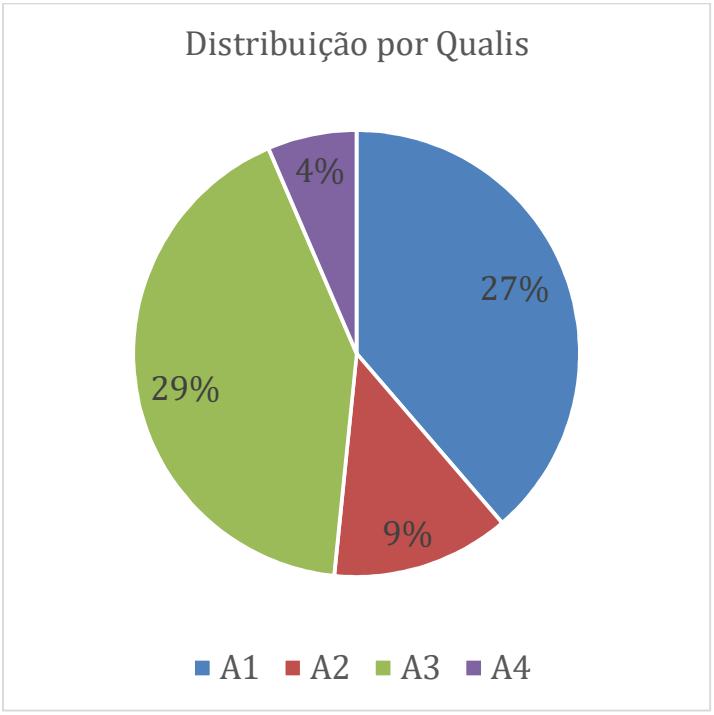
[44] ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook**. v. 12: Fractography. 9. ed. Materials Park, OH: ASM International, 1987.

[45] SONMEZ, F. O. Optimal shape design of shoulder fillets for flat and round bars under various loadings. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: **Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 223, n. 8, p. 1741-1754, 2009.

8.2 REFERÊNCIAS POR ESTRATO



8.3 REFERÊNCIAS POR DATA



8.4 REFERÊNCIAS POR QUALIS