

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL**

**Warley Davidson dos Reis**

**Análise de falha de eixo de bomba centrífuga**

**Itabira/MG - 2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS –**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**Warley Davidson dos Reis**

**Análise de falha de eixo de bomba centrífuga**

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais

**Área de Concentração: Desenvolvimento, Processamento e Caracterização de Materiais**

**Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Lacerda**

**Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Luiz Perez Teixeira**

**Itabira/MG - 2023**

Dedico este trabalho a Deus, que sempre foi o autor da minha vida e a minha mãe, que já se foi, mas continua sendo minha maior força e inspiração na vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças para vencer as dificuldades para alcançar meus sonhos.

Em memória de minha mãe, responsável por este momento tão marcante em minha vida, que onde ele esteja agora possa desfrutar de minha felicidade juntamente comigo.

A minha namorada pelo apoio durante esta caminhada.

Aos professores Dr. José Carlos de Lacerda e Dr. Ricardo Luiz Perez Teixeira, pelo comprometimento, ajuda, companheirismo e amizade para me suportar para a realização deste trabalho. Sem eles e suas primordiais orientações não seria possível a conclusão deste trabalho.

Ao Anibal pelo auxílio nas simulações computacionais.

A todos que estiveram ao meu lado durante esta caminhada, os meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo identificar as causas de rupturas ocorridas em eixos de bombas centrífugas utilizadas no bombeamento de polpa de minérios de ferro em uma grande planta de mineração. A ruptura de eixo desse tipo de bomba pode danificar outros componentes do conjunto, levando a maiores comprometimentos no desempenho do equipamento. Sendo assim, na busca do objetivo proposto, foi realizada uma cuidadosa revisão bibliográfica sobre bombas centrífugas, tipos de fratura, fadiga e propriedades dos aços estruturais usados em eixos de bombas centrífugas (ABNT 1045 e ABNT 4140). Foram feitos também estudos relacionados com integridade estrutural, fadiga, modos de falha, tipos de carregamentos e morfologia de fraturas. Quanto à parte experimental foi realizada uma cuidadosa análise dos eixos fraturados utilizando, dentre outras, as seguintes técnicas: inspeção visual, ensaio mecânicos convencionais (tração, ensaio de impacto Charpy, ensaio de dureza, fadiga por flexão rotativa (curva S-N), análise micrográfica, microfractografia por MEV e simulação computacional. Com base nos estudos realizados, foi possível concluir que as fraturas dos eixos das bombas centrífugas foram motivadas pela combinação de fadiga potencializada por concentrações de tensão e sobrecargas.

Palavras-chave: análise de falha, bomba centrífuga, ruptura por fadiga, simulação CAE.

## ABSTRACT

The present work aims to identify cause(s) of failures that occurred in centrifugal pump shafts used in the pumping of iron ore pulp in a large mining plant. The breaks of this type of pump shaft can damage other components, leading to further performance compromises of the equipment. Thus, in the search for the proposed objective, a careful bibliographic review was performed on centrifugal pumps, types of fracture, fatigue and properties of structural steels used in centrifugal pump shafts (ABNT 1045 and ABNT 4140). Studies related to structural integrity, fatigue, failure modes, types of charges and morphology of fractures have also been done. Regarding the experimental part, a careful analysis of the fractured shafts using, among others, the following techniques: visual inspection, conventional mechanical tests (tensile test, Charpy impact test, hardness testing, rotary flexion fatigue test (S-N), micrographic analysis, SEM microfractography and computer simulation. Based on the studies, it was possible to conclude that the breaks of centrifugal pump shafts were motivated by a combination of fatigue potentiated by stress concentrations and occasional overloads.

Keywords: failure analysis, centrifugal pump, fatigue failure, CAE simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma de um processo de beneficiamento de polpa de minérios de ferro...	20
Figura 3.2 – Bomba centrífuga radial para polpa de minérios de ferro.....	20
Figura 3.3 – Morfologias típicas de fraturas de fadiga por flexão rotativa.....	25
Figura 3.4 – Locais típicos de concentração de tensão em eixos de bombas centrífugas.....	26
Figura 3.5 – Abordagem tradicional de projeto de engenharia.....	28
Figura 3.6 – Abordagem de projetos pela mecânica da fratura.....	29
Figura 3.7 – Critério da energia de Griffith.....	30
Figura 3.8 – Correlação entre tensão de falha ( $\sigma_f$ ) e tamanho crítico de trinca ( $a_c$ ).....	31
Figura 3.9 – Representação de descontinuidade em um material.....	32
Figura 3.10 – Comportamento de $K_{Ic}$ em função da espessura do aço com $\sigma_y = 2.273,0\text{MPa}$ .....	33
Figura 3.11 Aplicação de tensão em carregamentos cíclicos com amplitude constante: a) ciclo completamente invertido com tensão média = 0; b) ciclo de tensão com média diferente de zero; c) ciclo de tensão de zero a tração.....	34
Figura 3.12 – Representação esquemática de bandas de deslizamento persistente em um material submetido à fadiga.....	36
Figura 3.13 – Curva sigmoideal típica de crescimento de trinca por fadiga em metais.....	37
Figura 3.14 – Curva R de resistência plana para materiais com comportamento frágil.....	38
Figura 3.15 – Curva R de resistência ascendente para materiais com comportamento dúctil.....	39
Figura 3.16 – Representação esquemática de fratura de um material com comportamento frágil.....	41
Figura 3.17 – Representação esquemática de fratura dúctil.....	42
Figura 3.18 – Representação esquemática do processo da fratura dúctil.....	42
Figura 4.1 – Eixos fraturados; a) aço ABNT 1045; b) aço ABNT 4140. As setas destacam-se as regiões de fratura. As setas destacam-se as regiões de fraturas.....	43
Figura 4.2 – Desenho dos eixos fraturados.....	43
Figura 4.3 – Representação esquemática do corpo de prova para ensaio de tração (Norma ASTM E8-16).....	44
Figura 4.4 – Representação esquemática do corpo de prova para ensaio de impacto Charpy. (Norma ASTM E23-18).....	45
Figura 4.5 – Representação esquemática do corpo de prova para ensaio de fadiga (Norma ASTM E466-15).....	45

Figura 5.1 – Curvas tensão x deformação de corpos de provas dos eixos ABNT 1045 e 4140.....	46
Figura 5.2 – Fratura de corpos de prova por tração em aço ABNT 1045: (a) borda; (b) centro.....	47
Figura 5.3 – Fratura de corpos de prova por tração em aço ABNT 4140: (a) borda; (b) centro (MEV).....	48
Figura 5.4 – Fraturas de corpos de prova de impacto Charpy em corpo de prova: a) ABNT 1045; b) ABNT 4140 (MEV).....	50
Figura 5.5 – Curva SN de fadiga por flexão rotativa de amostras extraídas de eixo ABNT 1045.....	51
Figura 5.6 – Fratura por fadiga de corpos de prova do aço ABNT 1045 (MEV).....	52
Figura 5.7 – Curva SN de fadiga por flexão rotativa de corpos de prova de amostras extraídas de eixo ABNT 4140.....	52
Figura 5.8 – Fratura de corpos de prova do ensaio de fadiga da amostra do aço ABNT 4140 (MEV).....	53
Figura 5.9 – Microestrutura do aço ABNT 4140 (MEV).....	54
Figura 5.10 – Fractografia do eixo de aço ABNT 4140: (a) Face da fratura; (b) Vista da região da rosca fraturada.....	55
Figura 5.11 – Modelagem 3D do eixo fraturado de um aço ABNT 4140; Software ANSYS.....	55
Figura 5.12 – Malha para simulação numérica de carregamento de eixo de um aço ABNT 4140; Software ANSYS.....	56
Figura 5.13 – Localização de mancais de rolamento, de restrição e aplicação de torque de um aço ABNT 4140; Software ANSYS.....	56
Figura 5.14 – Distribuição de tensões simuladas: (a) em todo o eixo; (b) região crítica, ponta do eixo de um aço ABNT 4140; Software ANSYS.....	57



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1 – Composição química típica dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140 (% em peso)..	42
Tabela 5.1 – Análise química (% em peso).....	46
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas de tração dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140.....	47
Tabela 5.3 – Durezas das amostras dos eixos ABNT 1045 e ABNT 4140.....	48
Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de impacto Charpy.....	49

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSYS® – Análise de Systems

ASM – *American Society of Metals*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAE – Engenharia auxiliada por computador

EDS – espectroscopia por energia dispersiva

MEV – microscópio eletrônico de varredura

SAE – *Society of Automotive Engineers*

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

**LISTA DE SÍMBOLOS**

a – comprimento da trinca  
a<sub>c</sub> – tamanho crítico da trinca  
B – espessura  
B<sub>c</sub> – espessura crítica  
D – diâmetro  
da – Variação de comprimento de trinca  
dN – Variação de número de ciclos  
E – módulo de elasticidade  
f – fator geométrico da trinca  
G – energia de Griffith  
G<sub>c</sub> – energia crítica de Griffith  
GPa – giga Pascal  
HRB – dureza Rockwell B  
HRC – dureza Rockwell C  
HRW – dureza Rockwell W  
J – joule  
K – fator de intensidade de tensão  
K<sub>c</sub> – tenacidade à fratura  
K<sub>IC</sub> – tenacidade à fratura  
kN – kilo Newtons  
kN – kilo Newton  
MnS – sulfeto de manganês  
MO – microscópio ótico  
MPa – mega Pascal  
N – número de ciclos  
N<sub>f</sub> – número de ciclos até a falha  
*PSBs* – bandas de deslizamento persistentes  
R – razão de carga  
S – tensão  
S<sub>max</sub> – tensão máxima  
T – temperatura  
t – tempo  
W – largura

$\Delta K$  – variação do fator de intensidade de tensão

$\varepsilon_{\text{máx}}$  – porcentagem máxima de alongamento

$\sigma$  – tensão

$\sigma_f$  – tensão crítica da fratura

$\sigma_{\text{máx}}$  – tensão máxima

$\sigma_{\text{min}}$  – tensão mínima

$\sigma_{\text{uts}}$  – tensão limite de resistência

$\sigma_y$  – tensão limite de escoamento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
3.1 Processo de Beneficiamento de Polpa de Minérios.....	18
3.2 Bombas Centrífugas.....	20
3.3 Eixo de Bomba Centrífuga.....	22
3.4 Fratura em Eixos de Bombas Centrífugas.....	24
3.5 Integridade Estrutural.....	26
3.6 Tipos de abordagens de projetos de engenharia.....	27
3.6.1 Abordagem Tradicional.....	28
3.6.2 Abordagem pela Mecânica de Fratura.....	29
3.7 Critérios para análises de falha por fratura.....	29
3.7.1 Critério da energia.....	30
3.7.2 Critério do limite de resistência.....	32
3.8 Crescimento de trinca por fadiga.....	34
3.8.1 Estágios de propagação de trincas por fadiga.....	35
3.8.2 Curvas “R”.....	38
3.9 Tipos de Fraturas.....	39
3.9.1 Fratura frágil.....	40
3.9.2 Fratura dúctil.....	41
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
4.1 Materiais.....	43
4.2 Procedimentos Experimentais.....	43
4.2.1 Composição química .....	43
4.2.2 Ensaio de dureza.....	43
4.2.3 Ensaio de tração.....	43
4.2.4 Ensaio de impacto Charpy.....	43
4.2.5 Ensaio de fadiga.....	44
4.2.6 Caracterização de fraturas.....	45
4.2.7 Análise de Tensão por ANSYS.....	45
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>

5.1 Composição química.....	46
5.2 Ensaio de tração.....	46
5.3 Ensaio de Dureza.....	48
5.4 Ensaio de impacto Charpy.....	49
5.5 Ensaio de fadiga por flexão rotativa.....	50
5.6 Microestrutura do aço ABNT 4140.....	54
5.7 Análise da fratura do eixo fabricado em aço ABNT 4140.....	54
5.8 Análise de tensão por ANSYS no eixo aço ABNT 4140.....	55
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>66</b>
<b>PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM O TRABALHO.....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade industrial crucial para a economia de diversos países, incluindo o Brasil. O beneficiamento de minérios de ferro, consiste de operações físico-químicas que tem como principal objetivo preparar o material para o seu próximo processamento. Dentre os processos de beneficiamento podem ser citados: cominuição (redução e separação por tamanhos, geralmente a seco), classificação (separação de espécies minerais) e concentração (separação de sólidos e líquidos). Para a obtenção dos minérios de ferro como produto final, são utilizados diversos equipamentos, tais como: britadores, peneiras, transportadores de correia, moinho de bolas, hidrociclones, células de flotação, espessadores, agitadores de polpa e bombas centrífugas, dentre outros.

A operação de equipamentos em ambientes agressivos, como as plantas de processamento de minérios, pode resultar em falhas prematuras que causam perdas significativas de produção e aumento de custos de manutenção. Quando se fala especificamente no processo de beneficiamento a úmido, as bombas centrífugas são equipamentos de extrema relevância, pois são as responsáveis pela transferência de massa líquida, sob a forma de polpa de minérios, no processamento. A ocorrência de falhas nessas bombas centrífugas, em determinados pontos da unidade, pode acarretar em parada total de produção de uma planta.

As bombas centrífugas possuem vários componentes em sua construção. O eixo é um dos principais, pois, o mesmo é o responsável por transmitir torque gerado pelo motor ao rotor que por sua vez transmite energia cinética ao fluido. Esses eixos, normalmente são fabricados em aços temperados e revenidos do tipo ABNT 1045 ou ABNT 4140. Como citado, a quebra de um eixo desses cessa completamente a função da bomba. Por isso, diante de um evento desse é requerido um estudo minucioso visando identificar causas para a proposição de medidas que previnam reincidência. Nesse sentido, o presente trabalho estudou fraturas (rupturas) que têm ocorrido em eixos de bombas centrífugas empregadas no bombeamento de polpa de minérios de ferro de uma grande mineradora.

De acordo com o que há de consenso em relação ao estado da arte sobre eixos de bombas centrífugas em mineradoras, a sua vida útil depende de vários fatores, incluindo o tipo de bomba, o tipo de minério sendo processado, a velocidade de operação da bomba, as condições de carregamento (carregamento cíclico ou não, sobrecargas), temperatura e pressão do fluido, e o ambiente em que a bomba está instalada. Alguns estudos sugerem que a vida útil média de eixos

de bombas centrífugas em aplicações de mineração pode chegar a mais de dois anos. No entanto, isso pode variar significativamente com base nos fatores mencionados acima. Uma das principais causas de fratura de eixo de bombas centrífugas pode ser motivada pelo travamento dos rolamentos por eventual vazamento de fluido abrasivo. Outra estratégia para prolongar a vida útil do eixo da bomba é a manutenção preventiva adequada, incluindo a inspeção regular, a troca de peças gastas e lubrificação adequada. Em geral, a pesquisa sobre a vida útil do eixo da bomba em aplicações de mineração está em constante evolução, com o desenvolvimento contínuo de novos materiais e técnicas de manutenção.

Para a realização desse trabalho foi feito inicialmente uma cuidadosa revisão bibliográfica sobre os seguintes tópicos: bombas centrífugas, tipos de fratura, fadiga, propriedades de aços estruturais usados em eixos de bombas centrífugas (ABNT 1045 e ABNT 4140), integridade estrutural, fadiga, modos de falha, tipos de carregamentos e morfologia de fraturas. Numa segunda etapa foi realizado um minucioso levantamento de dados operacionais e de ocorrências envolvendo o funcionamento das bombas centrífugas nos últimos tempos, para que se pudesse ter informações históricas preliminares do equipamento. A terceira etapa do trabalho constituiu-se da parte experimental na qual foram realizadas análises dos eixos fraturados, utilizando das seguintes técnicas: inspeção visual, mecânicos convencionais (tração, ensaio de impacto Charpy, ensaio de dureza, fadiga por flexão rotativa (curva S-N), análise micrográfica, microfractografia por MEV e simulação de engenharia auxiliada por computador (CAE).



## **2. OBJETIVOS**

Os objetivos gerais e específicos desse presente trabalho serão descritos a seguir.

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar falha de eixos de bombas centrifugas aplicadas no bombeamento de polpa de minérios de ferro quanto ao tipo de fratura e as suas propriedades mecânicas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar propriedades mecânica dos aços dos eixos fraturados (tração, dureza, impacto e fadiga).
- Caracterizar as microestruturas e fraturas dos eixos fraturados.
- Identificar a composição química dos aços dos eixos fraturados.
- Realizar estudos com aplicação de metodologias da Mecânica de Fratura.
- Analisar distribuição de tensão no eixo por simulação numérica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentado uma revisão bibliográfica sucinta sobre, o processo de beneficiamento de minério no local da falha, bombas centrífugas, eixos, mecanismos de fratura em eixos e o fenômeno da fadiga.

#### 3.1 Processo de beneficiamento de polpa de minérios

Visando situar a localização das bombas centrífugas, objeto desse estudo, apresenta-se na Figura 3.1 o fluxograma de um estágio de beneficiamento de polpa de minério de ferro de uma mineradora. Nesse processo, que visa separar partículas sólidas da polpa de minério, a bomba tem sua tubulação de sucção ligada ao tanque de polpa de minério de ferro e a sua tubulação de recalque ligada a hidrociclones. Hidrociclone é um equipamento destinado à separação de sólidos dispersos em meio líquido. Nesse equipamento a força centrífuga gerada na polpa de minério associada com as diferenças de densidade e granulometria das partículas sólidas, promovem o processo de separação. A bomba centrífuga é a responsável pela geração da força centrífuga necessária para que a polpa de minério tenha suficiente energia cinética na entrada dos hidrociclones para promover a separação das partículas. Como pode ser observado, a bomba centrífuga é equipamento chave no processo de beneficiamento de polpa de minério.

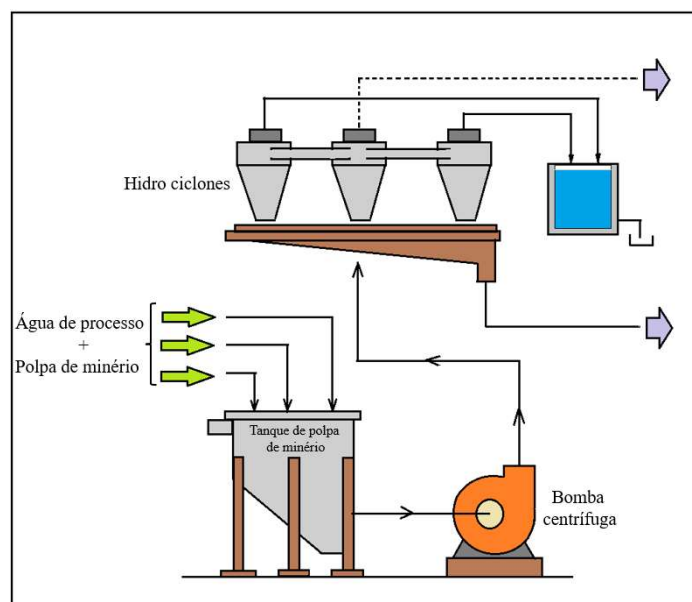


Figura 3.1 – Fluxograma de um processo de beneficiamento de polpa de minérios de ferro.

Além da instalação física da bomba de polpa de minério de ferro, há os seus parâmetros operacionais que são definidos de acordo com o balanço de massas da produção da planta. Os

dados de reologia da polpa de minérios de ferro, obtidos por ensaios de laboratório são necessários para definições de projetos de instalação de bombeamento correlatas. No Anexo 1 e 2 são apresentados, respectivamente, a “Folha” de Dados técnicos da e a Curva de Desempenho de Bomba.

### 3.2 Bombas Centrífugas

Segundo Carvalho (1999), em conformidade com o *Hydraulic Institute*, as bombas hidráulicas podem ser classificadas em dois grandes grupos: centrífugas (bombas de deslocamento não positivo) e volumétricas (bombas de deslocamento positivo). As bombas centrífugas são máquinas de fluxo que trabalham com o fluido entrando no rotor paralelamente ao seu eixo e operam segundo o princípio da variação da quantidade de movimento. Bomba centrífuga é uma máquina rotativa na qual o fluxo e a pressão são gerados dinamicamente transportando fluido pelas pás por efeito centrífugo para a extremidade da sua carcaça em forma de uma voluta em espiral, seguindo trajetórias contidas em planos normais ao seu eixo (KARASSIK, *et al.*, 2007). A energia gerada pelo rotor transmite energia cinética para o fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro no sistema (FIALHO, 2018). A denominação de “bomba centrífuga” se deve à sua principal força (força centrífuga) ser a responsável pela maior parcela da energia que o fluido recebe ao atravessar a mesma (MACINTYRE, 1997).

Para Carvalho (1999), a especificação de uma determinada instalação de bombeamento centrífugo se fundamenta em duas grandezas básicas: vazão a ser recalçada e altura manométrica da instalação (pressão). Quando se trata de bombeamento centrífugo de polpa de minérios de ferro, cada sistema projetado é único. Durante a fase de projeto, quando é realizado o dimensionamento do sistema de bombeamento, é levado em consideração as características da polpa para evitar sedimentação do material ao longo da linha, assim como desgaste excessivo por abrasão na própria bomba. Para cada aplicação deve-se conhecer as características da reologia do material bombeado devido à sua influência na altura manométrica e eficiência da bomba (MOORE; BELBUSTI, 2001).

Na Figura 3.2 apresenta-se imagem de uma bomba centrífuga aplicada em sistema de bombeamento de polpa de minérios de ferro com destaque para os seus principais elementos construtivos.

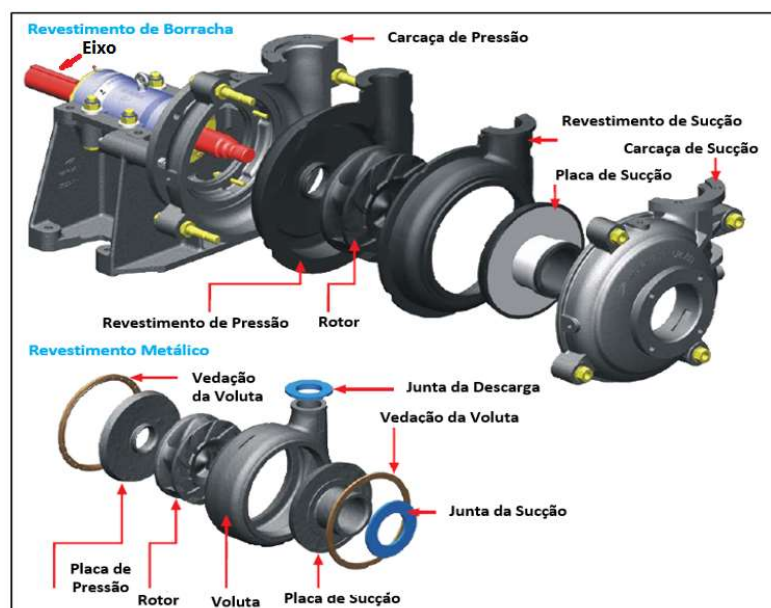


Figura 3.2 – Bomba centrífuga radial para polpa de minérios de ferro.

Devido a abrasão (particularmente pela sílica) que os componentes internos são expostos, as bombas de polpa são constituídas de carcaças externas fabricadas em ferro fundido do tipo ASTM A48 CL 30 com revestimentos internos em borracha natural ou ligas de alta dureza como o aço ASTM A573 CL IIIA, conforme se apresenta na Figura 3.2. Todos os componentes são importantes para funcionamento de uma bomba centrífuga, contudo o rotor é uma de seus componentes mais importante por ser o responsável por ceder energia cinética diretamente ao fluido para promover o seu deslocamento. Para tanto, o rotor necessita ser acionado por um eixo que irá transmitir a potência necessária para o bombeamento do fluido. Esse eixo é projetado para resistir ao torque para transmitir movimento de rotação para o rotor, bem como sustentar a carga do peso próprio do rotor e a carga dinâmica do fluido bombeado (ANKITA *et al.*, 2020).

Quanto à operação das bombas centrífugas, especial atenção deve ser dada para se evitar a ocorrência de cavitação. A cavitação é um fenômeno associado à formação de bolhas de vácuo nas regiões de baixa pressão da bomba (MACINTYRE, 1997). Nesse caso, essas bolhas de vácuo se formam nas áreas de baixa pressão e são novamente transformadas em líquido ao atingirem regiões de maiores pressões, causando uma espécie de implosão. A formação e colapso destas bolhas pode causar sérios problemas às bombas, tais como: queda de altura manométrica, redução de eficiência hidráulica e vibrações que poderão causar danos mecânicos ao eixo e aos rolamentos (KARASSIK, *et al.*, 2007).

### 3.3 Eixo de Bomba Centrífuga

Eixo é um elemento de máquina que pode apresentar movimento rotacional ou não sendo suportado por mancais e/ou rolamentos. O eixo quando tem a função de transmitir energia cinética para gerar torque são denominados como árvores (MONTEIRO, 2004) (BACHUS & CUSTODIO, 2003). Os eixos podem se apresentar com seção transversal cilíndrica, quadrada, sextavada, etc. Os eixos ou as árvores são projetados para serem fixos ou giratórios, e com a finalidade também de sustentar elementos de máquinas.

Eixos de bombas centrífugas são usualmente cilíndricos e maciços, com uma extremidade roscada para montagem do rotor e a outra com chaveta para o seu acoplamento ao sistema de transmissão de força e torque (buchapolia ou acoplamento). O eixo é um dos componentes de grande criticidade quando se trata de aplicação em bombas de polpa de minérios. Nesse caso, o mesmo transmite o movimento de torque, podendo haver ainda momento fletor devido à sua condição de viga em balanço sustentando o rotor (GU *et al.*, 2020).

Para Ankita *et al.* (2020), quando é projetado o eixo de uma bomba centrífuga, o mesmo deve ser capaz de transmitir movimento de rotação ao rotor e sustentar o seu peso próprio acrescido daquele do rotor. A sustentação desse peso gera esforço de flexão no eixo.

Outro aspecto importante de ser considerado é quanto às velocidades críticas de rotação evitando-se a operação do equipamento nas frequências naturais a fim de se prevenir quanto ao fenômeno da ressonância (MONTEIRO, 2004) (SHIGLEY, 1984).

O projeto de um eixo de bomba centrífuga requer cuidados específicos para garantir a segurança e durabilidade do equipamento. A fratura de eixo de bomba centrífuga é uma das falhas mais comuns em componentes desse tipo de bomba. Pode ser causada por sobrecargas e/ou esforços repetitivos que geram tensões cíclicas que levam à fadiga do material. Para prevenir esse tipo de falha, é necessário considerar fatores como o tipo de material utilizado, acabamento superficial, geometria do eixo, distribuição das cargas, microestrutura, etc. Além disso, é preciso avaliar a interação do eixo com os demais componentes da bomba, principalmente o rotor, para garantir o correto dimensionamento e evitar vibrações excessivas que possam comprometer a sua integridade (TUZSON, 2018).

De acordo com Ankita *et al.* (2020), eixos para bombas centrífugas de grande porte podem

utilizar diferentes tipos de aços carbono, a saber: aços carbono da série 1XXX, aços temperados e revenidos da série 4XXX (aço ao Mo) e os aços da série 8XXX (aço ao Ni-Cr-Mo). Normalmente os aços mais empregados na fabricação desse tipo de eixo são os de médio carbono ABNT 1045 e ABNT 1050, laminados a frio ou a quente. Esses aços carbono da série 1XXX apresentam menores custos comparados com aços carbono ligados. Mesmo com os avanços tecnológicos nos processos siderúrgicos mais modernos, esses apresentam inclusões alongadas de MnS que favorecem a sua fragilização, contribuindo para a nucleação de trinca por fadiga. Aços inoxidáveis martensíticos dos tipos ABNT 41, ABNT 42, ABNT 43 e ABNT 86 se apresentam como alternativa para maior vida em fadiga em comparação com os aços carbono mencionados (ANKITA *et al.* 2020).

De acordo com Berndt & Van Bennekom (2001), as causas mais comuns de quebras em bombas de polpa de minérios de ferro incluem fadiga, corrosão, fadiga-corrosão, desgaste, sobrecarga e vibração excessiva. A fadiga é frequentemente associada a ciclos repetidos de carga e descarga, enquanto a corrosão pode ser causada, dentre outros, por ácidos presentes na polpa. O desgaste, por sua vez, é uma consequência natural do atrito e pode ser agravado por partículas abrasivas presentes na polpa. A sobrecarga e a vibração excessiva podem ser causadas por condições operacionais inadequadas, tais como obstruções no sistema de tubulação, cavitação ou variações de fluxo.

Alguns estudos sugerem que a vida útil média do eixo de bombas centrífugas em certas aplicações pode chegar a até mais de dois anos, como é o caso relatado por Ankita *et al.* (2020) em uma aplicação em bombeamento de recirculação de água de refrigeração de um alto forno. No entanto, sabe-se que esse tempo pode ser muito reduzido quando se trata de bombeamento de polpa de minérios pelas maiores cargas envolvidas pela polpa e o efeito da sílica no desgaste. Nesse caso, é importante destacar que o tempo de vida útil de eixo de bombas centrífugas de mineração é influenciado pelo tipo de polpa de minério (reologia) que está sendo bombeada, podendo nesse caso, acelerar a falha do eixo. Em resumo, a vida útil do eixo de bombas centrífugas em aplicações de mineração pode variar amplamente, mas é essencial que as empresas implementem estratégias de manutenção preventiva e monitoramento regular para maximizar a durabilidade e reduzir o tempo de inatividade não planejado.

Outro ponto importante na fase de projeto de um eixo é buscar o seu menor comprimento possível, a fim de se minimizar os níveis de tensão dinâmica produzidas pela combinação da rotação e flexão (fadiga por flexão rotativa). Além disso, há ainda muitas outras recomendações

que podem aumentar a vida em fadiga desses eixos. Dentre essas recomendações, cita-se: bom acabamento superficial, evitar concentradores de tensão como cantos vivos (adotando-se raios de “adoçamento” nas mudanças de diâmetros), microestrutura superficial mais refinada possível; indução de tensões superficiais compressivas (podendo ser produzida por jateamento); maior dureza superficial produzida por tratamentos térmicos ou termoquímicos.

### 3.4 Fratura em Eixos de Bombas Centrífugas

De acordo com Gu *et al.* (2020), é absolutamente essencial analisar falhas que venham ocorrer em eixos de bomba de polpa de minérios, principalmente quando se trata de fraturas, para se evitar eventos semelhantes no futuro. As análises podem ser feitas por meio de ensaios destrutivos (que envolvem a retirada de corpos de prova do componente) e/ou ensaios não destrutivos (que permitem a intervenção diretamente no próprio componente).

Provavelmente, a causa mais comum de falha nos eixos das bombas é o fenômeno de fadiga. Para que a fadiga ocorra, uma tensão de tração cíclica é necessária, bem como um local de iniciação de trinca na forma de um concentrador de tensão. Assim, elementos rotativos em bombas, como os eixos, são susceptíveis à fadiga pela natureza de sua operação (BERNDT & VAN BENNEKOM, 2001).

Aumento no momento fletor em eixos de bombas centrífugas pode ser motivado por desalinhamento, rolamentos desgastados e/ou com tensão excessiva em correias de transmissão. O momento fletor pode produzir diferentes tipos de carregamentos de fadiga, conforme abaixo discriminado:

1. Fadiga por flexão unidirecional - ocorre quando o eixo flexiona em apenas uma direção e, portanto, um ponto na superfície do eixo experimenta uma tensão de tração.
2. Fadiga por flexão reversa - ocorre quando o eixo se move em duas direções opostas uma em relação à outra e dois pontos opostos no eixo experimentam tensões alternadas de tração e compressão.
3. Fadiga por flexão rotativa (bidirecional) - ocorre quando todos os pontos ao longo da circunferência do eixo experimentam tensões de tração e compressão alternadas. Esse é o tipo mais comum de falha por fadiga em eixos de bombas centrífugas.

Na Figura 3.3 apresentam-se as principais configurações de morfologias típicas de fraturas de fadiga que ocorrem em eixos submetidos a carregamentos do tipo flexão rotativa. Nesse caso, na Figura 3.3(a,c) são apresentadas as configurações típicas de superfícies de fraturas que apresentam uma única origem da fratura em moderado e alto grau de concentração de tensão, respectivamente. Por outro lado, na Figura 3.3(b, d) são apresentadas aparências esperadas quando há múltiplas origens de iniciação de trincas da fratura em moderado e alto grau de concentração de tensão, respectivamente.

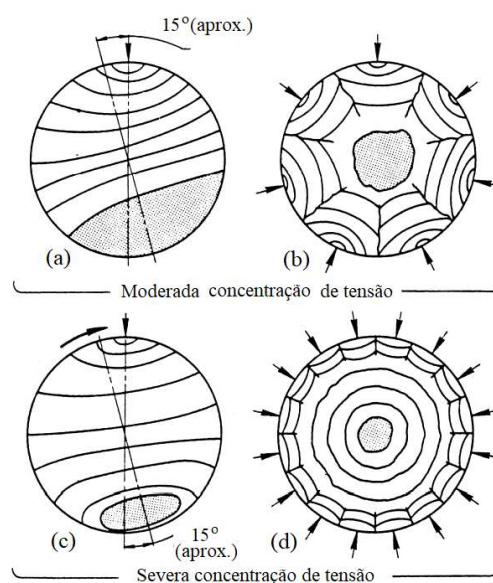


Figura 3.3 – Morfologias típicas de fraturas de fadiga por flexão rotativa (adaptado de: Berndt & Van Bennekom, 2001).

Conforme Berndt & Van Bennekom (2001), os locais de concentração de tensão nos eixos de bombas centrífugas onde trincas por fadiga podem ter início são ilustrados na Figura 3.4. As áreas mais comuns de iniciação de trincas estão localizadas nas concentrações de tensão que ocorrem na raiz de chavetas, fundo de filetes de roscas e nos raios de mudanças bruscas de áreas da seção transversal do eixo. Esses locais de concentração de tensão, sempre que possível devem ser evitados ao se projetar eixos em geral para bombas centrífugas. Indicadores do grau de concentração de tensão devido a fatores geométricos (fator de concentração de tensão) podem ser calculados (ANDERSON, 2017).



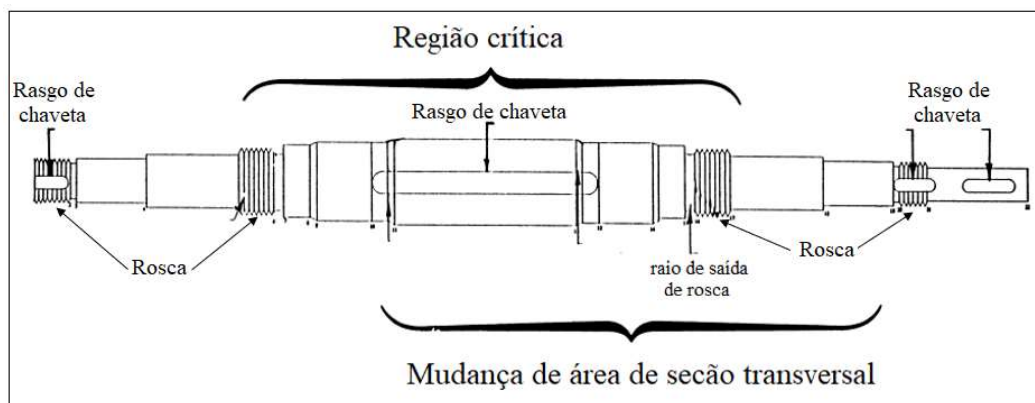


Figura 3.4 – Locais típicos de concentração de tensão em eixos de bombas centrífugas (adaptado de: Berndt & Van Bennekom, 2001).

De acordo com Anderson (2017), pontos de concentração de tensão em componente mecânico reduz a sua resistência à fadiga. Os aços de uma maneira geral têm o que é conhecido como um limite de fadiga, que é uma tensão abaixo da qual a propagação da trinca por fadiga não ocorrerá, independentemente do número de ciclos. Nesse caso, concentradores de tensão reduzem esse limite de fadiga, tornando o material susceptível à fadiga.

### 3.5 Integridade estrutural

Integridade estrutural é a ciência que visa garantir a segurança e a confiabilidade de estruturas nas mais diferentes áreas da engenharia. A integridade estrutural orienta os projetos de engenharia para garantir uma estrutura com capacidade de resistir a cargas externas e internas, sem falhar. Dentro da visão da integridade estrutural, a busca por se evitar fratura de elementos que compõem estruturas mecânicas cada vez mais vem ocupando lugar de destaque. Por isso que quando se fala em integridade estrutural são buscados imediatamente os conhecimentos da Mecânica da Fratura na orientação de projetos de engenharia devido aos crescentes desafios das complexas demandas tecnológicas (ANDERSON, 2017).

Os conceitos de integridade estrutural e consequentemente da Mecânica de Fratura são relativamente recentes tendo as suas aplicações ganhado mais impulso após a segunda guerra mundial. Apesar do conhecimento de integridade estrutural e da Mecânica de Fratura estarem atualmente bem consolidados, mesmo nos dias atuais, muitas vezes é mal aplicado ou até mesmo negligenciado. Nesse caso, inevitavelmente as consequências quase sempre são catastróficas (ANDERSON, 2017).

De acordo com Anderson (2017), em situações de ocorrência de falha de uma estrutura é normal que se faça uma profunda investigação visando identificar a(s) causa(s) da falha. Afinal, estruturas não foram projetadas para falhar. No entanto, se isso acontece é porque algum procedimento de não conformidade foi adotado. Nesse contexto, há dentro do conceito de integridade estrutural, dois importantes potencializadores de causas de quebra ou falha de uma estrutura:

1. Negligência. Ocorre quando nas etapas do projeto, da construção ou da operação da estrutura, os conhecimentos existentes tradicionais e os que empregam metodologia da Mecânica de Fatura deixam de ser considerados;
2. Alteração de projeto ou proposição de novos materiais. Ocorre quando há adaptações em projetos já existentes sem o devido cuidado com análise das consequências.

No primeiro caso, pode-se considerar que existem procedimentos e conhecimentos disponíveis mais do que o suficiente para que nas fases do projeto, da construção e da operação de uma estrutura fossem prevenidas quaisquer falhas. No entanto, esses procedimentos e conhecimentos, por algum motivo, não são considerados pelas pessoas. Quanto a essas motivações, podem ser: erro humano, ignorância ou até mesmo má conduta intencional. A existência de mão de obra não especializada, aplicação de materiais fora de norma, erros de análises de tensão e erros de operação, impedem a aplicação de experiências e tecnologias apropriadas.

No caso da segunda razão, a alteração de projeto e de material, é mais difícil de se prevenir que falhas possam ocorrer. Em uma alteração de projeto mal avaliada, dificilmente o projetista consegue prever as suas consequências. No caso de utilização de novos materiais em substituição àqueles originalmente empregados, pode oferecer inicialmente muitas vantagens, mas também potenciais problemas futuros. Por isso há que se considerar que novos projetos ou novos materiais só devem ser aplicados após extensivas análises e ensaios. Apresenta-se neste estudo considerações iniciais sobre integridade estrutural, estas poderão ser desenvolvidos em trabalhos subsequentes para estudos mais aprofundados.

### **3.6 Tipos de Abordagens de Projetos de Engenharia**

Um projeto de engenharia nasce a partir da necessidade de um produto. O produto pode ser

oriundo de uma ideia inovadora ou de uma adequação de projeto já existente visando melhoria de desempenho, redução de custo de fabricação, etc. Um projeto de engenharia pode ser elaborado segundo dois tipos de abordagem:

### 3.6.1 Abordagem Tradicional

Para projetos mais simples usualmente utiliza-se abordagem tradicional. Esse tipo de abordagem se aplica no caso de carregamento estático. Nesse caso, o projeto se orienta pelo dimensionamento de forma que o limite de escoamento ou limite de resistência do material sejam maiores que os esforços sofridos pelo componente. Especialmente o limite de resistência (LE) pois os materiais trabalham em níveis inferiores que o LE.

A definição das tensões atuantes nos componentes e/ou conjuntos é muito importante nesse tipo de abordagem de projeto. A definição das tensões atuantes é que orientará quanto à seleção de material e dimensionamento. Importante observar que além da escolha do material faz-se também a especificação dos processos de conformação, união e acabamento que será aplicado ao material (ASHBY, 2012). A abordagem tradicional de projeto é muito utilizada, porém não leva em consideração aspectos relacionados com a Mecânica da Fratura. Nesse tipo de abordagem não se considera aspectos tais como: tenacidade à fratura do material, corrosão sob tensão, fadiga, fluência, descontinuidades, defeitos e acabamentos superficiais. O foco do projeto tradicional se limita basicamente num dimensionamento onde os limites de escoamento ou limite de resistência do material devem superar os valores das tensões aplicadas em conformidade com limites de segurança normalmente especificados por normas, dependendo do grau de risco do equipamento. Na Figura 3.5 apresenta-se o modelo de dependência da abordagem do projeto tradicional (ANDERSON, 2017).

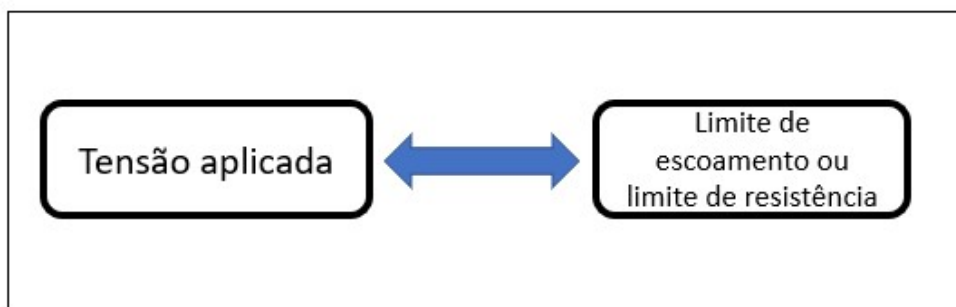


Figura 3.5 – Abordagem tradicional de projeto de engenharia (Adaptado de Anderson, 2017).

### 3.6.2 Abordagem pela Mecânica de Fratura

Todo projeto deve ser concebido para atender às expectativas e necessidades do usuário final. Dependendo disso, o projeto poderá ter maior ou menor custo. Para Ashby (2012), a interação entre função, material, forma e processo é a chave para a Seleção de Materiais. Para projetos de grande complexidade, com consequências financeiras e humanas graves em caso de falhas, é fundamental empregar ensaios e métodos normalizados para a determinação das propriedades mecânicas e comportamento de materiais sob condições específicas de esforço.

Projeto com abordagem da Mecânica de Fratura, além do dimensionamento tradicional, considera ainda aspectos como “defeitos”, descontinuidades, concentradores de tensão ou seus potencializadores, tais como: raios de concordância (geometria), rugosidade (acabamento superficial), microestrutura e defeitos microestruturais, tipo de ambiente (corrosivo, úmido, etc.), temperatura, tipo de carregamento (nível, cíclico ou não, maior ou menor amplitude), dentre outros. Esses aspectos podem potencializar efeitos de concentração de tensão que poderão promover para fratura catastrófica. No caso do projeto com abordagem pela Mecânica de Fratura, o conhecimento da propriedade tenacidade à fratura do material torna-se imprescindível, haja visto que essa propriedade tenacidade à fratura é o indicador numérico da resistência à propagação de uma trinca do material. Na Figura 3.6 apresenta-se o modelo de dependência da abordagem de projeto pela Mecânica de Fratura (ANDERSON, 2017).

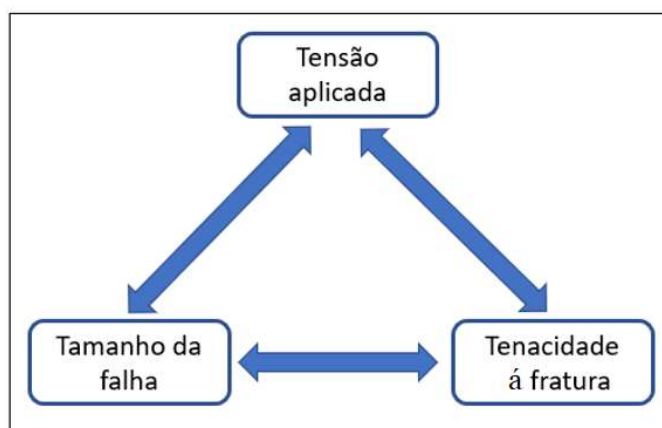


Figura 3.6 – Abordagem de projetos pela mecânica da fratura (Adaptado de Anderson, 2017).

### 3.7 Critérios para Análises de Falha com Fratura

A fratura é o estágio final de falha de um componente. A sua ocorrência pode causar perdas materiais, paradas de operação e riscos aos seres vivos. Por isso, a investigação dos fatores

responsáveis por essa falha deve ser realizada com muito critério. Tamin e Hamzah (2017) destacam a importância da análise de falhas para identificar as causas e implementar medidas preventivas para se evitar ocorrências futuras.

De acordo com Anderson (2017), há dois critérios que podem orientar na análise de falha com fratura: - critério da energia e critério do limite de resistência mecânica.

### 3.7.1 Critério da energia

O critério da energia é baseado na ideia de que a fratura está relacionada à energia transferida para o componente ou máquina devido ao carregamento existente. A nucleação de micro trincas, que é a fase inicial do processo de fratura, está ligada a essa energia transferida para o componente ou máquina. Para ocorrer a fratura, é necessário que a energia transferida pelo carregamento seja maior que a energia de resistência do material. Tamin e Hamzah (2017) citam como exemplo o caso do eixo do rotor de uma bomba que sofre carregamento por flexão rotativa e torção durante uma operação de bombeamento.

De acordo com o critério da energia de Griffith, a fratura ocorre quando sua energia é maior que a energia de resistência do material (energia de superfície, trabalho de deformação plástica e outras), conforme se apresenta na Figura 3.7.

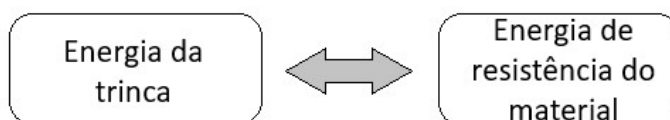


Figura 3.7 – Critério da energia de Griffith.

Em conformidade com o critério de análise de fratura pela energia de Griffith, no equilíbrio, a energia liberada pela fratura ( $G$ ) é igual à energia crítica liberada pela fratura ( $G_c$ ), conforme Equação 1. Nesse caso então, para que uma trinca se propague a energia liberada pela fratura terá que ser maior que a sua energia crítica.

$$G = G_c \quad (\text{Equação 1})$$

A energia de Griffith liberada pela fratura ( $G$ ) e a sua energia crítica ( $G_c$ ) são definidas, respectivamente, pelas Equações 2 e 3.

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (\text{Equação 2})$$

$$G_c = \frac{\pi\sigma_f^2 a_c}{E} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

$\sigma$  – Tensão aplicada;  $a$  – Tamanho da trinca;  $E$  – Módulo de Elasticidade;  $\sigma_f$  - Tensão crítica da fratura (tensão de falha);  $a_c$  – Tamanho crítico da trinca.

Conforme relatado por Anderson (2017) e de acordo com a energia de Griffith, a tensão de falha ( $\sigma_f$ ) é função da raiz quadrada do inverso do tamanho crítico de trinca ( $a_c$ ), como mostrado na Equação 4 e Figura 3.8.

$$G_c = \frac{\pi\sigma_f^2 a_c}{E} \Rightarrow \sigma_f^2 = \underbrace{\left(\frac{G_c E}{\pi}\right)}_{\text{constante "f"}} \cdot 1/a_c \Rightarrow \sigma_f = f \sqrt{1/a_c} \quad (\text{Equação 4})$$

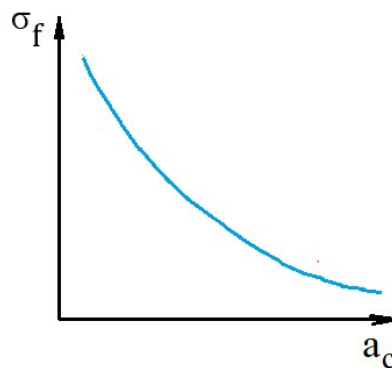


Figura 3.8 – Correlação entre tensão de falha ( $\sigma_f$ ) e tamanho crítico de trinca ( $a_c$ ).

Conforme apresentado na Figura 3.8, a tensão de falha por fratura se torna cada vez menor quanto maior for o tamanho crítico da trinca ( $a_c$ ). Nesse caso, pode-se considerar que o tamanho da trinca é o gatilho para a tensão de falha de um determinado material. Na prática, esse tamanho de trinca pode estar associado a um defeito interno no material, a um canto vivo produzido por processo de fabricação, a uma determinada rugosidade superficial ou até mesmo por uma trinca propriamente dita que tenha sido produzida num tratamento térmico, numa solda, forjamento etc.

### 3.7.2 Critério do limite de resistência

O critério do limite de resistência considera um fator de intensidade de tensão  $K$ , mediante o qual se avalia a medida do carregamento mecânico em uma estrutura com alguma descontinuidade. Esse fator  $K$  depende da tensão aplicada ( $\sigma$ ), do tamanho da descontinuidade ( $a$ ) existente no material, e de um fator geométrico da trinca ( $f$ ) dependente de sua localização, que pode ser na superfície ( $f = 1,12$ ) ou interior da peça ( $f = 1,0$ ), como se apresenta na Figura 3.9. O fator  $K$  de intensidade de tensão pode ser determinado pela Equação 5.

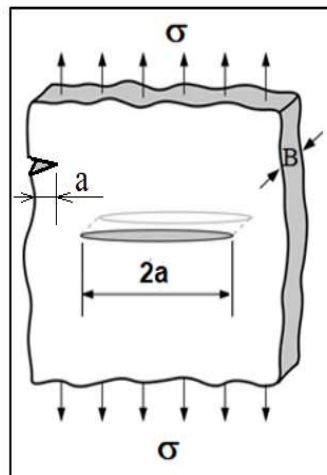


Figura 3.9 – Representação de descontinuidade em um material (Adaptado de Anderson, 2017).

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{Equação 5})$$

Há ainda um fator de intensidade de tensão crítico  $K_{Ic}$  que é a energia crítica de tenacidade do material necessária para a propagação de uma trinca.  $K_{Ic}$  é denominado também como tenacidade à fratura. O  $K_{Ic}$  está relacionado com a maior ou menor susceptibilidade do material ao crescimento de trinca. O valor da tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  é dependente da espessura da peça. Com o aumento da espessura há diminuição do  $K_{Ic}$  até atingir um valor mínimo denominado  $K_{Ic}$  na espessura crítica  $B_c$ , conforme se apresenta na Figura 3.10. O valor de  $K_{Ic}$  é constante para quaisquer espessuras maiores que  $B_c$  (ASKELAND; WRIGHT, 2019). Assim, como  $K_{Ic}$  é independente da espessura, o mesmo pode ser considerado como uma propriedade intrínseca do material.

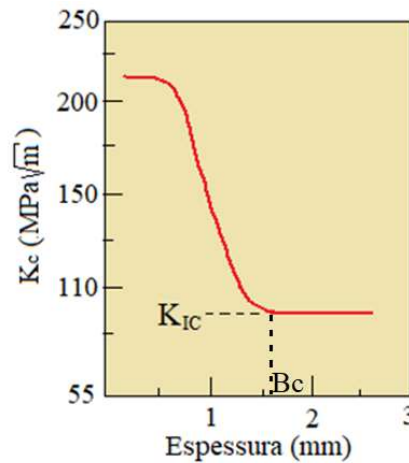


Figura 3.10 – Comportamento de  $K_c$  em função da espessura do aço com  $\sigma_y = 2.273,0\text{MPa}$

Fonte: Adaptado de Askeland e Wright (2019).

A resistência à propagação de trincas para a maioria dos materiais é significativamente menor do que aquelas previstas por cálculos teóricos baseados em energias de ligação atômica. Essa constatação é explicada pela presença de falhas em nível atômico existentes nos materiais que agem como concentradores de tensão. (BARBOSA, 2021; CALLISTER, 2009).

Para Milan *et al.* (2014), quando há carregamento dinâmico, a nucleação e crescimento de trincas dependem da amplitude e nível da tensão cíclica média aplicada ao material. Há outros fatores que influenciam no tempo para a nucleação e crescimento de trincas, podendo destacar: geometria que favoreça concentração de tensão (cantos vivos, raios pequenos), acabamento superficial, meio, razão de carga ( $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ), dentre outros.

De acordo com Anderson (2017), a nucleação e propagação de uma trinca ocorre quando o fator de intensidade de tensão  $K$  supera o fator de intensidade de tensão crítico  $K_c$  ou  $K_{Ic}$  ( $K > K_c$  ou  $K_{Ic}$ ). Os valores de  $K_{Ic}$  podem ser determinados experimentalmente segundo a Norma ASTM E399-23.

Por meio da combinação entre as Equações 2 e 5, respectivamente, relativas aos critérios da Energia crítica de Griffith ( $G_c$ ) e do Limite crítico de resistência ( $K_{Ic}$ ), é possível se obter a correlação entre os dois critérios, conforme se apresenta na Equação 6.

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad \text{e} \quad G_c = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (\text{Equação 6})$$



### 3.8 Crescimento de trinca por fadiga

Os primeiros estudos conhecidos sobre fadiga são de autoria do engenheiro alemão August Wöhler. Tais estudos foram realizados na década de 1840 em eixos de locomotivas da indústria ferroviária alemã. Esses estudos foram motivados pelas constantes quebras desses eixos naquela época (BRANCO, 1985).

De acordo com a Norma ASTM E1823-13 (*American Society for Testing and Materials*), o fenômeno da fadiga é dado por alteração permanente, progressiva e localizada que ocorre em um material submetido a condições que produzem tensões e deformações flutuantes em um ou mais pontos, que podem resultar em trincas ou fratura total. Na Figura 3.11 apresentam-se 3 exemplos de variação de tensão (cíclica) em função do tempo.

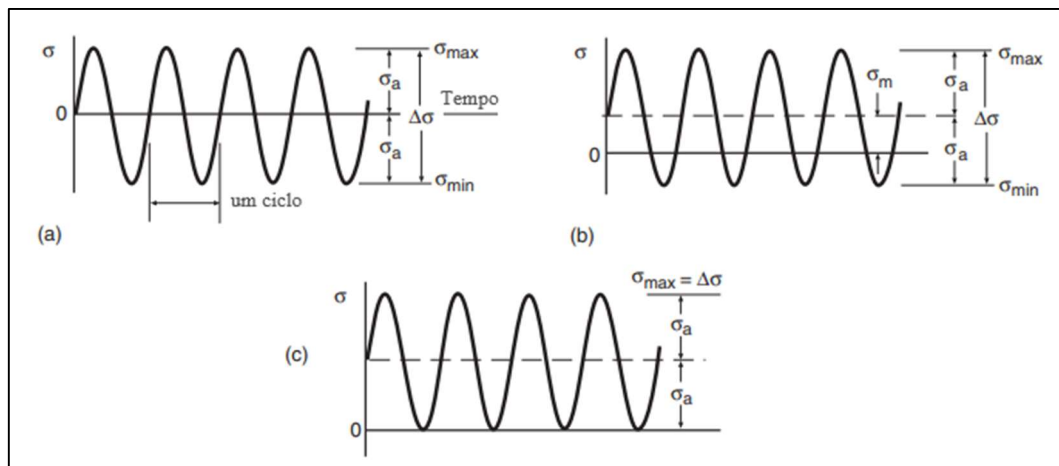


Figura 3.11 – Aplicação de tensão em carregamentos cíclicos com amplitude constante: a) ciclo completamente invertido com tensão média = 0; b) ciclo de tensão com média diferente de zero; c) ciclo de tensão de zero a tração (adaptado de DOWLING, 2012).

No gráfico da Figura 3.11a, apresenta-se a tensão alterando simetricamente do valor máximo positivo (+ de tração) ao mínimo negativo (- de compressão). Nesse caso tem-se o ciclo completamente reverso. Quando se analisa o gráfico da Figura 3.11b nota-se a tensão variando assimetricamente em relação à tensão zero. Nesse caso, os valores de tensões máximas e mínimas, respectivamente de tração e compressão, são diferentes, havendo maior intensidade de tração comparada com a compressão. Por último, no gráfico da Figura 3.11c, apresenta-se um ciclo de tensão no qual o material sofre variação de tensão no intervalo de tensão zero a uma tensão máxima de tração, sendo o pior cenário, pois promove a abertura da trinca.

O fenômeno da fadiga é o processo de degradação das propriedades mecânicas de um elemento

de máquina que se dá pela nucleação e pelo crescimento lento (propagação estável de trincas) de uma ou mais trincas devido a tensões geradas por carregamentos dinâmicos. Esse crescimento de trinca poderá levar à fratura do material. Este fenômeno, principalmente de superfície, pode ocorrer internamente na interface ou ruptura das partículas de segunda fase e matriz do material, normalmente se inicia em pontos de concentração de tensão. O entendimento desse fenômeno e suas consequências, quase sempre catastróficas, continuam a ser uma grande preocupação em projetos de engenharia (DOWLING, 2012). Lembrando que inicialmente a propagação de trincas é estável, mas quando a trinca atinge o tamanho crítico, atinge-se também, a tenacidade à fratura do material, que promove a propagação instável e, por conseguinte, a fratura catastrófica.

Dado ao fato de que a maioria das falhas por fadiga serem originada na superfície dos materiais, algumas técnicas podem ser aplicadas para melhorar a vida em fadiga, tais como a inserção de tensões residuais de compressão na camada superficial visando retardar à nucleação de trincas, tratamentos térmicos de endurecimento superficial (cementação, nitretação, têmpera superficial, refino dos grãos, dentre outros) (ZHANG *et al.*, 2010).

Com o crescimento de trinca por fadiga, a seção transversal resistente tende a diminuir, resultando no aumento da tensão atuante na seção do material. Por fim, o ponto da seção resistente restante não é capaz de suportar a carga aplicada, vindo o material a fraturar bruscamente. Para que aconteça a falha por fadiga é imprescindível que uma trinca seja nucleada em um ponto do material e que se propague, podendo conduzir a uma ruptura final (ANDERSON, 2017).

Falha por fadiga em estruturas normalmente conduzem para baixas consideráveis e perdas econômicas. Conforme mencionado, a fadiga só ocorre em estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos (LACERDA *et al.*, 2017).

#### **4.8.1 Estágios de propagação de trincas por fadiga**

De acordo com Zerbst *et al.* (2018), quando um material metálico é submetido a carregamento dinâmico, após um determinado tempo, há a formação de um grande número de trincas em sua microestrutura, que podem se manifestar sob a forma de bandas de deslizamento que ocorrem na superfície do material nos grãos, contornos de grãos e inclusões.

Bandas de deslizamento são oriundas de tensões de cisalhamento que acontecem preferencialmente em determinados grãos da superfície, formadas devido ao deslizamento plástico. O processo de formação das bandas de deslizamento persistentes (*PSBs – Persistent Slip Bands*) se inicia com um deslizamento que provoca a projeção de material na superfície (extrusão). A deformação plástica no material extrudado e a reversão do carregamento na sequência produz deslizamento no sentido contrário puxando o material para a subsuperfície (intrusão) nas adjacências da superfície que apresentou extrusão. Com esse processo citado, os sucessivos deslizamentos de planos dão origem ao emparelhamento de intrusões e extrusões na superfície do material formando as denominadas bandas de deslizamentos persistentes ou *PSBs*, conforme se apresenta na Figura 3.12 (LACERDA, 2015; WANG et al., 2013).

Conforme relatado, as *PSBs* ocorrem na superfície de materiais sob fadiga e são responsáveis por cerca de 90% do processo de nucleação de trincas de fadiga em materiais metálicos. A formação de *PSBs* produz alteração na rugosidade superficial do material em função do número de ciclos de carregamento dinâmico aplicado ao mesmo. Assim, o processo de nucleação e propagação de trinca por fadiga está relacionado com a evolução da rugosidade superficial dos materiais sob fadiga. As *PSBs* são fontes potenciais de concentração de tensão, principalmente nas intrusões formadas (LACERDA *et al.*, 2017).

As bandas de deslizamento persistente recebem essa denominação devido à sua característica particular de se manter mesmo que seja realizado lixamento ou polimento da superfície. Ou seja, as bandas de deslizamento se mantêm caso o material continue tendo carregamento cíclico. (MILELLA, 2013).

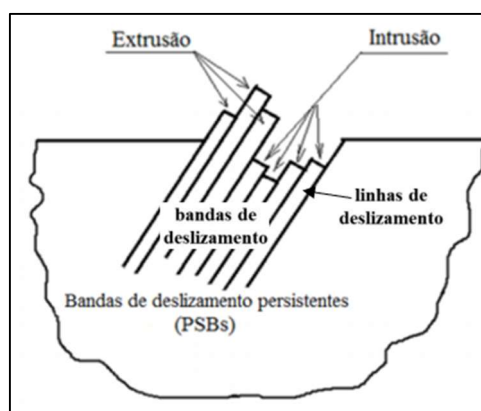


Figura 3.12 – Representação esquemática de bandas de deslizamento persistente em um material submetido à fadiga (Adaptação de MILELLA, 2013).

De acordo com estudos teóricos e experimentais avançados em fadiga, fratura por fadiga de um material é o resultado de um processo de acúmulo de danos na sua microestrutura. A fratura por fadiga pode ocorrer mesmo em tensões bem abaixo do limite de escoamento do material e a sua ocorrência segue quatro etapas bem distintas: - existência ou surgimento de região de concentração de tensão, nucleação de trincas (estágio I), propagação de trincas (estágio II) e fratura final (estágio III) (DOWLING, 2012) (MILELLA, 2013) (ZERBST *et al.*, 2018).

O estágio I é a iniciação do processo, também denominado de nucleação. Nessa fase é que uma dentre várias outras trincas se desenvolve, devido ao acúmulo de deformações plásticas localizadas. A trinca pode se desenvolver também a partir de descontinuidades pré-existentes que agem como pontos concentradores de tensão. No estágio II há a propagação de trinca por fadiga, produzindo redução de área resistente do material o que, em consequência, o torna cada vez mais sobrecarregado. No estágio III, que é a fase de fratura final do material, a mesma ocorre em consequência do aumento da tensão atuante devido à redução de área resistente (atinge-se a tenacidade à fratura do material, com ruptura instantânea).

Na Figura 3.13 são apresentados os comportamentos gráficos da taxa de crescimento de trinca ( $da/dN$ ) em função do  $\Delta K$  (variação do fator de intensidade de tensão) das regiões dos estágios I, II e III. A região do estágio I é fortemente influenciada pela microestrutura e propriedades mecânicas do material, além da tensão média aplicada e do meio. A região do estágio II tem moderada influência da microestrutura, propriedades mecânicas, tensão média aplicada, meio e dimensões da peça. A região do estágio III é fortemente influenciada pela microestrutura, propriedades mecânicas e dimensões da peça. O meio também pode ter moderada influência neste estágio (MILLELLA, 2013).

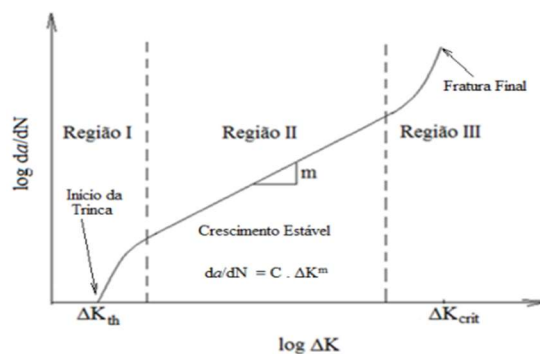


Figura 3.13 – Curva sigmoidal típica de crescimento de trinca por fadiga em metais (Adaptado LACERDA *et al.*, 2015).

#### 4.8.2 Curvas “R”

As curvas de resistência “R” são representações gráficas destinadas a mostrar o comportamento de maior ou menor estabilidade de uma determinada trinca quando submetida a um determinado carregamento. Há dois tipos de curvas de resistência “R” dependendo da natureza do material. Os materiais com comportamento frágeis apresentam curvas de resistência “R” do tipo plana enquanto os materiais dúcteis apresentam curvas R do tipo ascendente, conforme se apresenta, respectivamente, nas Figuras 3.14 e 3.15. (ANDERSON, 2017).

As curvas R são apresentadas graficamente em função de G (energia de Griffith da trinca) e o tamanho da trinca (a). A energia G de Griffith da trinca é definida pela Equação 7. A energia crítica de Griffith,  $G_c$ , é correspondente à energia R de resistência do material, conforme se apresenta na Equação 8 ( $\sigma_f$  é a tensão de falha e  $a_c$  é o tamanho crítico da trinca).

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \quad (\text{Equação 7})$$

$$R = G_c = \frac{\pi \cdot \sigma_f^2 \cdot a_c}{E} \quad (\text{Equação 8})$$

Na Figura 4.13, é apresentada uma curva de resistência “R” plana, onde a resistência do material é constante com crescimento de trinca. Este tipo de curva é característica de um material com comportamento idealmente frágil, sendo sua natureza plana porque a energia da superfície é uma propriedade física do material. Nas tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  apresentadas na curva de resistência “R”, os pontos  $G_1$ ,  $G_3$  e  $G_4$  representam energias de trincas estáveis, enquanto que o ponto  $G_2$  representa a energia de uma trinca totalmente instável por apresentar valor superior à sua energia crítica  $G_c = R$ .

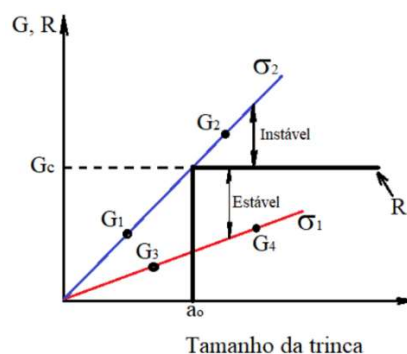


Figura 3.14 – Curva R de resistência plana para materiais com comportamento frágil.

De acordo com Anderson (2017), a fratura dúctil em metais geralmente resulta em uma curva R ascendente ou crescente. Na Figura 4.14 apresenta-se uma curva R crescente. Nesse tipo de curva há uma faixa de instabilidade da trinca dependendo da tensão e do tamanho da trinca, exceto para um valor de tensão que seja tangente à curva R, conforme representado pela tensão  $\sigma_4$  da Figura 4.14. Nesse caso há um ponto de instabilidade da trinca correspondente a um tamanho crítico de trinca ( $a_c$ ).

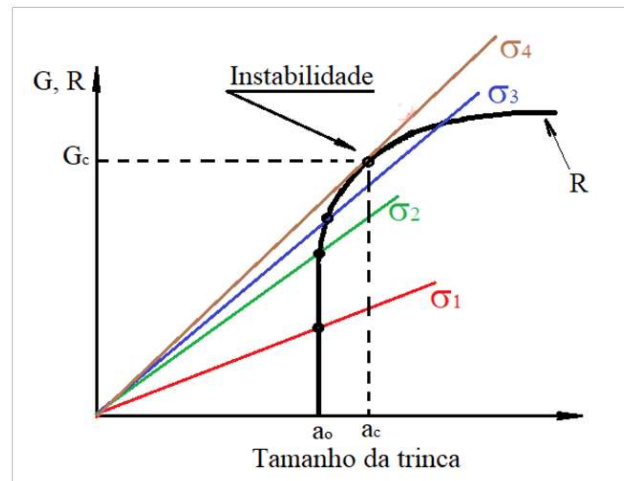


Figura 3.15 – Curva R de resistência ascendente para materiais com comportamento dúctil.

### 3.9 Tipos de Fraturas

A fratura de um componente estrutural é o estágio final do processo de falha. A fratura consiste na separação ou fragmentação de um corpo em uma ou mais partes sob ação de tensão. Trata-se de um evento indesejável, que sua ocorrência pode colocar em risco a integridade das pessoas e também incorrer em prejuízos financeiros às instituições.

A história está repleta de casos, onde os projetos de engenharia mal concebidos, imperícia e/ou imprudência nas operações levaram a acidentes catastróficos causando mortes e danos diversos. Entender os mecanismos e características da fratura em metais é de extrema importância para garantir a segurança e a confiabilidade de componentes, contribuindo para o desenvolvimento de projetos mais seguros e duráveis (GODEFROID *et al.*, 2019).

Na maioria das falhas estruturais, a fratura final comumente é abrupta logo em seguida de algum tipo de falha de material ou pelo processo de crescimento de trinca que faz com que alcance um tamanho crítico para ruptura final (ASM, 1996).

De acordo com Barbosa (2021), a fratura é um fenômeno estrutural onde ocorre a quebra de ligações interatômicas mediante à aplicação de determinado carregamento. Nesse caso, a separação definitiva dos átomos dará origem a uma nova superfície livre (superfície da fratura).

Há dois tipos principais de fraturas que podem ocorrer nos metais por carregamento monotônico (uma única direção): - fratura frágil e fratura dúctil. Essas fraturas podem ser motivadas por diferentes formas e condições de sollicitação no material. Dentre essas formas e condições de ocorrência de fraturas podem ser citadas: fratura por fadiga, fratura por corrosão sob tensão, fratura por fluência, fratura por impacto, fratura por sobrecarga. Cada uma dessas fraturas apresenta características distintas e requerem abordagens específicas para prevenção e mitigação.

Em estudos para analisar falhas por fraturas e obter informações detalhadas em relação a mecanismos das fraturas, normalmente utilizam-se microscopia eletrônica de varredura, uma vez que essa técnica possui resolução e profundidade para revelar aspectos topográficos de superfície da fratura (CALLISTER, 2009), contudo a inspeção visual e a microscopia óptica são muito importantes neste processo.

Em projetos relacionados com materiais frágeis e ou que estejam associados com carregamento dinâmico, a abordagem da Mecânica da Fratura é usada para auxiliar na seleção de materiais e no projeto de componentes para minimizar a possibilidade de fratura. (DOWLING, 2012).

### **3.9.1 Fratura frágil**

Fratura frágil apresenta pouca ou quase nenhuma deformação plástica. Nos metais e suas ligas a fratura tem seu início em algum ponto de concentração de tensão de onde a trinca se nucleia e a partir daí tem sua propagação. No caso dos metais, a tendência para a fratura frágil é aumentada com a diminuição da temperatura e com a condição triaxial de tensões (geralmente obtida por um entalhe) (ANDERSON, 2017) (DIETER, 1981). Quando há a combinação de concentradores de tensão, baixa temperatura e alta taxa de deformação mesmo os metais dúcteis podem vir a falhar de modo frágil.

A fratura frágil normalmente ocorre em ligas que possuem uma microestrutura com baixa capacidade de deformação plástica, ou seja, uma estrutura cristalina que não permite

deslizamento significativo de discordâncias. Aços endurecidos por precipitações e ou tratamentos térmicos podem apresentar este comportamento frágil.

Fratura frágil pode ocorrer de duas formas: - transgranular (através dos grãos) ou intergranular (ao longo dos contornos dos grãos). Na Figura 3.16 apresentam-se modelos que sugerem fratura transgranular e intergranular. Cada um desses modos de propagação de trinca apresenta morfologias típicas em análises macro e microfractográficas. Nesse caso, há presença de planos de clivagem em fratura transgranular e de revelação dos contornos de grãos na fratura intergranular (ASM, 1996).

Na fratura frágil por clivagem (transgranular) existem três fatores que contribuem para este modo de falha: estado triaxial de tensões, temperatura baixa e taxa de deformação elevada ou alta taxa de carregamento. Para que aconteça a fratura frágil, não há necessidade de que estes três fatores se manifestem simultaneamente. Outro fato relevante é que a fratura por clivagem tem comportamento instável quanto a taxa de crescimento da trinca.

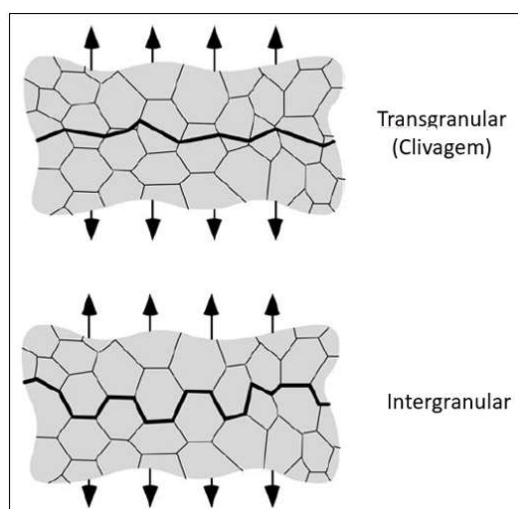


Figura 3.16 – Representação esquemática de fratura de um material com comportamento frágil.

### 3.9.2 Fratura dúctil

A fratura dúctil acontece normalmente em materiais que apresentam grande deformação plástica. Quando são realizados ensaios de tração em corpos de provas de materiais dúcteis, ocorre deformação plástica longitudinal acompanhada de estrição. A fratura dúctil pode apresentar macroscopicamente a morfologia típica denominada taça-cone. Nesse tipo de fratura há três regiões distintas: fibrosa, facetada/radial e cisalhamento (MILAN, 2014).



De acordo com Barbosa (2021), a fratura dúctil ocorre em tensão abaixo do limite de resistência do material. A fratura ocorre quando a seção resistente do material reduz plasticamente e atinge seu valor mínimo. O processo de desenvolvimento da fratura dúctil se inicia com a nucleação de microvazios (cavidades) nos contornos de grãos ou nas interfaces do tipo inclusão / metal, conforme ilustrado na Figura 3.17. O aumento da tensão aplicada no material induz a formação de microvazios com o conseqüente coalescimento dos mesmos que leva à ruptura final.

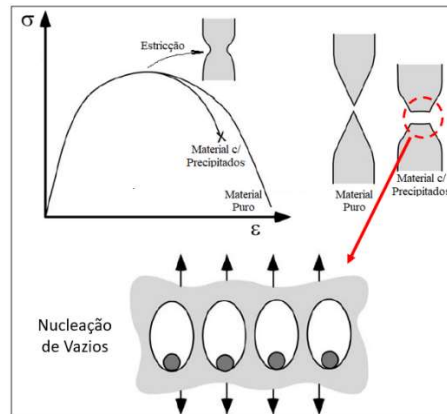


Figura 3.17 – Representação esquemática de fratura dúctil.

Na Figura 3.18 apresenta-se o mecanismo de desenvolvimento de fratura dúctil. Nesse tipo de fratura, predomina a formação de microvazios com a conseqüente coalescência dos mesmos. Os microvazios nucleam em regiões de alguma descontinuidade ou presença de algum precipitado pequeno como aqueles associada a partículas de segunda fase, inclusões, contornos de grão e acúmulos (empilhamento) de discordâncias que gerará concentração de tensão. (ASM, 1996).

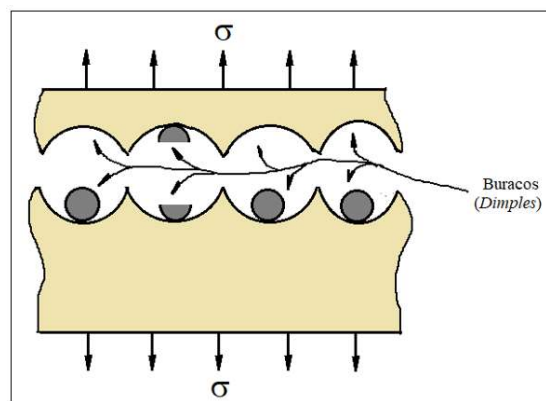


Figura 3.18 – Representação esquemática do processo da fratura dúctil.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Os materiais aplicados na fabricação dos eixos das bombas desse estudo foram os aços ABNT 1045 e ABNT 4140. Na Tabela 4.1 são apresentadas as respectivas composições químicas típicas dos aços.

Tabela 4.1 – Composição química nominal de aços ABNT 1045 e ABNT 4140 (% em massa).

	C	Si	Mn	P <sub>máx</sub>	S <sub>máx</sub>	Cr	Ni <sub>máx</sub>	Mo	Fe
ABNT 1045	0,43 – 0,50	0,15 – 0,35	0,60 – 0,90	0,04	0,05	*	*	*	Balanço
ABNT 4140	0,38 – 0,43	0,15 – 0,35	0,75 – 1,00	0,035	0,04	0,80 – 1,10	0,25	0,15 – 0,25	Balanço

\* Não especificado.

Na Figura 4.1 (a, b) apresentam-se imagens dos eixos fraturados de onde foram extraídas amostras para os ensaios especificados para o estudo. Na Figura 4.2 apresenta-se o desenho dos referidos eixos apresentados na Figura 4.1 (a, b).

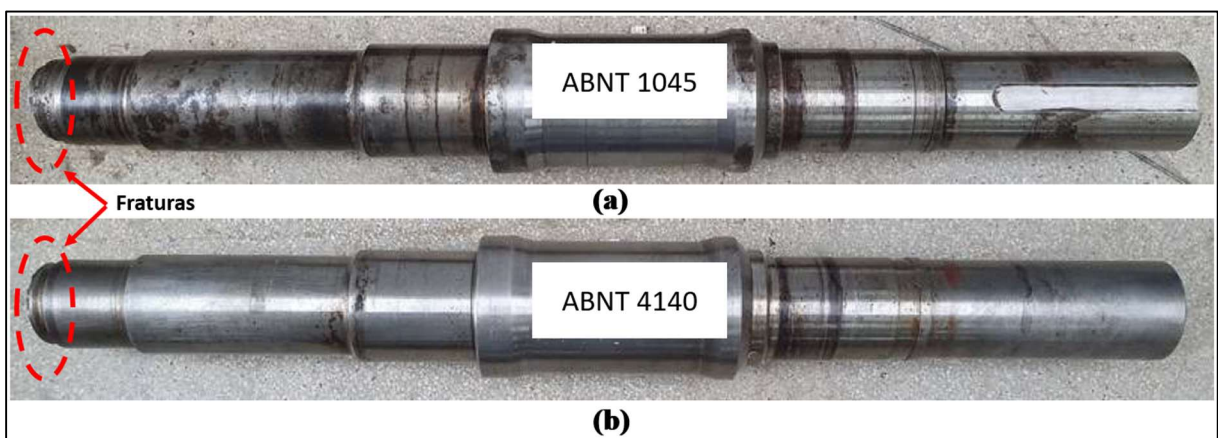


Figura 4.1 – Eixos fraturados; a) aço ABNT 1045; b) aço ABNT 4140. As setas destacam-se as regiões de fratura. As setas destacam-se as regiões de fraturas.

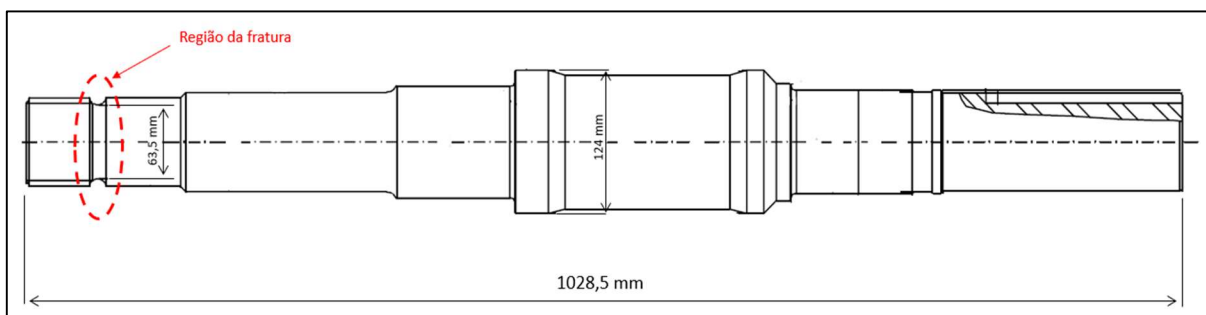


Figura 4.2 – Desenho dos eixos fraturados.

## 4.2 Procedimentos Experimentais

A seguir serão abordados os procedimentos experimentais detalhadamente.

### 4.2.1 Composição química

A composição química dos aços foi determinada por espectrometria de emissão óptica por centelhamento utilizando um Espectrômetro de Emissão Óptica, marca Anacom Científica, modelo B2ADV.

### 4.2.3 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados em corpos de provas extraídos dos eixos fraturados. Foram realizados ensaios Rockwell “B” ( $HR_B$ ) no aço ABNT 1045 e Rockwell “C” ( $HR_C$ ) no aço ABNT 4140, em ambos os casos foi utilizada a Norma ASTM E18-20 na temperatura de 23°C. Os ensaios foram realizados utilizando-se durômetro marca Wilson, modelo 4 JR.

### 4.2.3 Ensaio de tração

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram usinados de acordo Norma ASTM E8-21, conforme se apresenta na Figura 4.3. Foram realizados 3 ensaios para confiabilidade estatística. Os ensaios foram realizados com taxa de deslocamento de 5 mm/min utilizando-se uma máquina de tração universal marca Instron, modelo 2382 com capacidade de 100 kN.

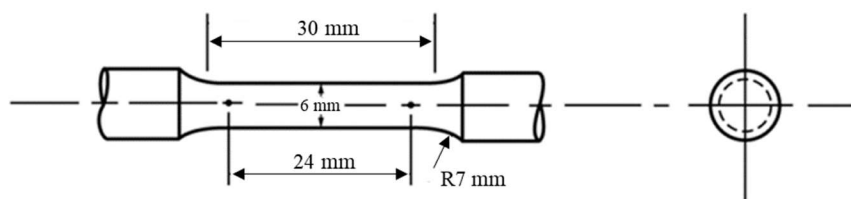


Figura 4.3 – Representação esquemática do corpo de prova para ensaio de tração (Norma ASTM E8-16).

### 4.2.4 Ensaio de impacto Charpy

Os corpos de provas para os ensaios de impacto Charpy foram usinados nas dimensões 10 x 10 x 55 mm, atendendo as dimensões segundo a Norma ASTM E23-18 tipo A, conforme se apresenta na Figura 4.4. Os ensaios foram realizados na temperatura ambiente (23°C). Para os

ensaios foi utilizada uma máquina marca *Time*, modelo JB300 e martelo de 300J tipo A.

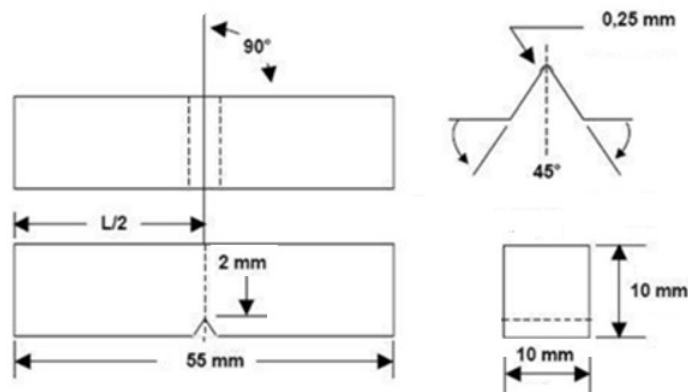


Figura 4.4 - Representação esquemática do corpo de prova para ensaio de impacto Charpy.  
(Norma ASTM E23-18).

#### 4.2.5 Ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga por flexão rotativa ( $R=-1$ ) foram realizados na temperatura ambiente com *run-out* em  $3 \times 10^6$  ciclos. Na discussão dos resultados justifica-se a opção por esse valor de *run-out*. Na Figura 4.5 apresenta-se o desenho do corpo de prova para os ensaios de fadiga com suas dimensões de acordo com a Norma ASTM E466 -15. A fim de se evitar dispersão nos resultados dos ensaios de fadiga, após as usinagens dos corpos de prova, os mesmos foram lixados na região do raio de concordância até a lixa de granulação n° 600 *mesh* visando diminuir rugosidade excessiva nesta região e ao mesmo tempo padroniza-la em todos os corpos de prova. Para a realização dos ensaios de fadiga foi utilizada uma máquina marca Equitecs, modelo FR1.

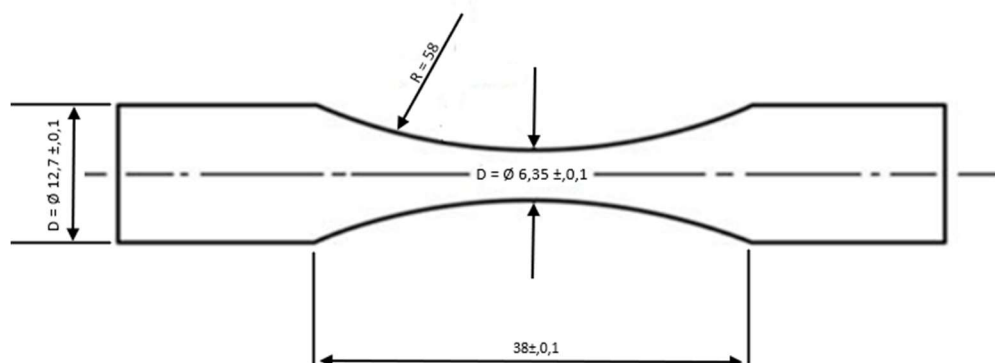


Figura 4.5 - Representação esquemática do corpo de prova para ensaio de fadiga (Norma ASTM E466-15).

#### **4.2.6 Caracterização de fraturas**

Imagens das fraturas dos corpos de prova de tração, impacto e fadiga foram obtidas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo VEGA3, marca TESCAN, equipado com detector de elétrons marca Brunker, modelo 410, detecção de elétrons secundários SE, tensão de aceleração de 20,0 kV.

Antes da caracterização no MEV as amostras passaram por um processo de limpeza por ultrassom para remoção de eventuais impurezas.

#### **4.2.7 Análise de Tensão por ANSYS**

Com o uso do *software* ANSYS 2023 R1 foi realizado a simulação em MEF (Método de Elementos Finitos) no componente “eixo” de acordo com dados da geometria, material (ABNT 4140) e condições de cálculos estáticos de cisalhamento, aplicando o torque de 3885 N.m. Para a geometria modelado em 3D no *software* *SpiceClaim* seguindo com o modelo desenvolvido a partir do desenho mostrado na Figura 4.2.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de análises de caracterização química, de propriedades mecânicas de tração, impacto e dureza, assim como ensaios de fadiga, dentre outros dos aços ABNT 1045 e 4140. Além das análises citadas, também foi realizado as análises fractográficas e simulação computacional do eixo de aço ABNT 4140.

### 5.1 Composição química

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados da composição química dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140 utilizados na fabricação dos eixos fraturados. A composição química obtida está compatível com os valores nominais dos respectivos aços.

Tabela 5.1 – Análise química (% em massa) dos aços ABNT 1045 e 4140.

Aços	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
ABNT 1045	0,50	0,23	0,66	0,019	0,008	NE	NE	NE	NE	Balanço
ABNT 4140	0,40	0,2	0,88	0,015	0,036	0,93	0,15	0,19	0,17	Balanço

NE - Não especificado

### 5.2 Ensaio de tração

Para a caracterização do comportamento em tração, foram realizados ensaios nos corpos de provas aços ABNT 1045 e ABNT 4140 em amostras extraídas dos respectivos eixos fraturados. Na Figura 5.1 são apresentadas as respectivas curvas de engenharia (convencionais) obtidas dos ensaios.

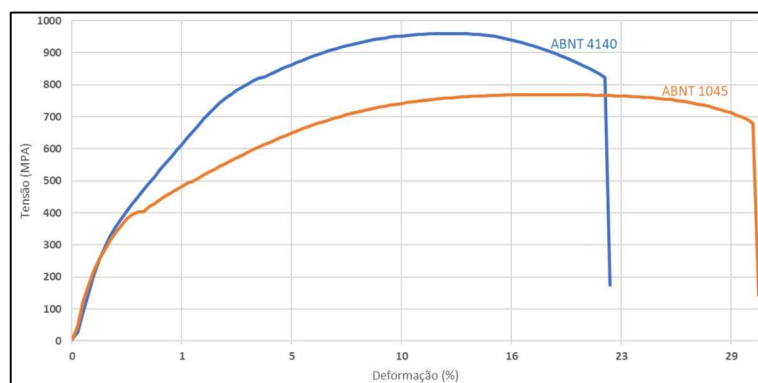


Figura 5.1 – Curvas tensão x deformação de corpos de provas dos eixos ABNT 1045 e 4140.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as principais propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de tração.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas de tração dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140.

Aços	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	A (%)	RA (%)
ABNT 1045	402,3 ± 7	769,4 ± 13	24,1 ± 2	37,7 ± 3
ABNT 4140	728,4 ± 12	960 ± 19	16,1 ± 2	36,8 ± 3

$\sigma_y$  - Limite de escoamento;  $\sigma_{uts}$  - Limite de resistência; A - Alongamento; RA - Redução de área

O aço do tipo ABNT 1045 possui menor limite de escoamento, menor limite de resistência e maior ductilidade comparado com o aço do eixo ABNT 4140, conforme apresentado na Figura 5.1 e Tabela 5.2. Essa diferença de propriedades de tração dos dois aços é devido à diferentes elementos de composição química e principalmente das microestruturas do aço ABNT 4140. De acordo com a literatura, propriedades de tração dos referidos aços podem ser modificadas com tratamentos térmicos (MESHREF *et al.*, 2021). No caso do aço ABNT 1045, observou que tratamentos de recozimento, normalização e têmpera têm grande efeito em suas propriedades mecânicas de tração. Os efeitos de tratamentos térmicos no aumento das propriedades de tração dos aços seguem a seguinte ordem decrescente: - têmpera > revenimento > normalização > recozimento (SINGH *et al.*, 2021) (SENTHILKUMAR & AJIBOYE, 2012).

Conforme se apresenta na Figura 5.2(a, b), referente à borda e centro da fratura de tração ocorrida no aço ABNT 1045, houve a presença de *dimples* e clivagem indicando característica mista de fratura dúctil e frágil, muito embora tenha havido predominância de fratura frágil na borda da fratura comparado com o seu centro.

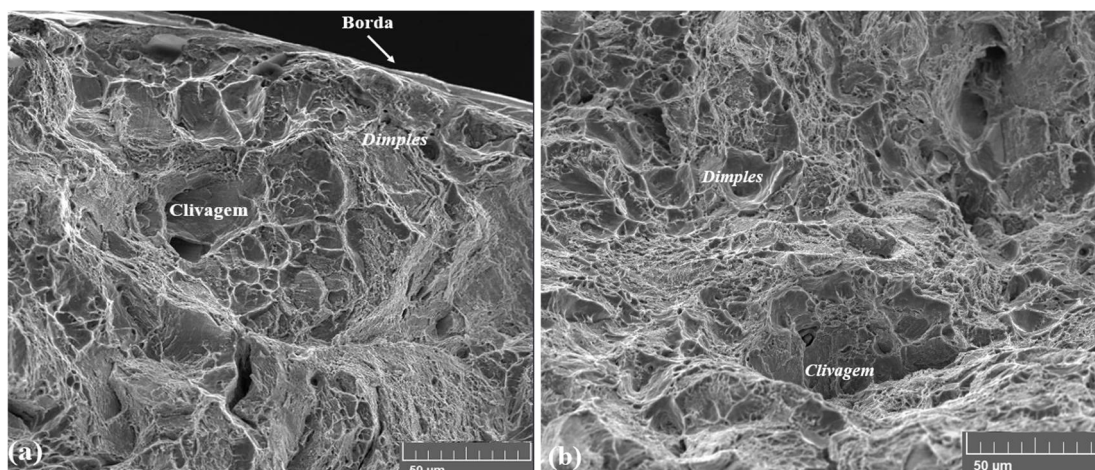


Figura 5.2 – Fratura de corpos de prova por tração em aço ABNT 1045: (a) borda; (b) centro. (MEV).



O aço do tipo ABNT 4140 para eixos são geralmente são temperados e revenidos. Esses tratamentos térmicos aumentam a resistência mecânica conservando a sua tenacidade (BADARUDDIN, *et al.*, 2019) (MEYSAMI, *et al.* 2010).

Conforme se apresenta na Figura 5.3(a, b), referente à borda e centro da fratura dos corpos de prova de tração ocorrida no aço ABNT 4140, houve a presença de *dimples* e clivagem indicando característica mista de fratura dúctil e frágil, muito embora também tenha havido predominância de fratura frágil na borda da fratura comparado com o seu centro. Observa-se ainda, nesse caso, a existência de trincas secundárias. Trincas secundárias normalmente ocorrem por segregação à existência de inclusões alinhadas, segregação química, ou precipitação preferencial de fases no processamento termomecânico de aços.

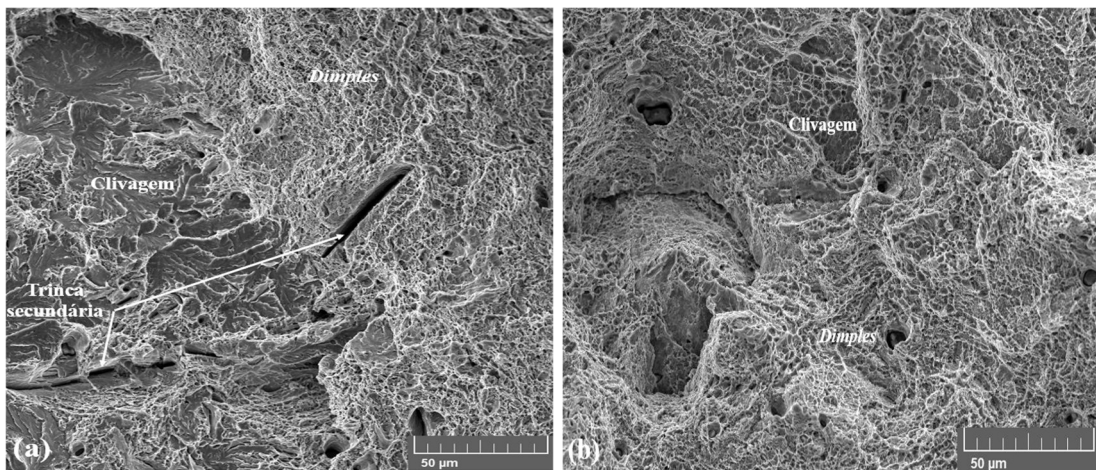


Figura 5.3 – Fratura de corpos de prova por tração em aço ABNT 4140: (a) borda; (b) centro (MEV).

### 5.3 Ensaio de dureza

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados de dureza dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140 utilizados na fabricação dos eixos fraturados.

Tabela 5.3 – Durezas das amostras dos eixos ABNT 1045 e ABNT 4140.

Amostra	Tipo	Medidas					Média	Média (HBW)*
ABNT 1045	HR <sub>B</sub>	94	94	94	94	95	94,2 ± 0,45	206
ABNT 4140	HR <sub>C</sub>	30	30	29	28	28	29 ± 1	279

\* Valores convertidos conforme ASTM A370-20 para fins de comparação.



Conforme apresentado na Tabela 5.3, o eixo fabricado em aço ABNT 1045 apresentou menor dureza média que o eixo fabricado com ABNT 4140. A dureza é uma importante grandeza mecânica dos metais quando se tem aplicações envolvendo abrasão e desgaste. Além disso a dureza está diretamente relacionada com a resistência à tração e fadiga. Valores de dureza podem ser aumentadas (ou reduzidas) com tratamentos térmicos tais como, têmpera seguido de revenimento para maior tenacidade (MAHMOOD *et al.*, 2022) (GHIBAN & BRAN, 2019).

Akhyar & Sayuti, (2015) estudaram o efeito do tempo de revenimento e da temperatura nas propriedades de um aço ABNT 1045 visando obter maior dureza e resistência mecânica do aço. Chandio *et. al* (2021) observaram que os aços após tratamento térmico (normalização, têmpera e endurecimento) houve significativa alteração na microestrutura (tamanho, formato e distribuição dos grãos), afetando consequentemente, as propriedades mecânicas em geral. De acordo com Pinedo (2021), a dureza máxima da martensita para o teor de carbono de 0,45% (ABNT 1045) é próximo do 56 HR<sub>C</sub>, muito embora esse aço apresente relativamente baixa temperabilidade. No caso do ABNT 4140, o mesmo apresenta maior temperabilidade devido aos diferentes teores de elementos de liga (PINEDO, 2021). Freitas *et al.* (2011) realizaram um estudo no qual relata que a dureza do aço ABNT 4140 diminui com o aumento da temperatura de revenimento.

Importante ressaltar que baixas durezas superficiais favorecem a nucleação de trincas por fadiga, uma vez que este processo é controlado por mecanismos de deformação plástica localizada na superfície do material (bandas de deslizamento persistente – *persistent sliping bands* – *PSBs*). As *PSBs* favorecem a formação de bandas de intrusão e extrusão na superfície do material preferencialmente em planos de cisalhamento a 45°. Maior dureza do material dificulta a formação das *PSBs* retardando o processo de nucleação de trincas por fadiga na superfície do material.

#### 6.4 Ensaio de impacto Charpy

Ambos os aços, ABNT 1045 e ABNT 4140, apresentaram baixa tenacidade ao impacto na temperatura ambiente, conforme se apresenta na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de impacto Charpy.

Aços	Energia (J)			Média
	Valores			
ABNT 1045	16	12	14	14 ± 2
ABNT 4140	10	6	12	9 ± 3

A baixa tenacidade ao impacto pode ser explicada pela granulometria grosseira apresentada nas microestruturas dos aços, conforme pode ser observado na Figura 5.4. A morfologia das fraturas de corpos de prova de impacto pelo ensaio Charpy (Figura 5.4) revelam característica totalmente frágil (presença marcante de facetas de clivagem e marcas de “rios”). O tamanho de grão excessivamente grosseiro da microestrutura de ambos os eixos pode ser consequência de tratamento térmico inadequado. Provavelmente o tempo e a temperatura de austenitização foram excessivamente altos, favorecendo o crescimento de grão (CHAOUCH *et al.*, 2018) (Senthilkumar & Ajiboye (2012) (MAHMOOD *et al.*, 2022).

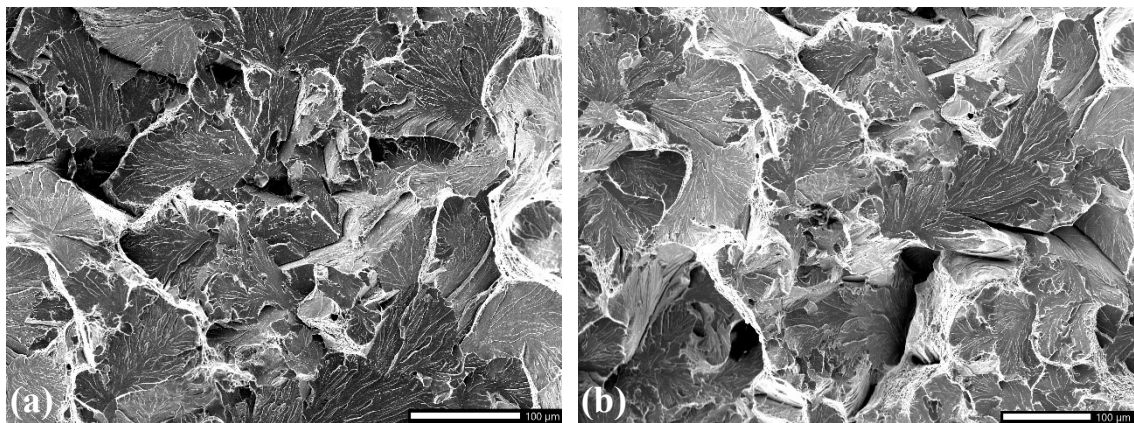


Figura 5.4 – Fraturas de corpos de prova de impacto Charpy em corpo de prova: a) ABNT 1045; b) ABNT 4140 (MEV).

### 5.5 Ensaios de fadiga por flexão rotativa

Na Figura 5.5 é apresentada a curva SN (curva de Whöhler) dos ensaios de fadiga por flexão rotativa realizados em um aço ABNT 1045, cujos corpos de prova foram extraídos do referido eixo fraturado, conforme relatado anteriormente. No Anexo 3 são apresentados os resultados numéricos dos ensaios de fadiga realizados.

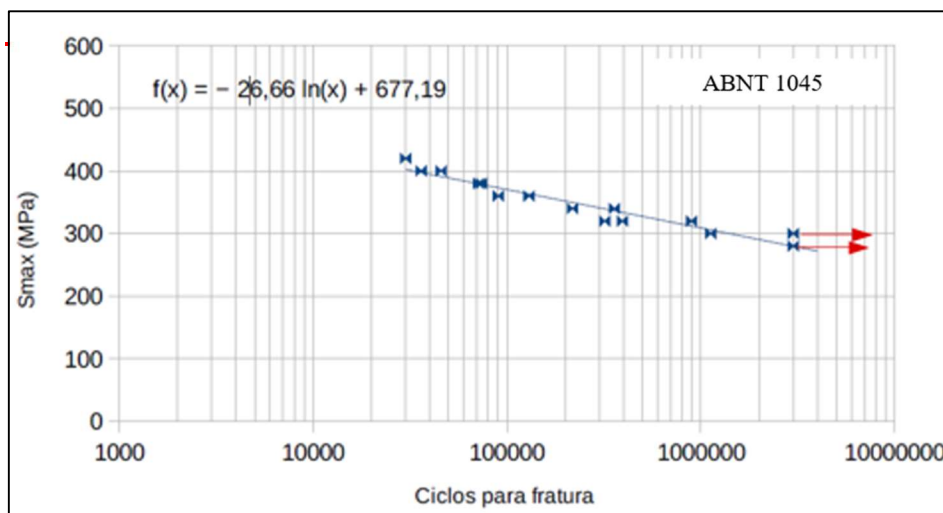


Figura 5.5 – Curva SN de fadiga por flexão rotativa de amostras extraídas de eixo ABNT 1045.

Conforme pode-se observar na Curva SN do aço ABNT 1045 os ensaios foram realizados até  $3 \times 10^6$  ciclos obtendo-se para esse valor um limite de fadiga em torno de 280 a 300MPa. Muito embora se saiba que vida infinita em aços se considera normalmente a partir de  $10^7$  ciclos (MILLELA, 2013), optou-se por considerar fim dos ensaios em  $3 \times 10^6$  ciclos devido à limitação na extração de mais corpos de prova do eixo fraturado e os resultados obtidos estarem compatíveis com a faixa de limite típico de fadiga de aço ABNT 1045 (QUEIROZ *et al.*, 2022).

As fraturas ocorridas por fadiga no aço ABNT 1045 (Figura 5.6) apresentaram predominância de características frágil (presença de clivagem) com múltiplos pontos de propagação de trincas conforme se apresenta em destaque por setas na Figura 5.6(a). A trincas iniciadas na superfície do material se apresentaram separadas entre si por degraus que normalmente são denominados como marcas de catraca (Figura 6.6-a) (MILLELA, 2013). Com o processo de crescimento dessas trincas, as mesmas se propagam e coalescem, tornam-se poucas ou até mesmo uma única trinca que levará a fratura final. A ruptura final acontece quando a seção transversal remanescente do material não suporta mais a carga submetida. Essa etapa de ruptura final pode ter características de fratura dúctil ou frágil, dependendo da microestrutura do material, do nível de tensão aplicado, ductilidade, tenacidade do material e da temperatura (BARBOSA, 2021).

Conforme Figura 5.6, o aço ABNT 1045 apresentou microestrutura grosseira. De acordo com Hanlon *et al.* (2003), estrutura de grãos refinados resultam em melhorias na resposta no comportamento em fadiga na etapa de nucleação de trincas. Refinamento de grão aumenta dureza dificultando a formação de PSBs, o que em consequência retarda a nucleação de trincas

na superfície do material (LACERDA, *et. al.*, 2017).

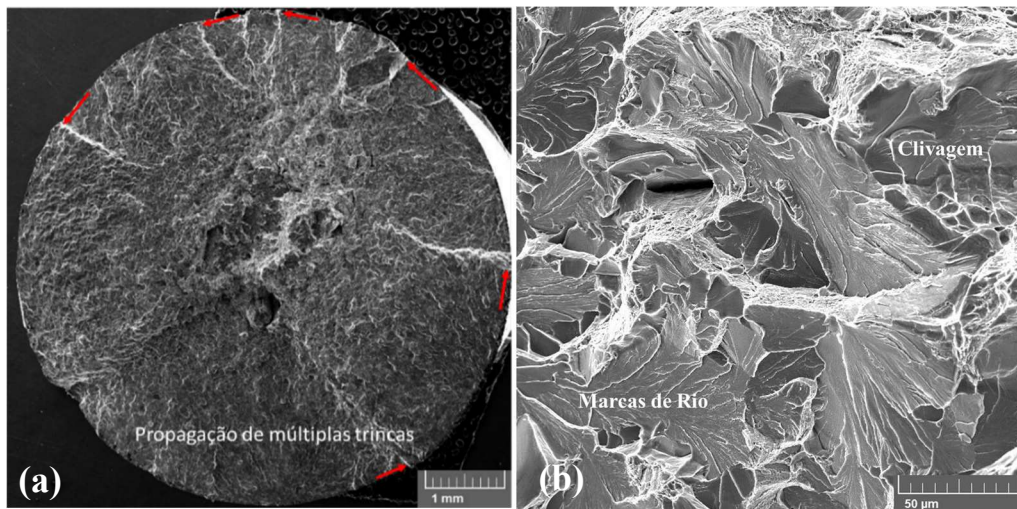


Figura 5.6 – Fratura por fadiga de corpos de prova do aço ABNT 1045 (MEV).

Na Figura 5.7 é apresentada a curva SN (curva de Whöhler) dos ensaios de fadiga por flexão rotativa realizados em um aço ABNT 4140, cujos corpos de prova foram extraídos do referido eixo fraturado, conforme relatado anteriormente. No Anexo 4 são apresentados os resultados numéricos dos ensaios de fadiga realizados.

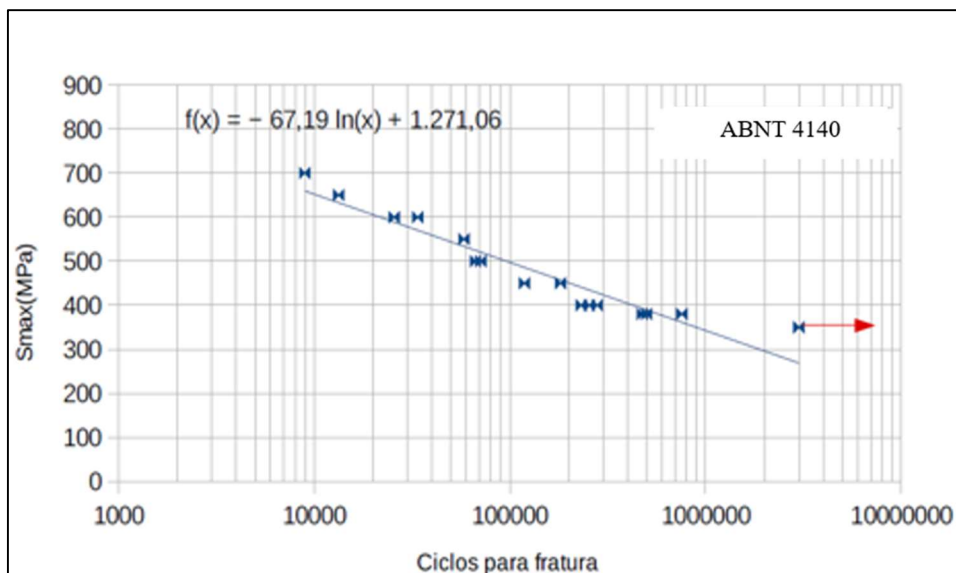


Figura 5.7 – Curva SN de fadiga por flexão rotativa de corpos de prova de amostras extraídas de eixo ABNT 4140.

Conforme pode-se observar na Figura 5.7, Curva SN do aço ABNT 4140 os ensaios foram realizados até  $3 \times 10^6$  ciclos obtendo-se para esse valor um limite de fadiga em torno de 360MPa. Muito embora se saiba que vida infinita em aços se considera normalmente a partir de  $10^7$  ciclos



(MILLELA, 2013), aqui também, optou-se por considerar fim dos ensaios em  $3 \times 10^6$  ciclos devido à limitação na extração de mais corpos de prova do eixo fraturado e os resultados obtido estar compatível com a faixa de limite típico de fadiga de aço ABNT 4140 (HE *et al.*, 2021) (QUEIROZ *et al.*, 2022).

Conforme se apresenta na Figura 5.8, na fratura do aço ABNT 4140 há também predominância e fratura frágil com pequenas regiões dúctil (presença de *dimples*). Na Figura 6.8(b), há presença de trincas secundárias. Trincas secundárias geralmente são formas de descolamento intergranular de grãos motivados pela presença de inclusões nos contornos de grãos que fragilizam o aço. Essas inclusões podem ser sulfeto de manganês que agem como concentradores de tensões nos contornos de grãos no interior do material. Esse tipo de trinca secundária (intergranular) é mais comum de acontecer em microestruturas mais grosseiras (CHAN, 2010).

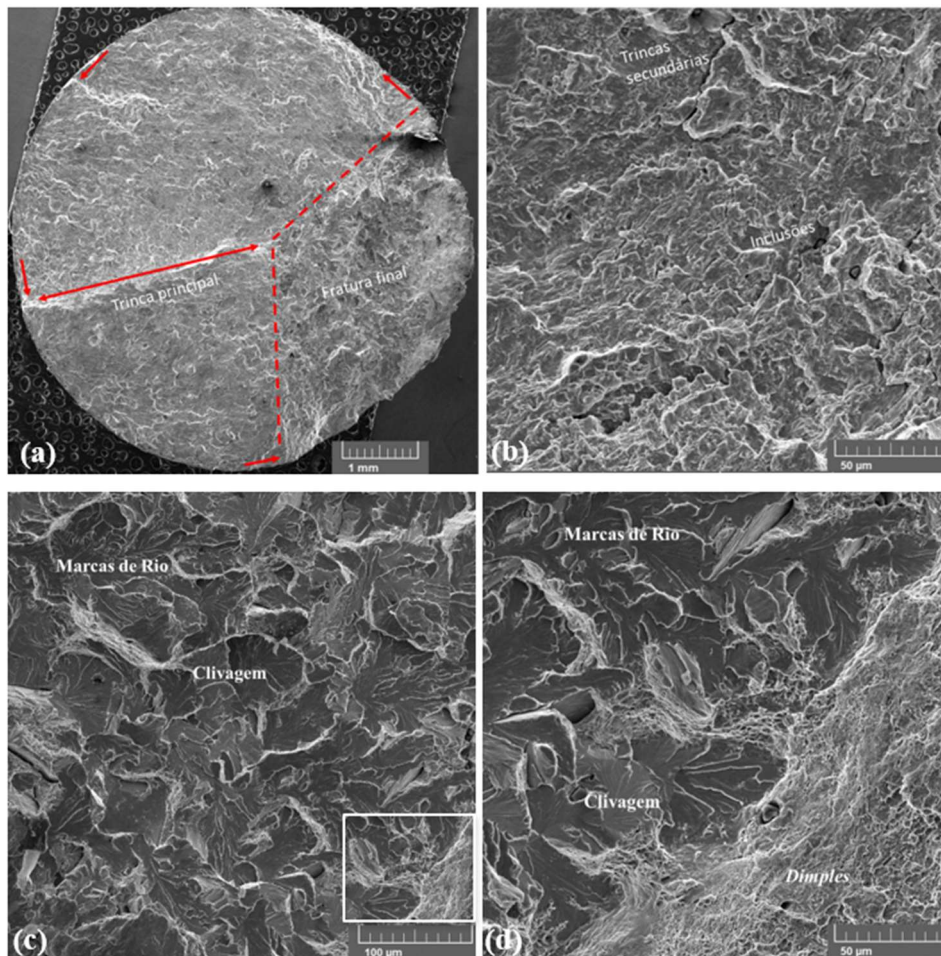


Figura 5.8 – Fratura de corpos de prova do ensaio de fadiga da amostra do aço ABNT 4140 (MEV).

Visando simplificar o estudo, a partir desse ponto, o trabalho estará sendo focado especificamente no aço ABNT 4140, tendo em vista a sua superioridade em termos de propriedades mecânicas comparado com o aço ABNT 1045 e similaridade do local da fratura em ambos eixos de bombas centrífugas estudados.

## 6.6 Microestrutura de um aço ABNT 4140

Conforme pode-se observar na Figura 5.9, o aço ABNT 4140 apresenta microestrutura grosseira e heterogênea constituída por perlita e bainita. Esta microestrutura normalmente é obtida quando o aço é submetido a temperaturas elevadas (austenitização) e em seguida sofre resfriamento em menores taxas. Nesse caso, ao invés de se formar martensita, a austenita se decompõe por difusão em bainita (ferrita supersaturada + cementita (PINEDO, 2021). Normalmente, a bainita pode se apresentar segundo duas classificações: - bainita inferior (250 a 400°C) e bainita superior (400 a 550°C) (BHADESHIA & HONEYCOMBE, 2017).

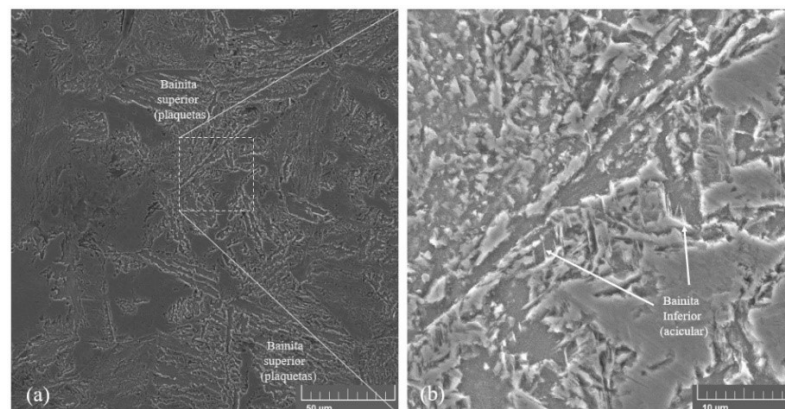


Figura 5.9 – Microestrutura do aço ABNT 4140 (MEV).

## 6.7 Análise da Fratura do Eixo Fabricado em Aço ABNT 4140

No eixo fabricado em aço ABNT 4140 (Figura 5.10), a região de raiz da rosca pode ser observado acabamento de usinagem muito ruim, com a presença de sulcos profundos de usinagem. Esse acabamento ruim favoreceu concentração de tensões que contribuíram para a nucleação e conseqüente crescimento da trinca de fadiga que culminou na fratura final do eixo. A nucleação e propagação de trincas por fadiga estão fortemente relacionadas com a rugosidade superficial dos materiais (LACERDA *et al.*, 2017).

De acordo com análise visual da fratura do eixo apresentada na Figura 5.10(a), pode-se observar

que a fratura foi por fadiga. Há “marcas de catraca” ao redor da periferia da fratura. Múltiplas “marcas de catraca”, conforme podem ser observadas, indicam a existência de vários pontos de concentração de tensão na região da fratura do eixo (CARVALHO *et al.*, 2016). A fratura ocorreu na região final da rosca, no último filete engastado, conforme Figura 5.10(b).

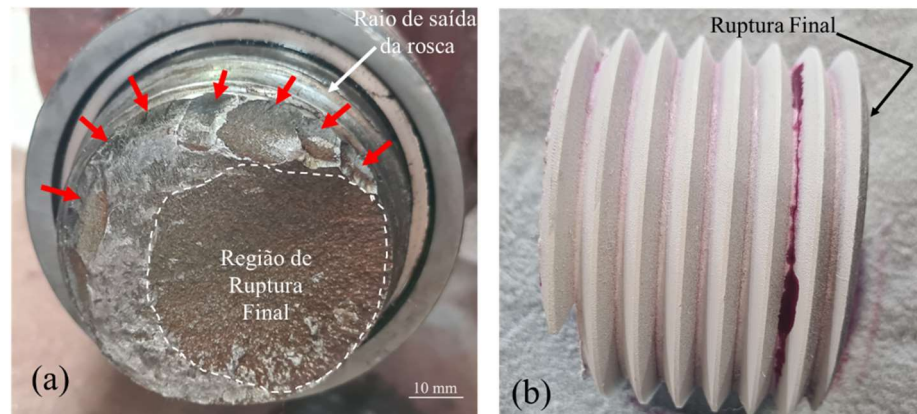


Figura 5.10 – Fractografia do eixo de aço ABNT 4140: (a) Face da fratura; (b) Vista da região da rosca fraturada.

### 6.8 Análise de Tensão por *Software* ANSYS no Eixo aço de um Aço ABNT 4140

Foi realizada simulação de carregamento estático do eixo em estudo, utilizando método de elementos finitos no *software* ANSYS 2023 R1, de acordo com os dados de geometria, propriedades do aço ABNT 4140 (Tabela 5.2) e condições operacionais de carregamento estático crítico (Torque de 3885N-m). O Anexo 5 apresenta os dados do motor elétrico que foram utilizados como base para o cálculo do torque. Na Figura 5.11 apresenta-se o desenho do eixo em estudo, modelado em 3D no *software* *SpiceClaim*, em conformidade com as dimensões e geometria originais de projeto.

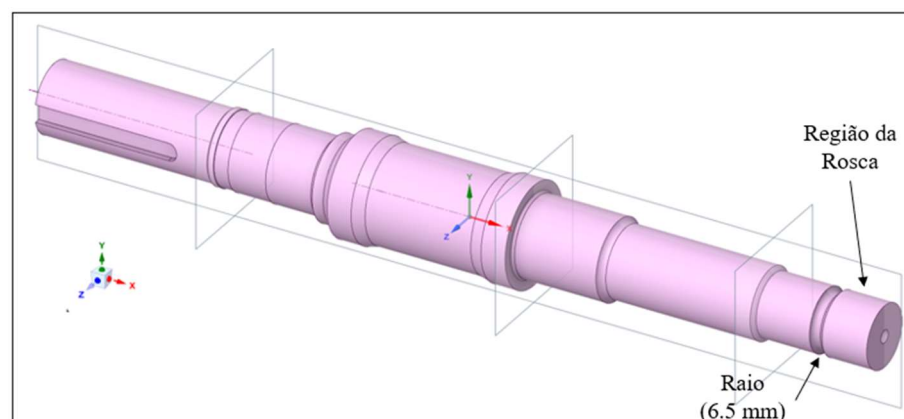


Figura 5.11 – Modelagem 3D do eixo fraturado de um aço ABNT 4140; *Software* ANSYS.

Para a simulação foi gerada a malha de acordo com a seguinte configuração: (a) *physics preference: Mechanical*; (b) tamanho do elemento da malha: 5 mm; (c) número de nós: 136274; (d) número de elementos gerados: 78884. Na Figura 5.12 apresentam-se imagens em 3D da malha de análise gerada na região de maior interesse que é aquela da rosca e raio de saída onde houve a fratura.

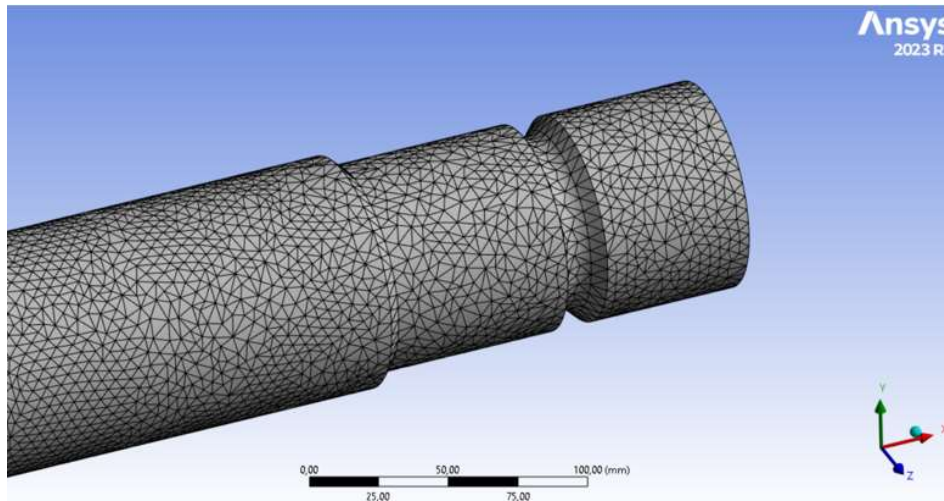


Figura 5.12 – Malha para simulação numérica de carregamento de eixo de um aço ABNT 4140; *Software ANSYS*.

Na Figura 5.13 apresenta-se a região de localização dos mancais de rolamentos empregados para a sustentação do eixo. Para tanto, foi criado na região dos mancais, um elemento “cylindrical support” que simula apoio de deslizamento do eixo, conforme destacado na Figura 5.13. Apresenta-se ainda as localizações de fixação e de aplicação do torque nos extremos do eixo.

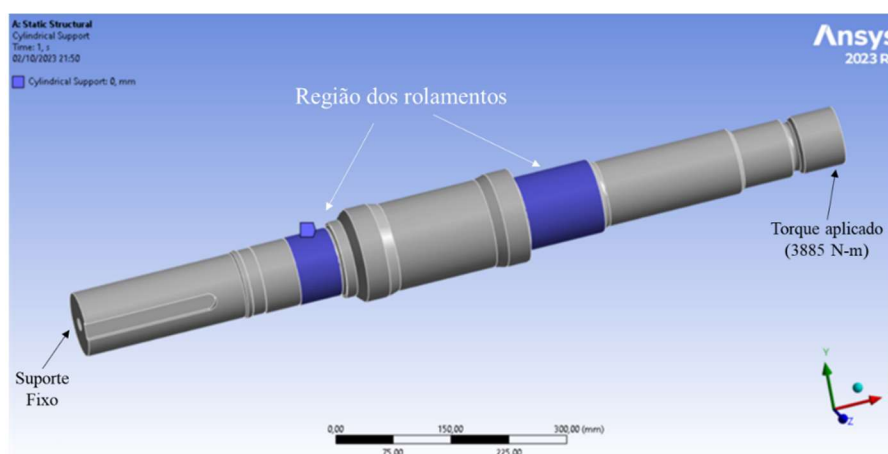


Figura 5.13 – Localização de mancais de rolamento, de restrição e aplicação de torque de um aço ABNT 4140; *Software ANSYS*.



O resultado da simulação é apresentado na Figura 5.14(a) onde se revela que a região crítica de concentração de tensão na ponta do eixo do lado da rosca que se acopla ao rotor da bomba, mais especificamente no raio de saída da rosca (Figura 5.14-b). Nessa localidade houve a tensão máxima equivalente de Von-Mises (203,57MPa) produzida no eixo com a aplicação do torque de 3885 N.m. Importante observar que foi nessa mesma localidade onde ocorreu a fratura do eixo, conforme ilustrado na Figuras 5.10 (a, b).

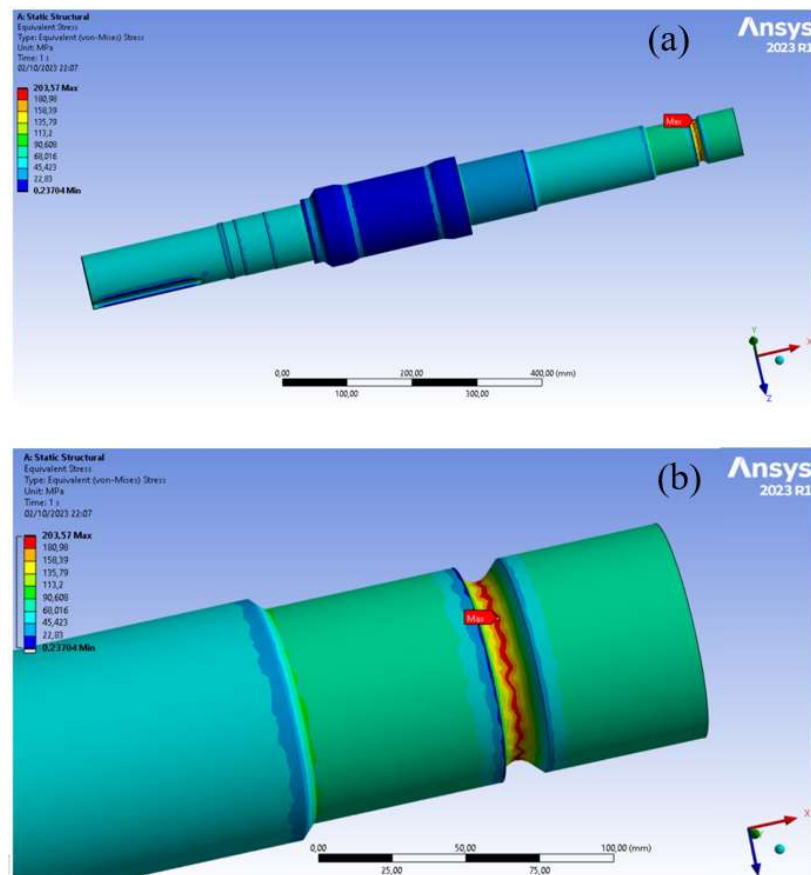


Figura 5.14 – Distribuição de tensões simuladas: (a) em todo o eixo; (b) região crítica, ponta do eixo de um aço ABNT 4140; *Software* ANSYS.

## 6 CONCLUSÕES

- A análise visual da fratura do eixo revelou a ocorrência de uma fratura típica por fadiga, apresentando inicialmente um crescimento estável de trincas nucleadas em múltiplos pontos de concentração de tensões na superfície, seguida de ruptura final devido à redução da seção transversal resistente.
- A tensão equivalente máxima de 203,57MPa, obtida por simulação numérica, com a aplicação de um torque de 3885 N-m, ocorreu no mesmo local onde ocorreu a fratura do eixo.
- O mau acabamento de usinagem favoreceu a ocorrência de múltiplas concentrações de tensões que contribuíram para a nucleação e consequente crescimento da trinca por fadiga que culminou na fratura final do eixo.
- A microestrutura grosseira e heterogênea composta por perlita e bainita contribuiu para a baixa tenacidade ao impacto do aço ABNT 4140.
- O material do eixo do um aço ABNT 1045, com microestrutura de ferrita e perlita pode ser refinada aumentando a dureza, resistência mecânica e tenacidade ao impacto.
- A existência de precipitados de sulfeto de manganês na microestrutura do aço ABNT 4140 pode ter favorecido a concentração de tensões nos contornos de grão, causando trincas intergranulares secundárias em fraturas por tração, fadiga e impacto.
- Revisar projeto (desenho) com as especificações de propriedades mecânicas e tratamento térmico necessário.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudo complementar de fratura em luva de proteção de eixos de bombas centrífugas de polpa de minérios de ferro.
- Investigar efeitos de sobrecarga por reversão de fluxos em paradas de bombeamento centrífugo de polpa de minérios de ferro.
- Rever projeto devido a concentração de tensão no ponto da fratura;
- Aplicar metodologia da Mecânica da Fratura;
- Realizar estudos aprofundados de integridade estrutural de aços aplicados em eixos de bombas centrífugas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHYAR, I.; SAYUTI, M. Effect of Heat Treatment on Hardness and Microstructures of AISI 1045. *Advanced Materials Research*, v. 1119, p. 575-579, 2015.

ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press. 2017.

ANKITA R., PIYAS P., SANTANU D., GOUTAM MUKHYOPADAYAY, Investigation of torsional fatigue of a centrifugal pump shaft, *Engineering Failure Analysis* 112 104511. 2020.

ASHBY, M. F. *Seleção de materiais no projeto mecânico*. V. 1. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASKELAND, D. R & WRIGHT, W. J. *Ciência e Engenharia dos Materiais*. 4ª ed. Cengage Learning Edições Ltda. 2019.

ASM. *Fatigue and fracture*. Vol. 19. ASM International. 1996.

ASTM E466-15. Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials.

ASTM E8/E8M-16a. Standard test methods for tension testing of metallic materials.

ASTM E1823-13. Standard terminology relating to fatigue and fracture testing.

ASTM E18-20. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

ASTM E23-18. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

ASTM E399-23. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.

BACHUS, LARRY; CUSTODIO, ANGEL. *Know And Understand Centrifugal Pumps*. Elsevier, 2003.

BADARUDDIN, M., WARDONO, H., WANG, C. J., & RIVAI, A. K.. Improvement of low-

cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment. *International Journal of Fatigue*, 125, 406-417, 2019.

BARABADY, J., KUMAR, U. (2017). Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 106-112.

BARBOSA, Fundamentos da Análise Fractográfica de Falhas de Materiais Metálicos, Editora Blucher, 1 ed. São Paulo, 2021.

BERNDT, F.; VAN BENNEKOM, A. Pump shaft failures - a compendium of case studies. *Engineering Failure Analysis*, v. 8, n. 2, p. 135-144, 2001.

BHADESHIA, H.K.D.H, & HONEYCOMBE, R. (2017). *Steels: microstructure and properties*. Butterworth-Heinemann.

BRANCO, C.A.G.M. *Mecânica dos materiais*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

BLACK, P. O. *Bombas*. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos S/A, 1979.

CALLISTER Jr., W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução*. Editora LTC, 8ª edição, 2009.

CARVALHO, D. F. *Instalações Elevatórias de Bombas*. 6. ed. Belo Horizonte: Fundação Mariana Resende Costa/FUMARC, 1999.

CARVALHO, N. F., PEREIRA, S. F., MORAES, W. A. (2016). Failure Analysis of the Pipe used in a Heat Exchanger generated by the acting of a Safety valve. *Unisantia Science and Technology*, 5(1), 9-16.

CHAN, K. S. Roles of microstructure in fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue*, 32 (2010) 1428-1447.

CHANDIO, ALI & SHEIKH, ASIF & ABRO, SHAHID & HASAN, BILAL & MADAD, SYED & QURESHI, M & ALI, ZULFIQAR. (2021). Influence of Heat Treatment on

Microstructural and Mechanical Characteristics of Steel. 53. 65-70.

CHAOUCH, D., SADOK, A., BENDAOUZI S.-E., CHAOUCH, A., 2018. Effect of Charpy Impact Test on Microstructure Properties of AISI4140 Steel. *Mechanics and Mechanical Engineering* 22(4), 1463-1469.

DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. 2 Ed. Guanabara dois. 1981.

DOWLING, N. E. *Mechanical behavior of materials, engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4ª Ed. Estados Unidos: Editora Pearson Education. 2012.

FIALHO, A. B. *Automação Hidráulica - Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos*. São Paulo: Érica 7º ed. 304-306, 2018.

FREITAS, W. F; CORRÊA, E. C. S.; NETO, P. S.; SANTANA, I. J. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA À FADIGA DO AÇO AISI 4140 SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE REVENIMENTO, p. 20-28. In: 66º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 2011. ISSN: 2594-5327

GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C. MORAIS, W. A. *Análise de falhas*. ABM. 2011.

GU SHUCHAO, ZHAO MINGHUA, QIU GUOPING, WANG RUIXUAN, LIU YUZHE, LI JUN, Case of study of failed feed water pump shaft in HRSG of 9F gas turbine generator unit, *Engineering Failure Analysis* 118 (2020).

GHIBAN, B.; BRAN, D. T. Heat treatment behavior of alternator shafts steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 572, p. 1-11, 2019.

HANLON T, KWON Y-N, SURESH S. Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals. *Scripta Mater* 2003;49: 675–80.

HANLON T, TABACHNIKOVA ED, SURESH S., Fatigue behaviors of nanocrystalline metals and alloys. *Int J Fatigue* 2005;27: 1147–58.

HE, L., WANG, Z., AKEBONO, H., & SUGETA, A. Machine learning-based predictions of fatigue life and fatigue limit for steels. *Journal of Materials Science & Technology*, 90, 9-19, 2021.

KARASSIK, I. J., MESSINA, J. P., COOPER, P. *Pump Handbook*, McGraw-Hill Professional Publishing; 4th ed. Edição, 2007.

LACERDA, J. C.; MARTINS, G. D.; SIGNORETTI, V. T.; TEIXEIRA, L. P. Evolution of the surface roughness of a low carbon steel subjected to fatigue. *International Journal of Fatigue*, v. 102, p. 143–148, 2017.

LACERDA, J. C. Comportamento em fadiga e corrosão de um aço UNS S31803 com diferentes frações de ferrita-austenita. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – UFOP, 2015.

LOPES, J. T. de B. Influência da Presença de Fases Frágeis e da Temperatura nas Propriedades de Propagação de Trinca por Fadiga do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UNICAMP, 2006.

MACINTYRE, A. J. *Equipamentos Industriais e de Processo*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1997.

MAHMOOD, N. J., HUSSEIN, A. A., HASAN, A. S., & Ali, O. M. Effect of AISI 4140 carbon steel heat treatments on specified mechanical properties. In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2660, No. 1, 2022.

MESHREF A. A., MAZEN A. A., EL-GIUSHI M. A. and ASHRAF T.M. Study of the Influence of Heat Treating Temperatures on the Fracture Properties of the Ultrahigh-strength low-alloy Steel Type 4140, *International Journal of Engineering and Information Systems*, Vol. 5 Issue 2, February - 2021, Pages: 17-25.

MEYSAMI, A. H., GHASEMZADEH, R., SEYEDEIN, S. H., & ABOUTALEBI, M. R. (2010). An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel. *Materials & Design*, 31(3), 1570-1575.

MILAN, M. T., MALUF, O., SPINELLI, D., BOSE F., W. W., *Metais Uma Visão Objetiva*. 2.

ed. São Carlos, Editora Cubo, 2014.

MILELLA, P. P. Fatigue and corrosion in metals. Milan – Itália: Springer-verlag. 2013.

MONTEIRO, F. L. Análises de Falhas de Eixo de Laminadora. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) – UNESP, 2004.

MOORE, G. R., BELBUSTI, M. Bombas Centrífugas de polpa, Weir do Brasil, São Paulo, 2001.

PADILHA, A. F. Materiais para engenharia Microestrutura e Propriedades. 1 Ed. Hemus. 2006.

PINEDO, C. E., Tratamentos térmicos e superficiais dos aços. São Paulo: Blucher, 2021.

QUEIROZ, H. S., ARAÚJO, J. A., SILVA, C. R. M., & FERREIRA, J. L. A. (2022). A coupled critical plane-area methodology to estimate fatigue life for an AISI 1045 steel with small artificial defects. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 121, 103426.

SENTHILKUMAR, T., AJIBOYE, T.K., Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. *Journals of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2012. p. 143-152.

SINGH, S., SAMIR, S., KUMAR, K., & THAPA, S. (2021). Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5097-5101

SHIGLEY, J. E. Elementos de máquinas, Rio de Janeiro: LTC Editora, 1984.

TAMIN, M. N.; HAMZAH, M. A. Fatigue Failure Analysis of a Centrifugal Pump Shaft. *Failure Analysis Prevention*, Intech, 2017.

TUZSON, John. Centrifugal Pump Design. CRC Press, 2018.

WANG, Y.; MELETIS, E. I.; HUANG, H. Quantitative study of surface roughness evolution during low-cycle fatigue of 316L stainless steel using Scanning Whitelight Interferometric



(SWLI) Microscopy. *International Journal of Fatigue*. 48 (2013) 280-288.

YAZDANI, S., YOOZBASHI, M.N., EBRAHIMI, A., 2007. Enhancement of Fatigue Strength of ABNT 1045 Steel by Tempering Treatment and Shot Peening. *Materials Science Forum* 561-564, 41-44.

YU, M. T., DUQUESNAY, D. L. AND TOPPER, T. H. Notch fatigue behaviour of ABNT1045 steel, *International Journal of Fatigue*, Volume 10, Issue 2, Pages 109-116, 1988

ZHANG, X. C., ZHANG, Y. K., LU, J. Z., XUAN, F. Z., WANG, Z. D., & TU, S. T. (2010). Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening. *Materials Science and Engineering: A*, 527(15), 3411-3415.

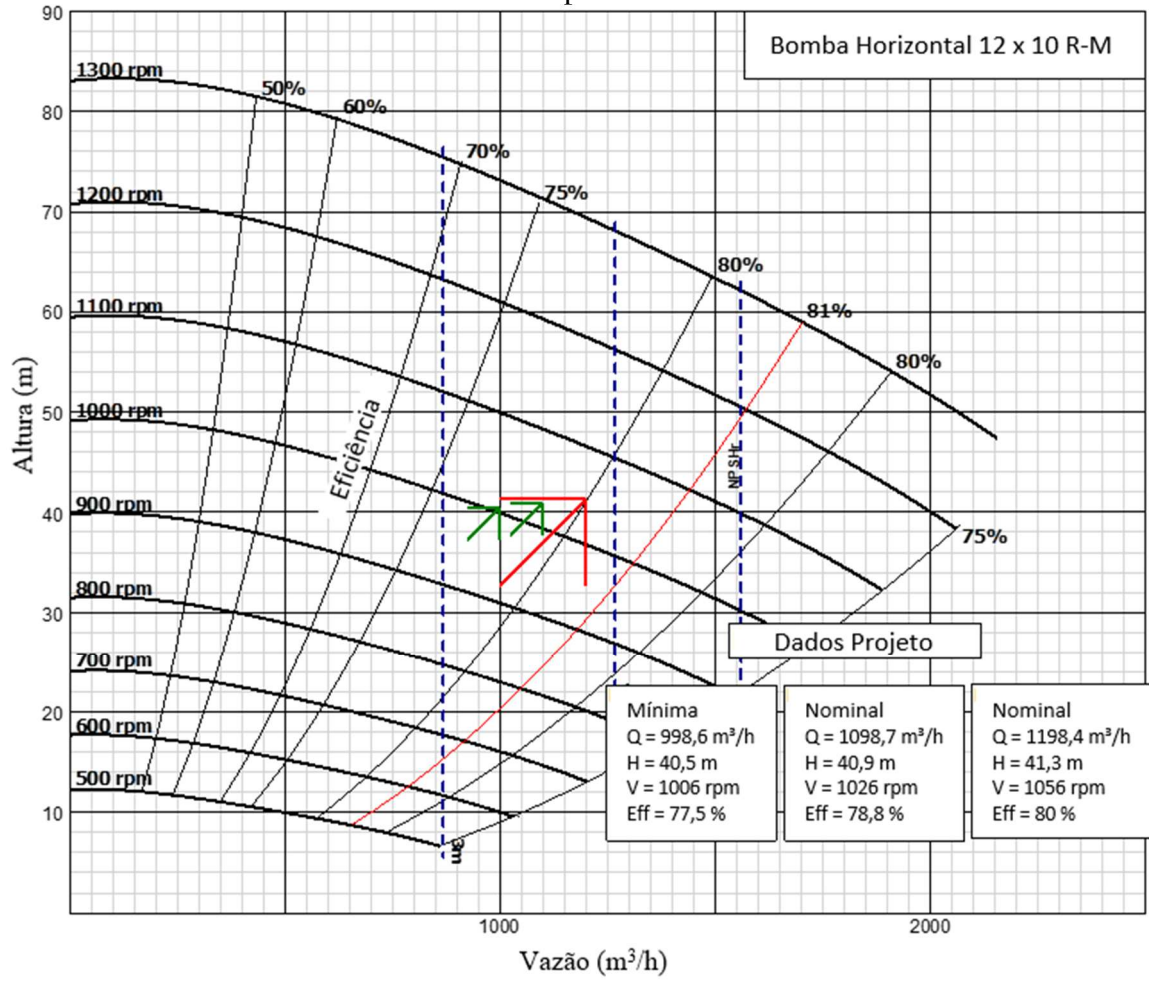
ZERBST, U., MADIA, M., VORMWALD, M., & BEIER, H. T. (2018). Fatigue strength and fracture mechanics – A general perspective. *Engineering Fracture Mechanics*, 198, 2-23.

## ANEXOS

## Anexo 1 – “Folha” de Dados Técnicos da Bomba.

Item	Descrição	Un.	Informação
1	Fabricante	-	
2	Modelo	-	12/10R-M
3	Serviço	-	Bombeamento para alimentação de hidrociclones
	Requisitos de Operação		
4	Mínima	m <sup>3</sup> /h	998,72
5	Nominal	m <sup>3</sup> /h	1098,57
6	Projeto	m <sup>3</sup> /h	1198,46
	Altura manométrica total	-	
7	Mínima	mca	40,5
8	Nominal	mca	40,9
9	Projeto	mca	41,4
	NPSH disponível	-	
10	Mínimo	m	8,32
	Rotação da bomba (calculados)	-	
11	Mínima	rpm	1006
12	Máxima	rpm	1026
13	Projeto	rpm	1056
	Características do Material Bombeado		
14	Tipo da polpa	-	Minérios de Ferro
15	Densidade do fluido	t/m <sup>3</sup>	1,0
16	Densidade do sólido	t/m <sup>3</sup>	3,54
17	Densidade da polpa	t/m <sup>3</sup>	1,07
18	Concentração em peso	%	9
19	Concentração em volume	%	2,72
20	Diâmetro médio das partículas de minério - D50	µm	65
21	Temperatura de bombeamento	20°C	Ambiente
22	Viscosidade do fluido	cP	1,0
23	Viscosidade da polpa	cP	1,2
	Características Específicas das Bombas Centrífugas Horizontais para Polpa		
	Rotor	-	
24	Tipo (aberto/ fechado/ semi-aberto)	-	Fechado
25	Tipo de material	-	ASTM A532 III A
26	Quantidade	un.	1
27	Velocidade periférica	m/s	31,51
28	Diâmetro	mm	570
	Mancais	-	
29	Tipo	-	ROLAMENTO
30	Vida útil L10	h	100.000
31	Tipo de lubrificação	-	GRAXA
32	Tipo de vedação	-	LABIRINTO
	Transmissão		
33	Tipo de correia	-	Trapezoidal 8V 1900
34	Quantidade de correias	un.	8
35	Rotação Motor	rpm	1179
36	Rotação Bomba	rpm	1056
37	Diâmetro da polia motriz	mm	430
38	Diâmetro da polia movida	mm	480
39	Relação de redução	-	1,11
10	Fixação nos eixos	-	Bucha Cônica e chavetas

Anexo 2 – Curva de Desempenho de Bomba 12 x 10 R-M.





**PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM O TRABALHO**

Artigo intitulado “*Fracture failure of a centrifugal ore slurry pump shaft*”, submetido na revista “*Engineering Failure Analysis*”.