



**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE FRACTOGRÁFICA E METALOGRÁFICA DE UMA REGIÃO DE FRATURA**

**Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

**André Lemos Pêcego**

**Rio de Janeiro – Dezembro de 2015**

## **RESUMO**

Neste trabalho é feito um estudo com bases em análises fractográficas e metalográficas da região de fratura de um eixo virabrequim fabricado com aço DIN 34CrNiMo6.

Por meio de imagens em escala microscópicas obtidas por microscopia ótica (MO), microscópico eletrônico de varredura (MEV) e da utilização da técnica de energia dispersiva (EDS), que permite uma análise química pontual, foi feita uma análise com o objetivo de determinar a causa raiz da falha.

**Palavras Chave: Metalografia, Fractografia, Fadiga, Aço DIN 34CrNiMo6.**

## **ABSTRACT**

This work presents a study based on the fractographic and metallographic analysis of the fractured region of a crankshaft made with DIN 34CrNiMo6 STEEL.

The analysis was made making use of images in a microscopic scale obtained by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and adopting the energy dispersive technique (EDS), which allows a local chemical analysis, in order to clarify the determination of the root cause of the failure.

**Keywords: Metallographic, Fractographic, Fatigue, Steel DIN 34CrNiMo6**

## ÍNDICE DE TABELAS

---

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO DIN 34CrNiMo6.....	10
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SPECTRUM 1. ....	34
TABELA 3- COMPOSIÇÃO QUÍMICA QUANTITATIVA DO SPECTRUM 2. ....	36
TABELA 4- COMPOSIÇÃO QUÍMICA QUANTITATIVA DO NOVO SPECTRUM 1 (FIGURA 30): .....	38
TABELA 5- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SPECTRUM 1 DA FIGURA 31. ....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DO VIRABREQUIM EM FUNCIONAMENTO .....	8
FIGURA 2 - CONSEQUÊNCIA DO ENTALHE NA CONCENTRAÇÃO DE LINHAS DE FORÇA (FONTE: CASTRO & MEGGIOLARO, P.262) .....	12
FIGURA 3- ESQUEMA DOS SÍTIOS DE NUCLEAÇÃO DA TRINCA (FONTE: MEYERS E CHAWLA).....	14
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DAS FASES DE INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DA TRINCA E DA RUPTURA DO COMPONENTE.....	15
FIGURA 5 - ESQUEMA DAS ESTRIAS TÍPICAS NA SUPERFÍCIE DE FADIGA (ADAPTADO DE BEACHEM, 1967).....	16
FIGURA 6 - MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (FONTE: BRANDÃO, 2012).....	18
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS COMPONENTES DO MEV.....	19
FIGURA 8 - RESULTADO DAS INTERAÇÕES DO FEIXE DE ELÉTRONS COM A AMOSTRA (ADAPTADO DE GOLDSTEIN, 2007)...	21
FIGURA 9 - ESPECTRO DOS ELÉTRONS QUE DEIXAM A AMOSTRA (MEYERS, 1982).....	22
FIGURA 10 - EIXO VIRABREQUIM FRATURADO NA PLANTA TERMOELÉTRICA APÓS SUBSTITUIÇÃO (FONTE:DEMA PUC-Rio). .....	24
FIGURA 11 - DETALHE DO EIXO VIRABREQUIM. A REGIÃO HACHURADA INDICA A FRATURA PARCIAL DO EIXO APÓS ENSAIO DE ULTRASSOM (FONTE:DEMA PUC-Rio). ....	24
FIGURA 12 - DETALHE DO EIXO VIRABREQUIM APÓS O CORTE DA REGIÃO HACHURADA APRESENTADA NA FIGURA 11 (FONTE:DEMA PUC-Rio).....	25
FIGURA 13 - DETALHE DO EIXO VIRABREQUIM APÓS SEPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES (FONTE:DEMA PUC-Rio).....	25
FIGURA 14 - SUPERFÍCIE DE FRATURA DO EIXO VIRABREQUIM (FONTE:DEMA PUC-Rio).....	26
FIGURA 15 - DETALHAMENTO DA REGIÃO DE INTERESSE NA SUPERFÍCIE DE FRATURA DO EIXO VIRABREQUIM (FONTE: DEMA PUC-Rio).....	27
FIGURA 16 - IMAGEM OBTIDA POR MEV NA REGIÃO DE INTERESSE DO EIXO FRATURADO. ....	27
FIGURA 17 - IMAGEM OBTIDA POR MEV NA REGIÃO DE INTERESSE DO EIXO FRATURADO. ....	28
FIGURA 18 - IMAGEM OBTIDA POR MEV NA REGIÃO DE INTERESSE DO EIXO FRATURADO. ....	29
FIGURA 19 - AMPLIAÇÃO DA ÁREA DE INTERESSE DESTACADA NA FIGURA 18 .....	29
FIGURA 20 - IMAGEM OBTIDA POR MEV NA REGIÃO DE INTERESSE DO EIXO FRATURADO. INDICAÇÃO DE POSSÍVEL PRESENÇA DE INCLUSÃO NA REGIÃO DA FRATURA. ....	30
FIGURA 21- PRESENÇA DE PARTÍCULAS DE SEGUNDA FASE EM REGIÃO ADJACENTE ÀQUELA DE FRATURA. ....	31
FIGURA 22 - PRESENÇA DE PARTÍCULAS DE SEGUNDA FASE EM REGIÃO ADJACENTE ÀQUELA DE FRATURA. ....	31
FIGURA 23 - PRESENÇA DE PARTÍCULAS DE SEGUNDA FASE EM REGIÃO ADJACENTE ÀQUELA DE FRATURA. ....	32
FIGURA 24 - REGIÃO JUNTO À SUPERFÍCIE DE FRATURA DO EIXO VIRABREQUIM. ....	32
FIGURA 25 - PARTÍCULA (SPECTRUM1) A SER EXAMINADA POR EDS .....	33
FIGURA 26 - RESULTADO OBTIDO DA ANÁLISE DO SPECTRUM 1. ....	33
FIGURA 27- OUTRA REGIÃO DE ANÁLISE NO MATERIAL. ....	35
FIGURA 28 - PARTÍCULA (SPECTRUM2) A SER EXAMINADA POR EDS. ....	35
FIGURA 29 - RESULTADO OBTIDO DA ANÁLISE DO SPECTRUM 2, INDICANDO QUALITATIVAMENTE SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA CARATERÍSTICA. ....	36
FIGURA 30 - OUTRO SPECTRUM1 A SER EXAMINADO POR EDS.....	37
FIGURA 31 - RESULTADO OBTIDO DA ANÁLISE DO NOVO SPECTRUM 1 APRESENTADO NA FIGURA 30, INDICANDO QUALITATIVAMENTE SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA CARATERÍSTICA. ....	37
FIGURA 32- NOVAMENTE, MAIS UM SPECTRUM 1 FOI EXAMINADO POR EDS. ....	38
FIGURA 33 - RESULTADO OBTIDO DA ANÁLISE DE MAIS UM SPECTRUM 1 (FIGURA 32), INDICANDO QUALITATIVAMENTE SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA CARATERÍSTICA. ....	39

# SUMÁRIO

---

1. Introdução .....	7
2. Revisão Bibliográfica .....	8
2.1. Virabrequim.....	8
2.2. Metais.....	9
2.2.1. Aço .....	9
2.2.2. Aço DIN 34CrNiMo6 .....	10
2.3. Falha Mecânica .....	10
2.4. Concentradores de tensão .....	11
2.5. Metalografia .....	16
2.6. Fractografia.....	16
2.7. Microscópio Eletrônico de Varredura .....	17
2.7.1. MEV.....	17
2.7.2. Funcionamento .....	18
2.7.3. Componentes.....	19
2.7.4. Partículas resultantes da interação feixe-amostra. ....	20
3. Análises, Resultados e Discussão .....	24
4. Conclusões .....	41
5. Sugestão para trabalhos futuros.....	42
6. Referências Bibliográficas.....	43

## **1. Introdução**

Os problemas causados por falhas estruturais podem ocasionar severos danos ambientais e materiais além de pôr a vida de pessoas em risco. Saber a origem da falha é de extrema importância para que se consiga evita-la no futuro e, por isso, técnicas como a fractografia e a metalografia são importantes ferramentas para prevenção de novas falhas.

A fractografia consiste em analisar a superfície de fratura que originou a falha do componente, evidenciando as características do carregamento, interação destes com a microestrutura e o tipo de propagação da trinca. Ela pode, por exemplo, indicar as linhas de ação de carga em ligas metálicas e a dinâmica do processo de fratura. Por meio dela é possível confirmar ou remover suspeitas sobre o acontecimento anterior ao momento da falha. Embora a técnica possua diversas qualidades, seu processo necessita de um considerável investimento por envolver equipamentos sofisticados como o microscópio eletrônico de varredura que, através da transcodificação da energia emitida pelos elétrons, produz imagens de alta ampliação e resolução.

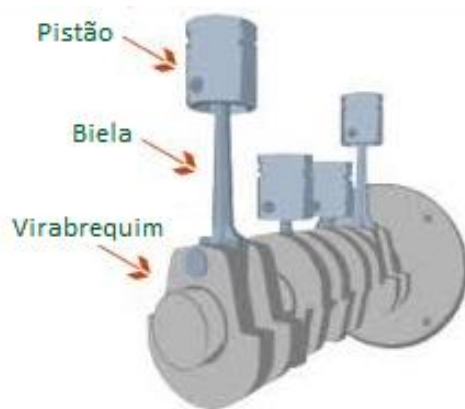
A metalografia estuda a estrutura dos materiais em níveis microscópicos e as relaciona com suas propriedades e composição química, podendo ser uma boa ferramenta para avaliar estruturas, inclusões e defeitos, por exemplo. Seu procedimento para revelar a microestrutura do material envolve etapas como polimento, ataque da amostra com reagente químico e observação com microscópio.

Através dessas técnicas, se investigou a causa raiz da falha prematura de um eixo virabrequim fabricado com aço estrutural DIN 34CrNiMo6.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. VIRABREQUIM

O virabrequim, também conhecido como árvore de manivelas, fica localizado na parte inferior do motor e tem a função de transformar o movimento alternativo dos pistões de subida e descida em um movimento rotativo por meio de sua conexão com as bielas como representado na Figura 1.



*Figura 1 - Esquema do virabrequim em funcionamento*

O torque é então transmitido aos demais componentes do seu eixo. Por estar sob grandes esforços cíclicos, o virabrequim necessita de boa resistência à tração, torção e fadiga.



## **2.2. METAIS**

Materiais metálicos são, no geral, rígidos e bons condutores de calor e eletricidade. Em relação a sua microestrutura, os metais apresentam redes simples, compactas, e a propagação de suas discordâncias é trivial devido à similaridade dos sítios de suas redes. Essas características fazem com que os metais tendam a ser dúcteis e encruáveis, fazendo com que cheguem à falha mecânica normalmente por esgotamento da ductilidade (Castro & Meggiolaro, 2009).

### **2.2.1. Aço**

Aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono extremamente importante em elementos estruturais. A fim de se obter as características necessárias para cada aplicação, são adicionados elementos de liga nos aços. Segundo Budinski, alguns dos elementos de ligas e seus principais efeitos são:

C - Aumenta a temperabilidade e dificulta a soldagem

N - Aumenta a resistência

Cr – Aumenta a temperabilidade e as resistências à corrosão, à temperatura e ao desgaste.

Ni – Aumenta a temperabilidade e a tenacidade

Mn – Aumenta a temperabilidade e a tenacidade

Mo – Aumenta a temperabilidade e a resistência a temperatura

Si – Aumenta a temperabilidade, a tenacidade, a resistência a corrosão e a permeabilidade magnética, desoxidante

### 2.2.2. Aço DIN 34CrNiMo6

Este aço é um dos mais versáteis e bastante utilizado em componentes de máquinas uma vez que a base de cromo-níquel-molibdênio aumenta sua resistência a corrosão, desgaste e temperatura, aumenta sua temperabilidade, tenacidade e capacidade de encruar, os tornando resistentes a deformação. Por meio de tratamentos térmicos como revenimento e normalização, essas características podem ser ainda mais melhoradas. De modo que, no geral, quanto mais rápido o resfriamento, maior a dureza e a resistência e menor a ductilidade.

*Tabela 1 - Composição Química do Aço DIN 34CrNiMo6.*

Elemento	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo
<b>Variação Peso %</b>	<b>0.3 - 0.38</b>	<b>0 - 0.4</b>	<b>0.5 - 0.8</b>	<b>1.3 - 1.7</b>	<b>0 - 0.025</b>	<b>0 - 0.035</b>	<b>1.3 - 1.7</b>	<b>0.15 - 0.3</b>

### 2.3. FALHA MECÂNICA

A aplicação de repetidas cargas variáveis sobre um determinado componente pode levá-lo a fadiga. Fadiga pode ser definida como o fenômeno de rompimento de forma progressiva de materiais que estão sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação (Branco, 1986). Após a fratura de um componente mecânico é importante que se analise e identifique as causas do surgimento da trinca durante seu comportamento dinâmico para que sejam feitas ações direcionadas nas futuras peças com o objetivo de aumentar sua vida útil de acordo com a causa da ruptura.

A falha mecânica ocorre quando o nível de solicitação em algum ponto ultrapassou o nível de resistência ou por esgotamento da ductilidade do material. Esse ponto crítico pode ter diversas causas. Concentração de tensão causada por entalhe, cantos vivos e furos ou à uma baixa resistência localizada devido a uma inclusão, vazios, porosidades ou falhas em soldas.

O processo de fadiga passa pelas etapas de nucleação e crescimento das trincas até que estas atinjam um tamanho crítico causando a fratura do material. Para estudá-lo, deve-se observar detalhes em torno da geometria e dos componentes do material no ponto crítico, além da história de tensões e deformações atuantes no elemento.

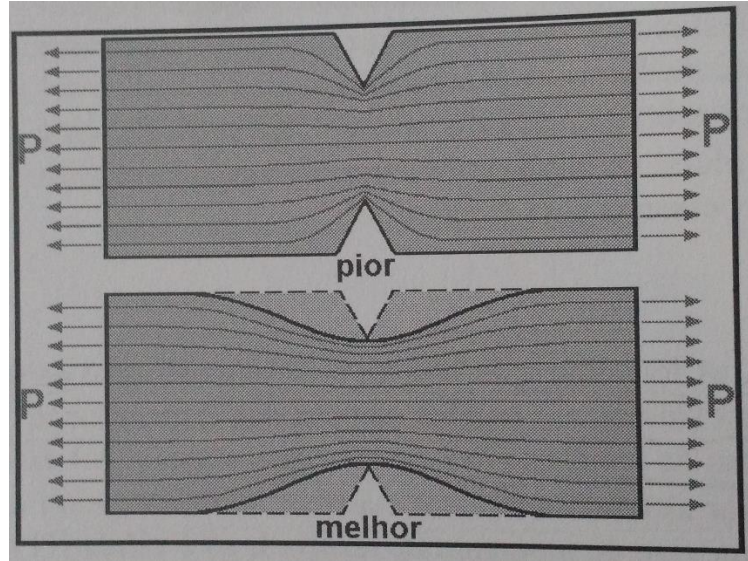
O carregamento cíclico aliado à redução da capacidade de responder a deformações plásticas do material faz com que microtrinca se propague, de acordo com Castro & Meggiolaro (2009).

## **2.4. CONCENTRADORES DE TENSÃO**

A região com maior tendência de possuir micro e macro entalhes oriundos da manufatura ou operações de serviço da peça é na superfície da peça, por isso, é nela que geralmente a trinca se inicia.

O entalhe faz com que a região concentre tensões. Toda a estrutura que está sujeita a esforço, possui um fluxo representados pelas linhas de força. Como as linhas de força não somem e não podem ser cortadas, quando uma peça possui um entalhe a linha de força o contorna diminuindo seu espaço para as linhas adjacentes, resultando numa quantidade maior de carga passando na região.

Cantos vivos devem ser sempre evitados e um dos meios de fazer isso é retirando o material da peça se necessário, a medida reduzirá os efeitos do  $K_t$  na peça uma vez que as linhas de força que atravessam na peça se tornam mais suaves como pode ser observado na Figura 2.



*Figura 2 - Consequência do Entalhe na Concentração de Linhas de Força (Fonte: CASTRO & MEGGIOLARO, p.262)*

Logo, a observação deve estar direcionada para um ponto específico uma vez que a falha por fadiga pouco depende das tensões atuando na peça como um todo (Castro & Meggiolaro, 2009). Seu fator de concentrador de tensão elástico  $K_t$ , pode ser definido como a razão entre a tensão máxima que atua no local e a tensão nominal que haveria no local caso não possuísse nenhum defeito.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$

De acordo com Branco (1986), há também outros fatores que afetam a resistência a fadiga, dentre os quais:

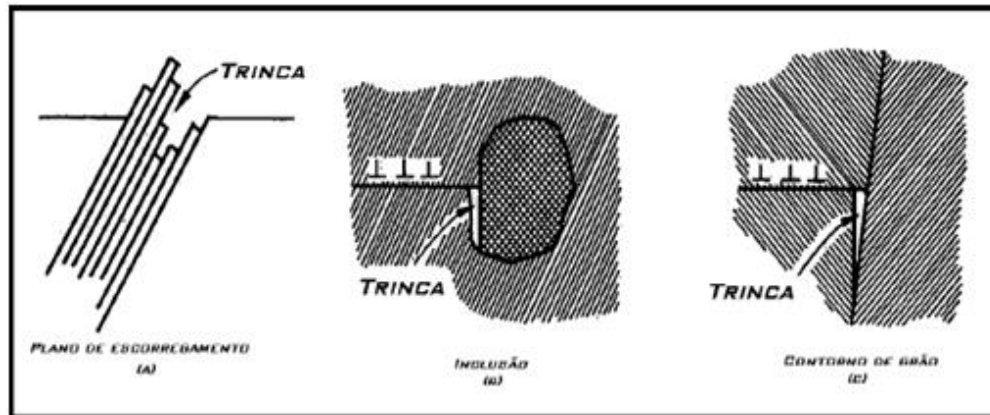
- Tamanho da Corpo de Prova - Foi observado que corpos de prova grandes tendem a romper com número menor de ciclos.

- Acabamento Superficial – Ele pode ser responsável por introduzir tensões residuais, concentrar tensões devido a rugosidade e alterar as propriedades físicas da camada superficial
- Temperatura - A temperatura também é importante porque um elevado gradiente de temperatura pode levar a nucleação de trincas devido às tensões de contração e expansão térmica

Não menos importante, a microestrutura do material também deve ser analisada. O trincamento por fadiga tem início a partir da movimentação cíclica de discordâncias. Elas que formam bandas de deslizando e, à medida que crescem, formam extrusões e intrusões superficiais dando início a microtrinca.

As discordâncias são fundamentais na deformação plástica dos metais, elas que controlam a ductilidade e a sua resistência ao escoamento. Por isso que os metais são combinados com ligas, para que elas atuem bloqueando a movimentação das discordâncias aumentando sua resistência.

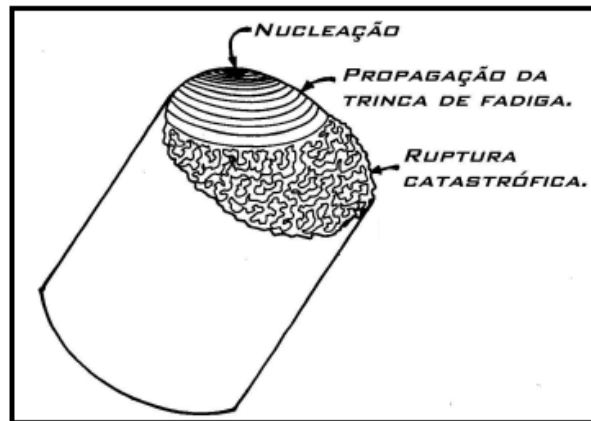
A nucleação tem tendência em ocorrer na superfície ou em locais próximos a ela, entretanto, o ponto exato de seu surgimento é em locais onde há impurezas, contorno de grãos, ou bandas de deslizamento (Meyers e Chawla, 1982).



*Figura 3- Esquema dos sítios de nucleação da trinca (fonte: Meyers e Chawla)*

Dentre esses pontos, a nucleação ocorre mais frequentemente nas bandas de deslizamento, enquanto que as inclusões são características de ligas que contêm muitas partículas grandes e os contornos de grãos são típicos para fadiga de alta deformação segundo Lukas, 1996.

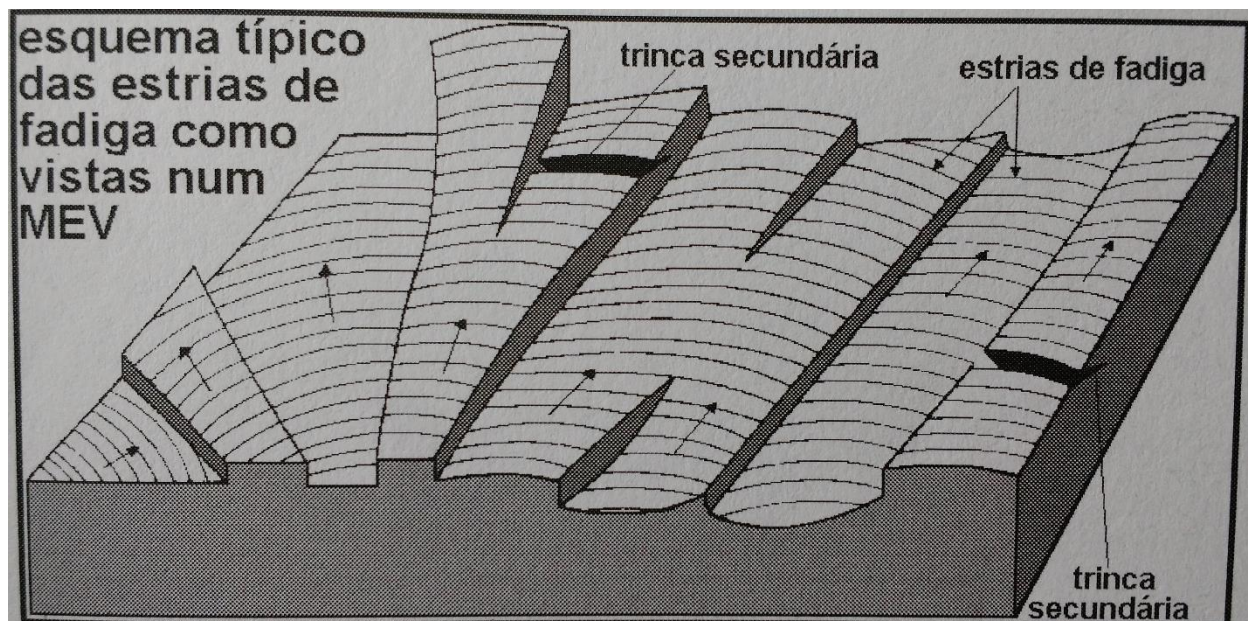
Peças fraturadas por fadiga em que houve propagação da trinca e que a causa foi devido à variação na carga de serviço, pode-se notar as marcas semicirculares denominadas marcas de praia. Estas marcas são macroscópicas, de fácil identificação, e também podem estar presentes em peças que sofreram diferentes graus de oxidação durante seu repouso, são capazes de mostrar o ponto em que a trinca se iniciou e o grau da sobrecarga em que a peça foi submetida (Figura 4).



*Figura 4 - Representação das fases de iniciação e propagação da trinca e da ruptura do componente.*

A análise pode ser feita fazendo a comparação entre os estágios de propagação e o de ruptura, quanto maior a área de propagação da trinca de fadiga, menor foi a sobrecarga.

Outra característica, só que dessa vez microscópica, são as estrias formadas pelo crescimento paulatino da trinca de fadiga. Elas só podem ser observadas através do MEV e seu tamanho e espaçamento estão correlacionados com a história da carga de serviço e com a taxa de propagação da trinca. São marcas aproximadamente paralelas que não se cruzam ou interceptam (Figura 5).



*Figura 5 - Esquema das estrias típicas na superfície de fadiga (adaptado de Beachem, 1967).*

## **2.5. METALOGRAFIA**

O ensaio metalográfico tem o objetivo de relacionar a estrutura, a constituição e textura dos metais e de suas ligas e relaciona-las com suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e os processos de fabricação que foram submetidas.

O exame pode ser feito de forma macroscópica ou microscópica. Na macrografia, é possível obter informações sobre a homogeneidade do material, processo de fabricação, impurezas e natureza das falhas. Já na micrografia, aspectos como a granulação do material, inclusões e constituintes podem ser observados através de microscópio.

## **2.6. FRACTOGRAFIA**



Em 1903 Ewing e Humfrey deram o início a fractografia ao utilizar a microscopia para análise de falha. A técnica tem como objetivo determinar a causa da falha de estruturas de engenharia por meio do estudo da superfície fraturada. Permitindo que seja identificado o local exato que se iniciou a trinca, o sistema de tensões que produziu a fratura, a variação do carregamento mecânica, a intensidade, além de outras informações. A análise microscópica da superfície de fratura só é possível através do MEV.

## **2.7. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA**

### **2.7.1. MEV**

O Microscópio Eletrônico de Varredura (Figura 6) tem capacidade de ampliação muito maior que um microscópio óptico convencional. A resolução é função do comprimento de onda da radiação utilizada e, como o MEV utiliza um feixe de elétrons para formar sua imagem e não fótons como o microscópio óptico, seu poder de resolução não fica limitado ao comprimento de onda da luz visível. Por meio de fótons, o comprimento de onda é de 0,55 m enquanto que o comprimento de onda do feixe de elétrons é 0.005 nm, tornando o MEV um equipamento com limite de resolução 1000x maior do que o microscópio óptico. Além disso, ele é capaz de fazer a microanálise química de um ponto da amostra, o que aumenta sua importância para a análise de fratura.



*Figura 6 - Microscópio eletrônico de varredura (fonte: Brandão, 2012).*

### **2.7.2. Funcionamento**

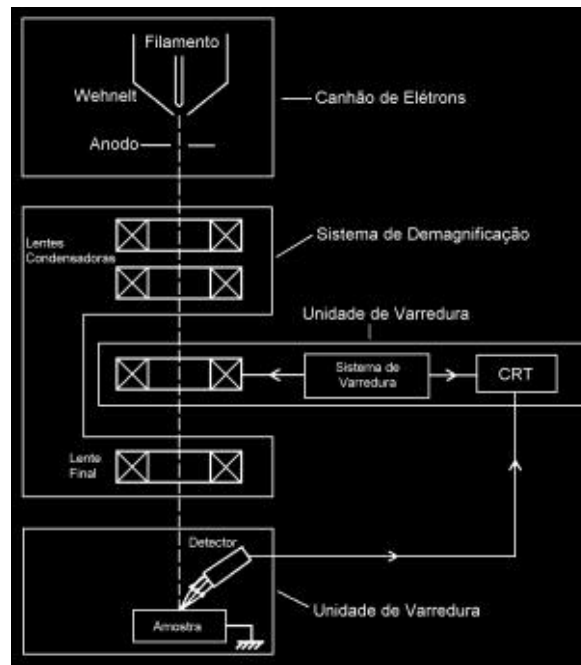
Feixes de elétrons são emitidos por uma fonte que pode ser um filamento capilar de tungstênio ou o FEG (Field Emission Gun) ou hexaboreto de Lantâneo ( $\text{LaB}_6$ ). Apesar das duas últimas opções apresentarem um brilho mais intenso, o tungstênio, por ser o metal com mais alto ponto de fusão ( $3410\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e mais baixa pressão de vapor, propicia seu aquecimento até a temperatura de  $2700\text{ K}$  ( $2427\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) que é a temperatura que leva a emissão termoiônica, já que nela os elétrons são capazes de ultrapassar a barreira de energia para escapar do material. A fonte de tungstênio vem sendo a mais utilizada nos últimos 50 anos pelo seu baixo custo e bom desempenho, sendo também considerada como a melhor opção de fonte segundo Goldstein (2007).

Por meio de uma diferença de potencial que pode variar de  $0,5$  a  $30\text{ kV}$ , o feixe percorre a superfície da amostra segundo uma malha retangular gerando o sinal de imagem. A partir dessa

interação, são produzidos elétrons e fótons que podem ser coletados por detectores adequados que os convertem em um sinal de vídeo. Amostras de metal não exigem nenhuma preparação especial, bastando apenas caber na câmara de amostras, entretanto, amostras não condutoras necessitam de uma cobertura de material eletricamente condutivo para que o MEV consiga analisá-la.

### 2.7.3. Componentes

O sistema possui diversos componentes como o canhão de elétrons, sistema de vácuo, o sistema de demagnificação, o detector e a unidade de varredura. A Figura 7 apresenta o esquema de funcionamento do dispositivo.



*Figura 7 - Representação esquemática dos componentes do MEV.*

O canhão de elétrons é responsável por gerar e acelerar os elétrons de forma estável com a intensidade correta para o interior da coluna de modo a produzir um bom sinal. Sua composição

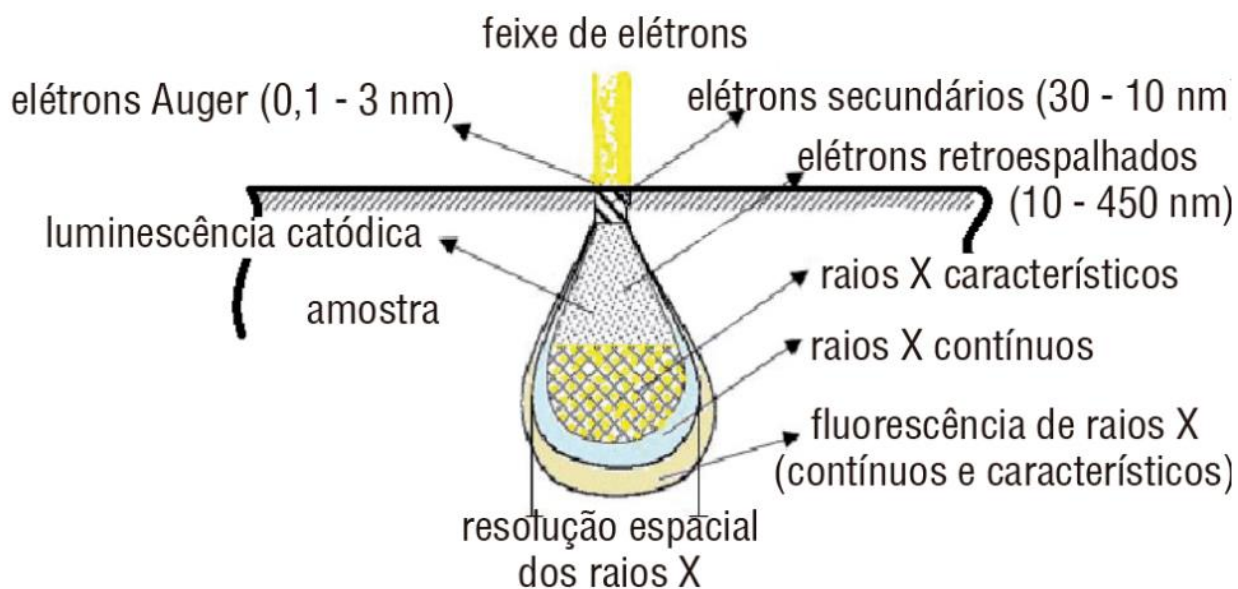
mais comum consiste de três componentes: um filamento de tungstênio servindo como um catodo de aquecimento direto, o cilindro de Wehnelt e o anodo. Juntos eles formam um tríodo capaz de gerar uma fonte estável de elétrons. Aplicando uma alta diferença de potencial entre o filamento e o anodo, elétrons são extraídos da nuvem de elétrons em torno do filamento e acelerados em direção ao anodo. O anodo possui uma abertura que permite que o feixe passe para o outro lado enquanto que o cilindro de Wehnelt, que também está a uma diferença de potencial, agrupa os elétrons para o ponto de foco.

Todo o canhão de elétrons tem que estar sob vácuo, caso contrário, os elétrons iriam colidir com as moléculas de ar e seriam absorvidos. O sistema de vácuo contém bombas mecânicas para gerar e manter seus níveis adequados.

O sistema de demagnificação é composto por lentes condensadoras eletromagnéticas e pela lente objetiva, ambas como objetivo de gerar uma boa imagem em grandes aumentos. As primeiras são usadas para reduzir o diâmetro da fonte de elétrons e para posicionar um pequeno e focalizado feixe de elétrons sobre a amostra. A última possui a função de focar a imagem variando a distância focal do feixe eletrônico ao longo do eixo ótico.

A interação produz fótons e elétrons de diferentes classificações como veremos adiante, e é função do detector coletar o sinal emitido por todos eles e emití-los para a tela de visualização. Os elétrons são atraídos para seu interior por meio de uma voltagem de 200 V da grade coletora localizada na sua frente. Já dentro dele, o elétron é acelerado até 10 kV emitindo fótons que, por meio de pulsos amplificados, formam a imagem na tela de visualização.

#### **2.7.4. Partículas resultantes da interação feixe-amostra.**



*Figura 8 - Resultado das interações do feixe de elétrons com a amostra (Adaptado de Goldstein, 2007).*

Após os elétrons dos feixes atingirem a amostra, diferentes sinais são emitidos por elétrons das várias camadas do átomo da amostra que serão ser liberados ou excitados. Além de fótons, são gerados elétrons primários, elétrons secundários, elétrons de Auger e Raio X como observado na Figura 8.

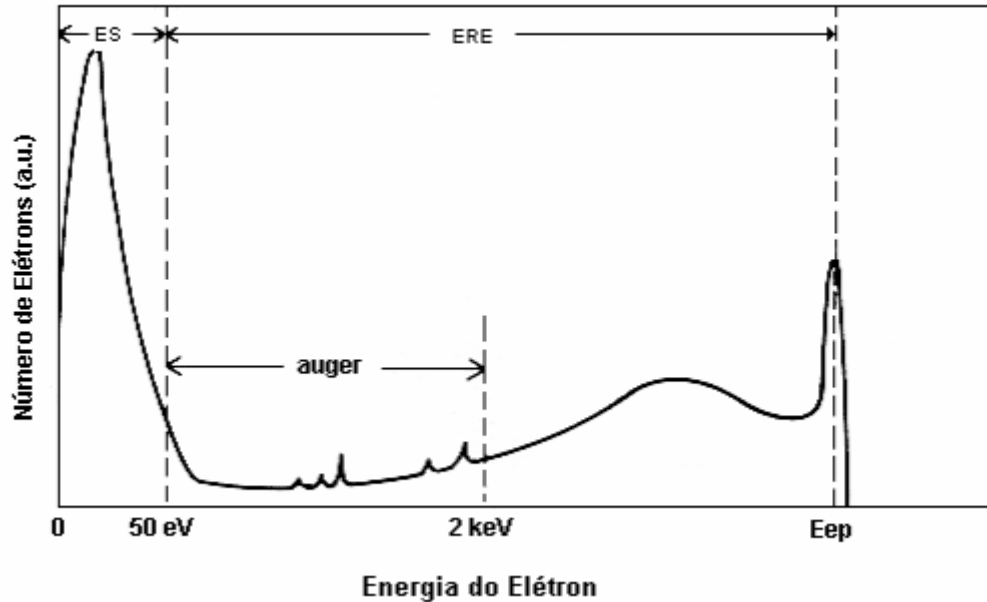
As diferentes classificações são devido a quantidade de energia cinética de cada um. Os elétrons secundários (ES) são resultantes de interações inelásticas, sendo classificados por sua baixa energia (50 eV) e localizados em sua maioria nas camadas externas do átomo pois não requerem muita energia para serem removidos. Dentre todos os sinais que podem ser usados para análise de amostras no MEV, são dos elétrons secundários o sinal mais usado.

As interações elásticas por sua vez resultam nos elétrons retroespalhados (ERE). Sua energia cinética é maior do que as do ES podendo chegar até a energia do elétron primário. Estes elétrons tem energia suficiente para gerar um elétron secundário mesmo já estando fora da amostra. Esse fato

pode ocorrer caso eles atinjam a parede da câmara da amostra ou a parte inferior da coluna por exemplo.

Os elétrons de Auger são elétrons que possuem energia máxima de cerca de (2 keV). Eles levam consigo característica do material pois são resultado da transferência de energia do átomo para um elétron de outra camada sendo um dos meios importantes para se determinar a identidade dos átomos da amostra.

Outra forma de transferência de energia é por meio da captura de elétron de uma camada de energia maior para suprir a vacância da camada de energia menor. A diferença de energia é emitida em forma de Raio-X e, como seu comprimento de onda varia para cada elemento, ele pode ser utilizado para determinar a composição química da amostra.



*Figura 9 - Espectro dos elétrons que deixam a amostra (Meyers, 1982).*

O detector mais utilizado para captar raio-X característico é através da dispersão de energia. Sua única limitação é de não conseguir detectar elementos com número atômico menor que 11. De acordo com o modelo de Rutherford-Bohr do átomo, elétrons orbitam em torno do núcleo ocupando camadas eletrônicas e, quanto maior o número atômico, maior o número de camadas ocupadas. Logo, em elementos com número atômico menor que 11, seus elétrons estão mais próximos do núcleo e a perda por absorção na amostra é maior o que impossibilita a leitura de elementos como oxigênio, carbono e nitrogênio por exemplo.

### 3. Análises, Resultados e Discussão

As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam detalhes do eixo virabrequim fraturado.

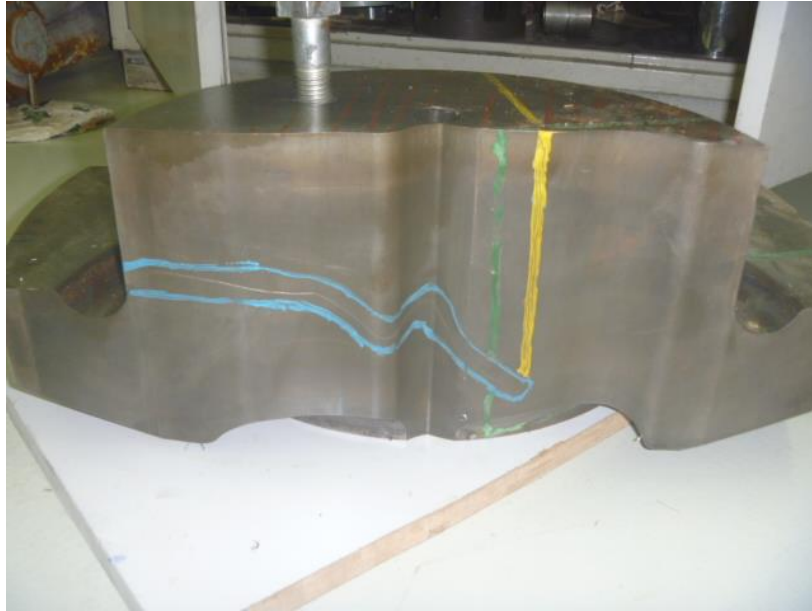


*Figura 10 - Eixo virabrequim fraturado na planta termoeletrica após substituição (fonte:DEMA PUC-Rio).*



*Figura 11 - Detalhe do eixo virabrequim. A região hachurada indica a fratura parcial do eixo após ensaio de ultrassom (fonte:DEMA PUC-Rio).*





*Figura 12 - Detalhe do eixo virabrequim após o corte da região hachurada apresentada na Figura 11 (fonte:DEMA PUC-Rio).*



*Figura 13 - Detalhe do eixo virabrequim após separação das superfícies (fonte:DEMA PUC-Rio).*

Como visto nos conceitos, a Figura 14 indica marcas características de fadiga na superfície fraturada do eixo, revelando que este mecanismo de dano foi responsável pela propagação das trincas que resultaram na falha do componente. É possível notar na superfície de fratura regiões que

estão associadas com a nucleação e propagação de trinca, bem como com a ruptura final do eixo. Como previsto, local da nucleação é na superfície e esse será o local de interesse para iniciar as análises.



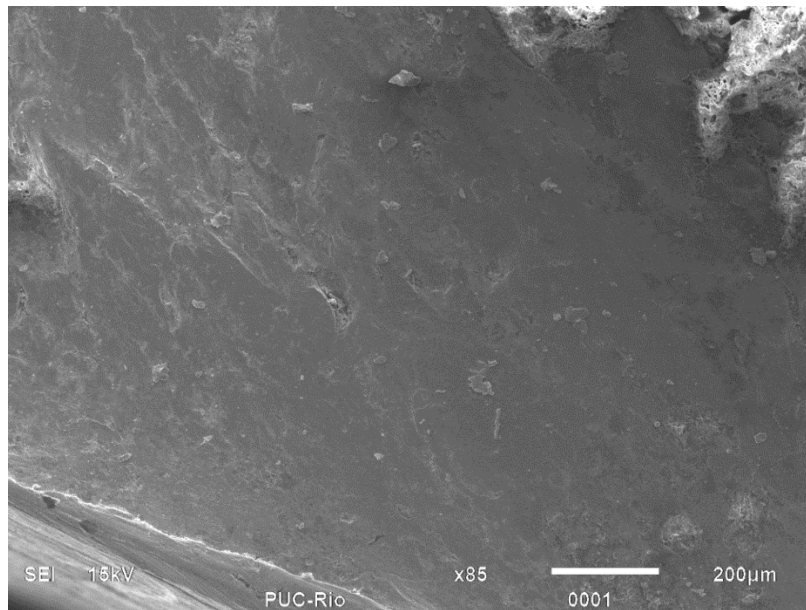
*Figura 14 - Superfície de fratura do eixo virabrequim (fonte:DEMA PUC-Rio).*

Após o corte de amostra (Figura 15) do local presumível de iniciação da trinca, o material foi encaminhado para o MEV para que análises fractográficas da superfície de fratura fossem realizadas com o objetivo de se identificar indícios da causa raiz da falha.

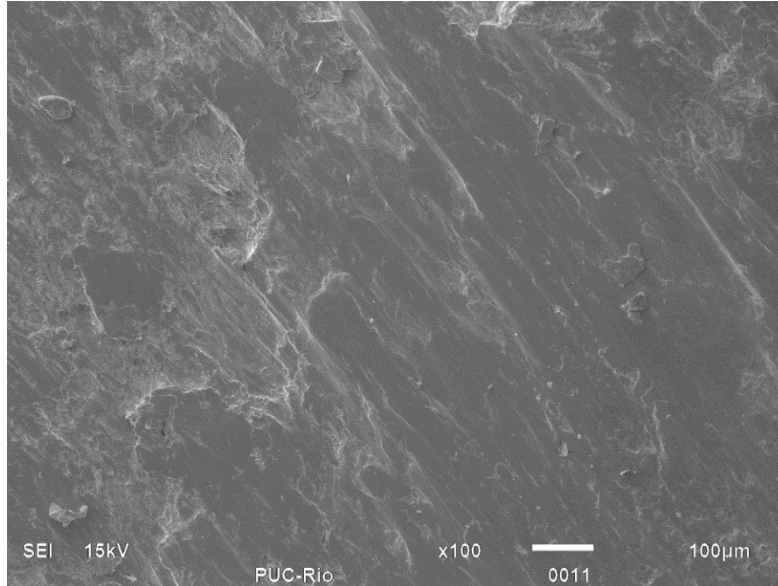


*Figura 15 - Detalhamento da região de interesse na superfície de fratura do eixo virabrequim (fonte: DEMA PUC-Rio).*

As Figuras numeradas de 16 a 20 apresentam imagens obtidas na análise fractográfica da região de interesse,

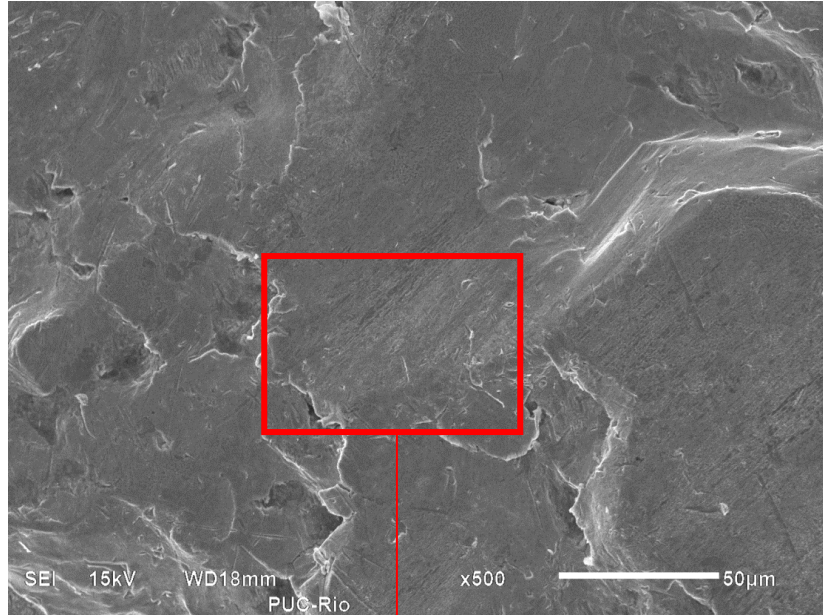


*Figura 16 - Imagem obtida por MEV na região de interesse do eixo fraturado.*

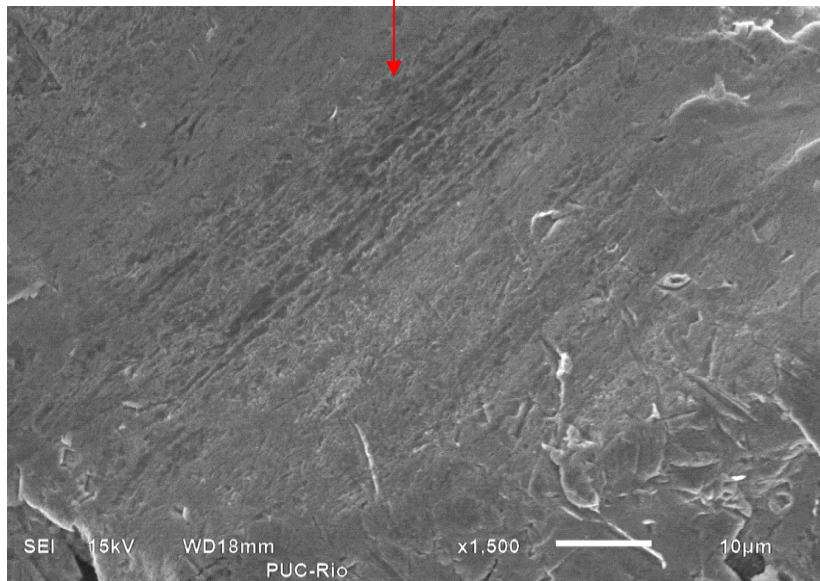


*Figura 17 - Imagem obtida por MEV na região de interesse do eixo fraturado.*

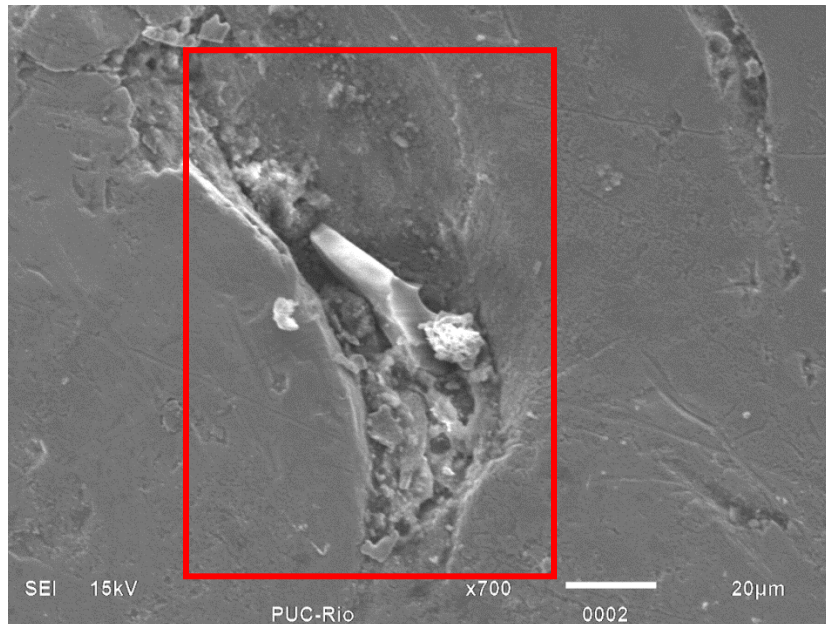




*Figura 18 - Imagem obtida por MEV na região de interesse do eixo fraturado.*

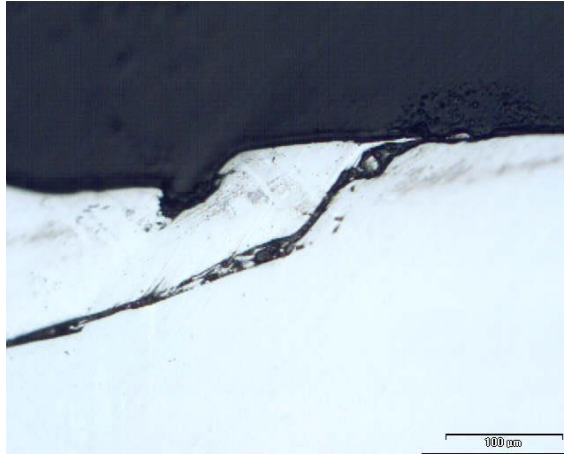


*Figura 19 - Ampliação da área de interesse destacada na Figura 18*

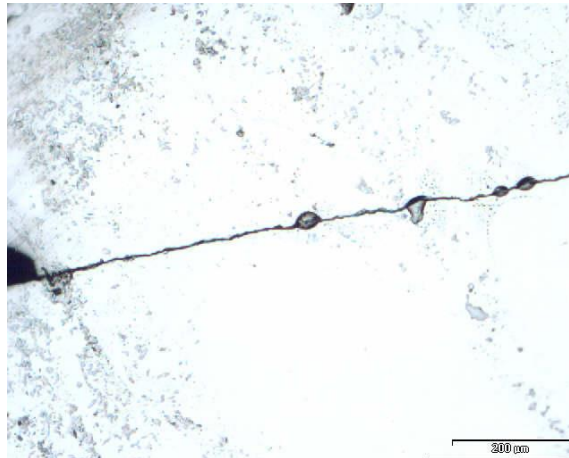


*Figura 20 - Imagem obtida por MEV na região de interesse do eixo fraturado. Indicação de possível presença de inclusão na região da fratura.*

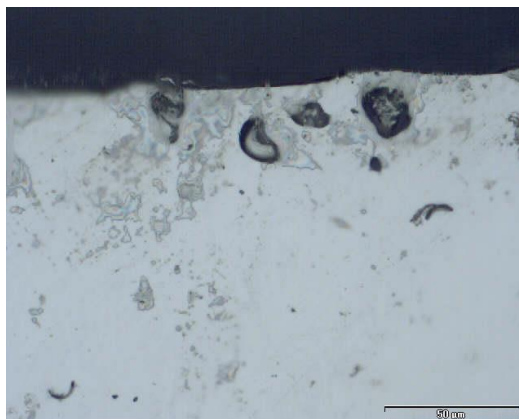
O eixo virabrequim em questão continuou funcionando por curto período de tempo após sua fratura parcial, o que resultou em amassamento (deformação plástica) da superfície de fratura. Tal amassamento não permitiu a determinação de características relevantes da iniciação da fratura. Por outro lado, uma análise metalográfica em região perpendicular àquela de fratura indicou a presença de partículas de segunda fase no material (Figuras 21, 22 e 23).



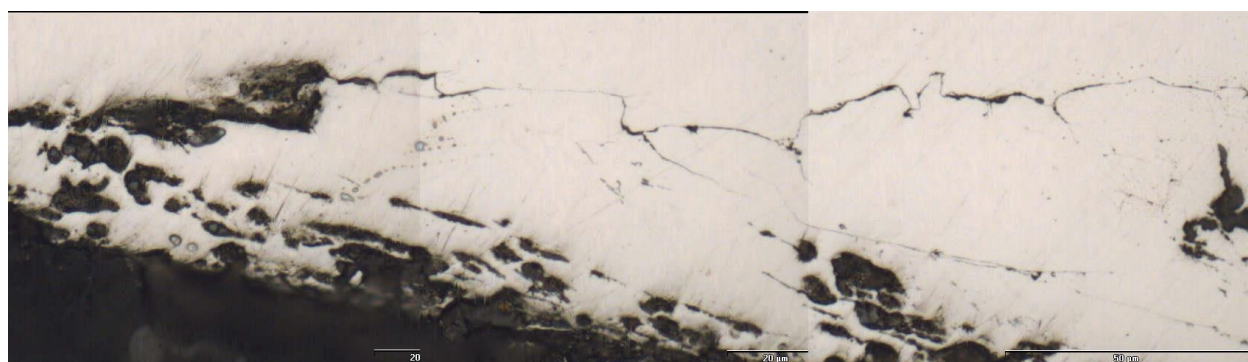
*Figura 21- Presença de partículas de segunda fase em região adjacente àquela de fratura.*



*Figura 22 - Presença de partículas de segunda fase em região adjacente àquela de fratura.*



*Figura 23 - Presença de partículas de segunda fase em região adjacente àquela de fratura.*



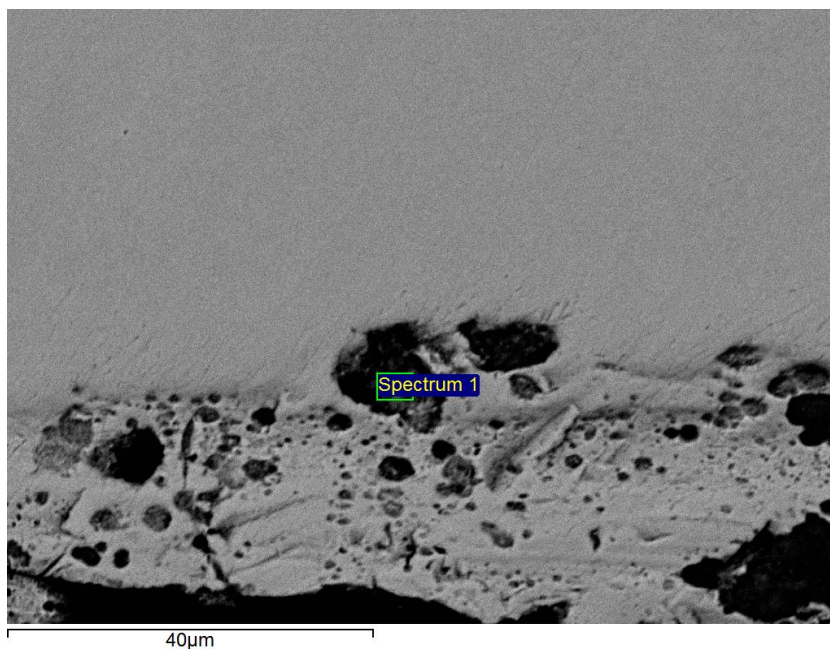
*Figura 24 - Região junto à superfície de fratura do eixo virabrequim.*

Nas Figuras 21 e 22, com escalas de 100  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$  respectivamente, pode-se notar partículas de segunda fase no caminho da trinca, indicando que elas tenham facilitado sua propagação.

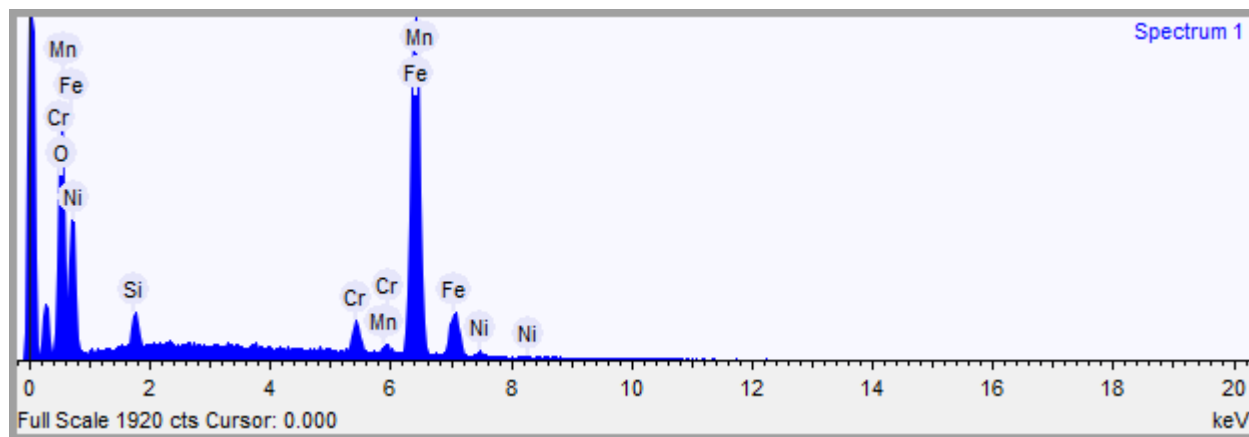
Nas Figuras 23 e 24 podemos observar inclusões junto à superfície de fratura.

Foi então realizado microanálises pontuais por energia dispersiva de raio-X (EDS) através do MEV, com o objetivo de determinar a composição química de inclusões encontradas junto às superfícies de fratura (Figura 25).





*Figura 25 - Partícula (Spectrum1) a ser examinada por EDS*



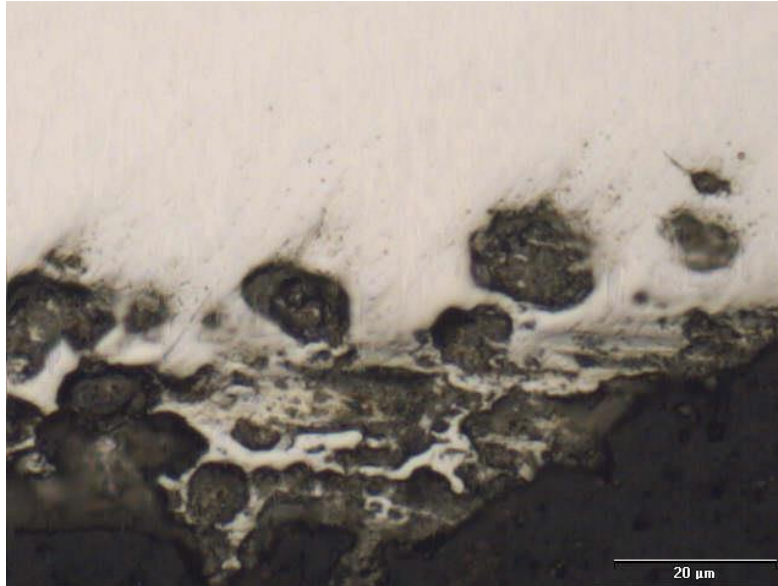
*Figura 26 - Resultado obtido da análise do Spectrum 1.*

A Figura 26 indica qualitativamente sua composição química característica. A determinação quantitativa se encontra apresentada na Tabela 2.

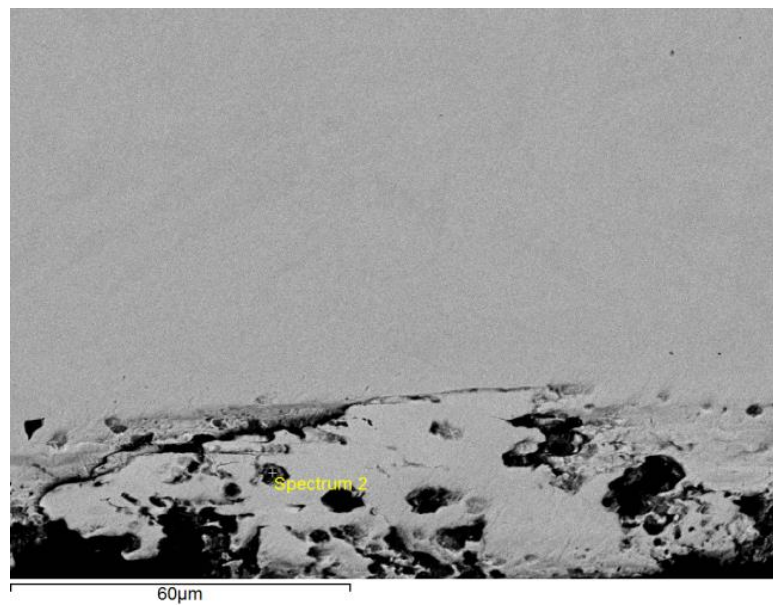
*Tabela 2 - Composição química do Spectrum 1.*

Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Oxygen	18.570	0.403	43.785
Silicon	1.630	0.095	2.189
Chromium	3.357	0.164	2.435
Manganese	1.045	0.183	0.718
Iron	73.677	0.480	49.767
Nickel	1.721	0.278	1.106

A análise por EDS mostrou a presença de elementos como ferro, níquel, cromo, molibdênio, manganês, oxigênio e silício. Dentre eles destaca-se o silício e o oxigênio pois, apesar de poder estar presente no aço DIN 34CrNiMo6, a porcentagem máxima permitida do silício seria de 0.4% como visto na Tabela 1 (página 8) e não de 1.63% como mostrado. Sua combinação com o oxigênio forma os silicatos que são indesejáveis por reduzirem a resistência à fadiga do material.



*Figura 27- Outra região de análise no material.*



*Figura 28 - Partícula (Spectrum2) a ser examinada por EDS.*

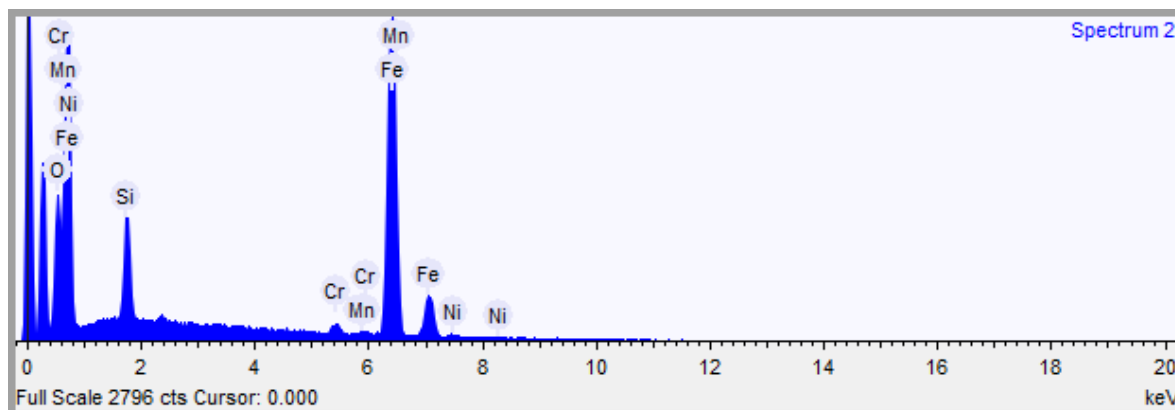


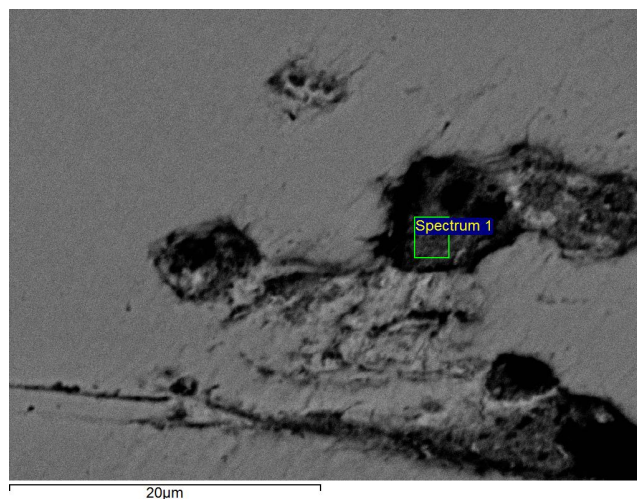
Figura 29 - Resultado obtido da análise do Spectrum 2, indicando qualitativamente sua composição química característica.

Tabela 3- Composição química quantitativa do Spectrum 2.

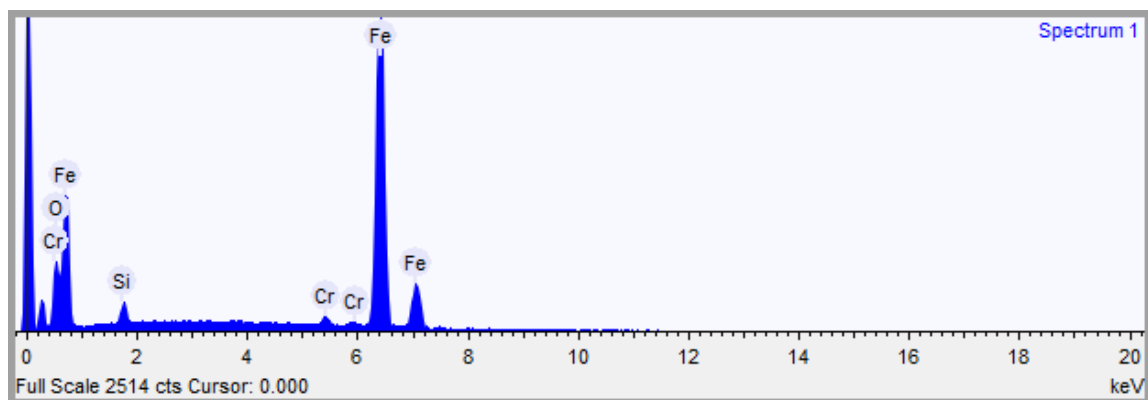
Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Oxygen	11.609	0.405	30.101
Silicon	5.722	0.133	8.452
Chromium	1.301	0.119	1.038
Manganese	0.619	0.150	0.467
Iron	79.655	0.467	59.169
Nickel	1.094	0.251	0.773

Novamente o silício está com valor acima da porcentagem máxima do aço 34CrNiMo6, desta vez seu percentual é 5.722% (bem acima dos 0.4% permitidos).

A seguir, se apresenta outros pontos de análise:



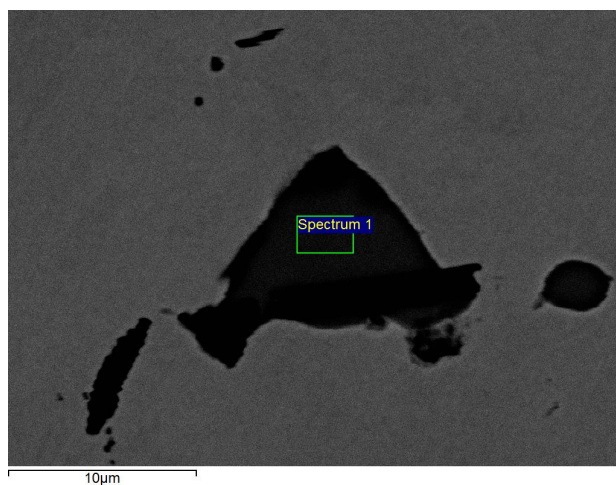
*Figura 30 - Outro Spectrum1 a ser examinado por EDS.*



*Figura 31 - Resultado obtido da análise do novo Spectrum 1 apresentado na Figura 30, indicando qualitativamente sua composição química característica.*

*Tabela 4- Composição química quantitativa do novo Spectrum 1 (Figura 30):*

Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Oxygen	6.499	0.339	19.299
Silicon	1.285	0.088	2.173
Chromium	1.250	0.130	1.142
Iron	90.966	0.363	77.386



*Figura 32- Novamente, mais um Spectrum 1 foi examinado por EDS.*

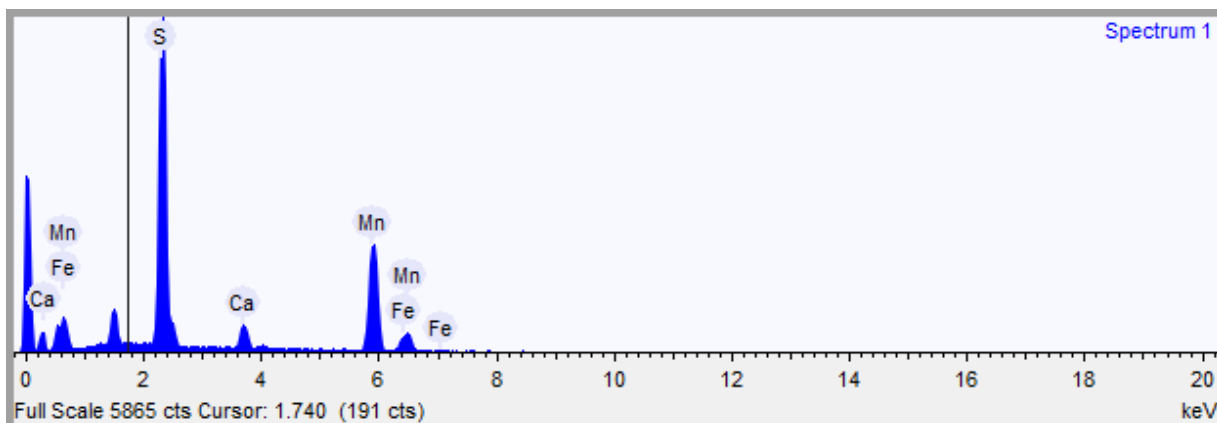


Figura 33 - Resultado obtido da análise de mais um Spectrum 1 (Figura 32), indicando qualitativamente sua composição química característica.

Tabela 5- Composição química do Spectrum 1 da Figura 31.

Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Sulfur	37.642	0.287	50.223
Calcium	4.445	0.124	4.745
Manganese	52.816	0.333	41.128
Iron	5.097	0.294	3.905

Neste outro ponto observamos a presença de enxofre e manganês. Os dois combinados formam o sulfeto de manganês que, embora melhorem a usinabilidade do material, podem prejudica-lo devido a sua baixa capacidade de deformação e por deixa-lo mais suscetível a corrosão.

Segundo Hahne (1998), a presença de inclusões no aço pode ser desejável ou indesejável dependendo das propriedades requeridas ao produto final. As inclusões não metálicas são impurezas

presentes nos aços retidas durante o processo de solidificação que influenciam suas propriedades conforme a quantidade, o tamanho, a morfologia e composição química.

O silício encontrado tem como principal função ser um agente desoxidante, impedindo a formação de bolhas no processo de oxidação do aço. Entretanto, em quantidades acima das aceitáveis (0,4% para o aço DIN 34CrNiMo6), e combinado com o oxigênio, pode vir a formar inclusões de silicatos que apresentam, nas extremidades, arestas vivas e, conseqüentemente, atuam como concentradores de tensão. A mesma observação pode ser feita com os sulfetos de manganês. Além disso, esses precipitados são pontos com baixa taxa de deformação, o que os torna pontos favoráveis para a iniciação das trincas. Como são frágeis, irão romper no início da deformação plástica da peça, gerando microcavidades que facilitará a propagação da trinca. As análises das Figuras 21 e 22 indicam que de fato as partículas de segunda fase podem ter sido responsáveis pela iniciação da trinca de fadiga.

Para redução de partículas de segunda fase no material, deve-se aumentar os cuidados operacionais durante o processo de fabricação. É nele que são formadas as inclusões e, embora técnicas que evitam condições favoráveis a formação de inclusões já estão sendo aplicadas, ainda há muito o que melhorar uma vez que as elas continuam bastante presentes.

Evidentemente, essas técnicas acrescentariam um alto custo à produção do aço. Entretanto, a garantia do aumento da vida útil da peça além de reduzir as chances de acidentes, provavelmente reduziria o custo final se contabilizado o prejuízo com o tempo parado do equipamento e compras de novas peças para reposição.



## 4. Conclusões

Com base nas imagens macroscópicas e microscópicas apresentadas anteriormente com suas respectivas análises, é possível tirar algumas conclusões:

1. Marcas de praias na superfície de fratura do eixo evidenciam que o eixo virabrequim falhou por fadiga;
2. Após a falha, o eixo continuou a operar por curto período de tempo, o que promoveu o amassamento das superfícies de fratura;
3. As análises metalográficas indicaram a presença de partículas de segunda fase em regiões adjacentes às superfícies de fratura;
4. A análise por EDS indicou a presença de silicatos e sulfetos de manganês no material.
5. Possivelmente, estas partículas de segunda fase foram responsáveis um efeito prejudicial à resistência à fadiga aço.

## **5. Sugestão para trabalhos futuros**

Neste trabalho, todas as imagens obtidas e análises feitas foram sobre a região de fratura do material, que evidenciou a presença de partículas de segunda fase nesta região. Análises de regiões distante da área de fratura podem ser realizadas com o objetivo de comprovar ou não a existência das inclusões em todo o material. Com base nessa nova informação, seria possível comprovar se as inclusões estariam localizadas em regiões específicas do componente que apresentam as maiores solicitações mecânicas.

## **6. Referências Bibliográficas**

- 1. BEACHEM, CD. TRANSACTIONS ASM, v.60, p.324-343, 1967**
- 2. BOZZOLA JJ, RUSSEL LD. ELECTRON MICROSCOPY: PRINCIPLES AND TECHNIQUES FOR BIOLOGISTS. 2ª ED. SUDBURY: MA JONES AND BARTLETT, 1999**
- 3. BRANCO, C.M., FERNANDES, A.A., CASTRO, P.M.S.T., 1986, FADIGA DE ESTRUTURAS SOLDADAS. 1 ED. LISBOA, FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN.**
- 4. BRANDÃO P. R. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV: NOTAS DE AULA DA DISCIPLINA MÉTODOS DE INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE. BELO HORIZONTE, 2012**
- 5. BUDINSKI, KG; ENGINEERING MATERIALS, 7TH ED., PRENTICE HALL 2002**
- 6. CASTRO, J.T.P. ; MEGGIOLARO M.A. MEGGIOLARO, FADIGA: TÉCNICAS E PRÁTICAS DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL SOB CARGAS REAIS DE SERVIÇO VOLUME I E VOLUME II, 1ª EDIÇÃO, 2009.**
- 7. GOLDSTEIN J.I.; NEWBURY D. E.; ECHIL P; JOY DC; ROMIG JR AD; LYMAN CE; FIORI C; LIFSHIN E. SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AND X-RAY MICROANALYSIS, 3TH ED., NEW YORK: PLENUM PRESS; 2007.**
- 8. HAHNE, C., OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESOXIDAÇÃO DO AÇO E TRATAMENTO DE INCLUSÕES COM CÁLCIO PARA FUNDIÇÃO NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO, 1998**
- 9. KESTENBAC, H.J.; BOTA FILHO W.J. MICROSCOPIA ELETRÔNICA TRANSMISSÃO E VARREDURA. SÃO PAULO: ABM, 1994**
- 10. LUKÁŠ, P., “FATIGUE CRACK NUCLEATION AND MICROSTRUCTURE”, IN: FATIGUE AND FRACTURE, VOL. 19, METALS HANDBOOK, ASM INTERNATIONAL, P. 96 – 109, 1996.**

**11. MEYERS, M. A., CHAWLA, K. K., PRINCÍPIOS DE METALURGIA MECÂNICA, 1ª EDIÇÃO,  
SÃO PAULO, EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA, 1982**