

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DE CASO: Análise de falha prematura de um eixo  
de pinhão com aplicação em redutores de turbina eólica**

**MARIANA GOMES DE ALMEIDA**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2024**

# **ESTUDO DE CASO: Análise de falha prematura de um eixo de pinhão com aplicação em redutores de turbina eólica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Guilherme Zepon

São Carlos-SP  
2024



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Mariana Gomes de Almeida

**RA:** 761818

**TÍTULO:** Estudo de caso: Análise de falha prematura de um eixo de pinhão com aplicação em redutores de turbina eólica

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Guilherme Zepon

**DATA/HORÁRIO:** 02/09/2024, 9h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Guilherme Zepon	8	10
Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini	8	10
<b>Média</b>	8	10

### BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Guilherme Zepon

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GUILHERME ZEPON  
Data: 02/09/2024 16:09:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CLAUDEMIRO BOLFARINI  
Data: 02/09/2024 23:48:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, e a minha família, que foram meus maiores incentivadores durante a graduação.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a empresa parceira por me doarem um pinhão, e possibilitar que eu me aprofundasse em um tema que tinha muita curiosidade em estudar. Agradeço a Villares Metals por dar todo o suporte para eu realizar as análises necessárias, assim como ao time da Assessoria Técnica da empresa que me deram todo suporte técnico durante a interpretação dos resultados, e por fim agradeço ao professor Guilherme Zepon, que desde o início da ideia me incentivou, apoiou e instruiu durante o período de desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

A análise de falhas em aços é composta por diversas etapas, nas quais são envolvidas distintas análises. Neste trabalho é apresentado uma análise de falha completa de um pinhão, confeccionado em aço 18CrNiMo7-6, cuja aplicação é em redutores eólicos, que apresentou trinca após o processo de tratamento térmico. No estudo pode-se visualizar alguns pontos de melhoria no processo para se evitar a nucleação e propagação da trinca, da forma como ocorreu. Para isso, realizou-se análises via estereoscopia, microscopia óptica, dureza Vickers, microscopia eletrônica de varredura e difração de raio-x. Os resultados mostraram que o processo de cementação a gás utilizado na ferramenta causou oxidação intergranular no furo de centro, o que acarretou uma fragilização na região. Por fim, visualizou-se que seria ideal proteger a área de encaixe da ferramenta durante o processo de cementação, cementando apenas sua área de trabalho.

**Palavras-chave:** Análise de falhas. Cementação. Metalografia.

## **ABSTRACT**

Failure analysis in steels consists of several stages, in which different analyses are involved. This paper presents a complete failure analysis of a pinion made of 18CrNiMo7-6 steel, whose application is in wind turbines, which presented cracks after the heat treatment process. The study shows some points of improvement in the process to avoid crack nucleation and propagation, as it occurred. For this purpose, analyses were performed via stereoscopy, optical microscopy, Vickers hardness, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The results showed that the gas carburizing process used in the tool caused intergranular oxidation in the center hole, which led to embrittlement in the region. Finally, it was seen that it would be ideal to protect the tool fitting area during the carburizing process, carburizing only its working area.

Keyword: Failures analysis. Carburizing. Metallography.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma com a rota de processamento da ferramenta.	01
Figura 2 - Ferramenta trincada.	02
Figura 3 - Camada cementada objetivada para o pinhão.	02
Figura 4 - Microestruturas do aço 18CrNiMo7-6 atacadas com nital 3%.	04
Figura 5 - Microestruturas para diferentes temperaturas de forjamento.	05
Figura 6 - Microestrutura do aço 18CrNiMo7-6 para diferentes temperaturas e taxas de deformação.	06
Figura 7 - Microestruturas obtidas em estudos do aço N6587.	07
Figura 8 - Morfologia da fratura encontrada após ensaio de fadiga.	09
Figura 9 - (a) Imagem visual da ferramenta; (b) Imagem da estereografia realizada na ferramenta.	09
Figura 10 - Mecanismo de formação das trincas de têmpera.	10
Figura 11 - Imagens de trincas por têmpera.	10
Figura 12 - Pinhão analisado no artigo.	11
Figura 13 - (a) Ferramenta analisada; (b) Oxidação intergranular encontrada na superfície da ferramenta.	11
Figura 14 - Área analisada.	13
Figura 15 - Análise macrográfica da fratura da ferramenta.	14
Figura 16 - Fotos tiradas, com o estereomicroscópio, da fratura do pinhão.	15
Figura 17 - Fotos tiradas com o estereomicroscópio da rosca do furo de centro.	15
Figura 18 - Microestrutura da ferramenta. Com aumento de (a) 50x, (b) 100x, (c) 200x, (d) 500x e (e) 1000x.	16
Figura 19 - Análise da fratura da ferramenta. (a) Imagem das regiões analisadas; (b) Imagem da superfície de fratura do material, sem ataque químico, com 50x de aumento; (c) Imagem da superfície de fratura do material, com ataque químico, com 50x e 200x de aumento respectivamente; (d) Mosaico da fratura da amostra 1, com 50x de aumento.	18
Figura 20 - Mosaico com 200x de aumento da região da rosca do furo de centro do	

pinhão. (a) Sem ataque químico e (b) Atacada quimicamente com Nital 4%.	19
Figura 21 - Microestrutura da região da rosca do furo de centro do pinhão, com aumento de (a), (b), (c) e (d) 200x, e (e) e (f) 500x.	20
Figura 22 - Análise de WDS realizada na amostra (Weight%), em 5 regiões.	21
Figura 23 - (a) Mosaico com 50x de aumento da região dos dentes externos; (b) Mosaico com 50x de aumento da região dos dentes da furação interna presente na ferramenta.	23
Figura 24 - (a) Curva dos perfis de dureza; (b) e (c) Dados coletados no ensaio de perfil de dureza; (d) Curva CHD da engrenagem externa do pinhão.	24

## LISTA DE TABELAS

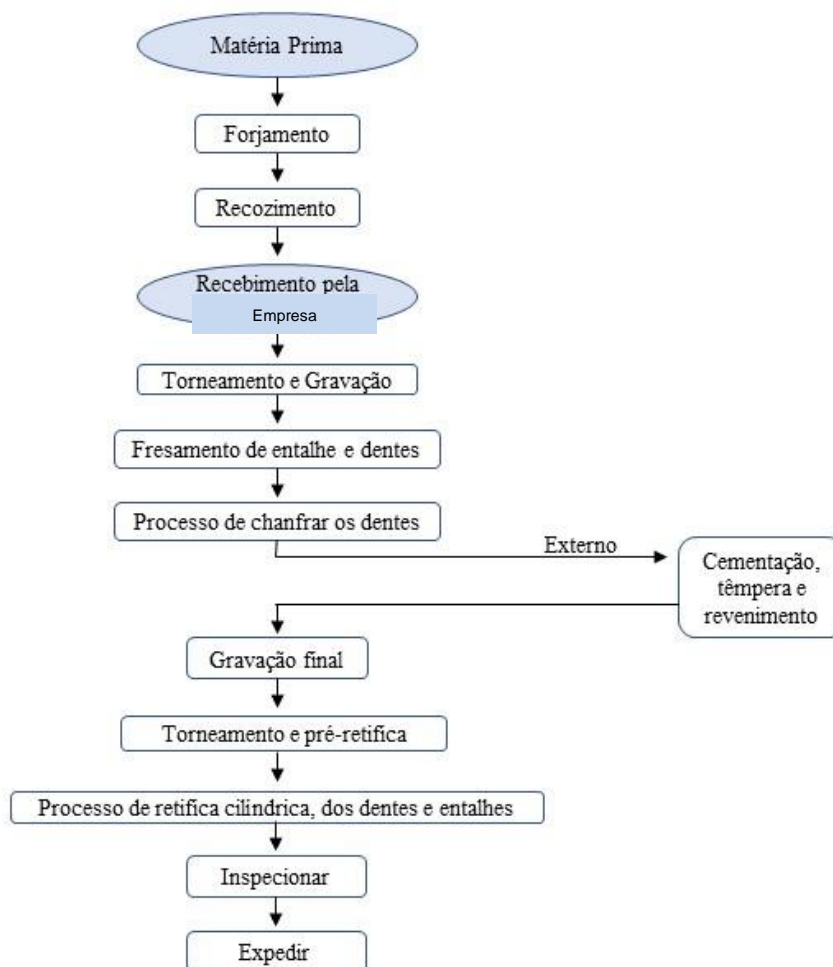
Tabela 1 - Composição química teórica do aço 18CrNiMo7-6.	03
Tabela 2 - Composição química do aço 18CrNiMo7-6 com adição de nióbio (Nb)	04
Tabela 3 - Composição química do aço 18CrNiMo7-6.	08
Tabela 4 - Composição química encontrada na amostra analisada.	14

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>03</b>
2.1	AÇO DIN 18CrNiMo7-6	03
<b>2.1.1</b>	<b>Composição Química Teórica</b>	<b>03</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Microestrutura Teórica</b>	<b>03</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Mecanismo de Falha</b>	<b>08</b>
2.1.3.1	Trinca por Têmpera	09
2.1.3.2	Oxidação Intergranular	11
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>14</b>
4.1	ANÁLISE QUÍMICA	14
4.2	MACROGRAFIA	14
4.3	ESTEREOGRAFIA	14
4.4	METALOGRAFIA	16
<b>4.4.1</b>	<b>Análise da Microestrutura</b>	<b>16</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Análise da Fratura</b>	<b>17</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Análise do Furo de Centro</b>	<b>19</b>
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	20
4.6	DIFRAÇÃO DE RAIO-X	22
4.7	ANÁLISE DA CAMADA CEMENTADA	22
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO GERAL</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>28</b>
	<b>APÊNDICE A – Medidas dos dentes da engrenagem externa</b>	<b>30</b>

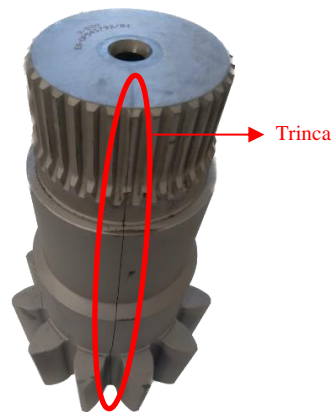
## 1 INTRODUÇÃO

A empresa parceira é uma companhia que está há mais de 60 anos desenvolvendo produtos e prestando serviços de usinagem com alto padrão de qualidade. Ela consolida-se como uma das principais empresas de produção de engrenagens e peças para os setores agrícola, aeroespacial, eólico, redutores de velocidade, máquinas e equipamentos em geral. Dentre seus produtos, há o eixo de pinhão com aplicação em redutores de turbina eólica, produzida com o aço DIN 18CrNiMo7-6, com altura de 385 mm e maior diâmetro de 220 mm, cujo a rota de fabricação podemos ver na Figura 1.



**Figura 1:** Fluxograma com a rota de processamento da ferramenta. Informações ofertadas pela empresa parceira.

Eles começaram a notar que após o processo de cementação, têmpera e revenimento o lote de ferramenta tratada termicamente vinha com uma ou mais peças apresentando uma trinca no sentido axial, de uma extremidade a outra do material, como pode-se observar na Figura 2.

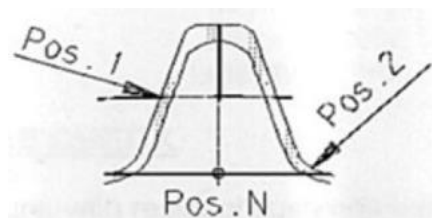


**Figura 2:** Ferramenta trincada. Informações ofertadas pela empresa parceira.

A rota de tratamento térmico utilizada, se resume as seguintes etapas:

- (i) Cementação a gás: 44 a 48 horas;
- (ii) Temperatura: 650 °C (pré) – 930 °C (cementação) – 870 °C (Têmpera);
- (iii) Potencial de carbono: em torno de 1 %p.;
- (iv) Têmpera em óleo;
- (v) Temperatura da piscina em torno de 70 °C na entrada dos pinhões;
- (vi) Tempo para entrada na piscina: +/- 1 minuto;
- (vii) Tempo de difusão: 20 horas;
- (viii) Revenimento: 180 a 200° C, +/- 1 hora por polegada;

A cementação objetivada pela empresa pede uma dureza superficial de 58-60 HRC, uma dureza de núcleo de no mínimo 25 HRC e uma camada efetiva de 2,35 a 2,75mm, como apresenta a Figura 3.



**Figura 3:** Camada cementada objetivada para o pinhão. Informações ofertadas pela empresa parceira.

Ao saber do problema que estava acontecendo com o pinhão em questão, despertou a curiosidade da aluna e, como apoio do orientador, foi proposto para a empresa a realização de uma análise de falha da ferramenta referenciada, para entender a causa da trinca. Como contrapartida, utilizarei dos resultados encontrados nesse estudo de caso para elaboração de meu trabalho de conclusão de curso.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aço DIN 18CrNiMo7-6

O aço 18CrNiMo7-6 tem vantagens de alta temperabilidade, boa tenacidade e alta resistência. É comumente utilizado quando se deseja obter um enriquecimento superficial de carbono, uma vez que esse aço atinge alta dureza superficial após cementação e mantém seu núcleo tenaz. Suas principais aplicações são em engrenagens de maiores dimensões, eixos pinhão para redutores, eixos de moedor e virabrequins de motor de combustão interna. Suas designações semelhantes são: 1.6587, AISI 4820, DIN 17CrNiMo6, 18CND6, EM ISO 683-17. [1, 2 ,3]

#### 2.1.1 Composição química teórica

Através do catálogo de metais da GERDAU foi possível coletar qual seria a composição química teórica do material, como podemos observar na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição química teórica do aço 18CrNiMo7-6. [4]

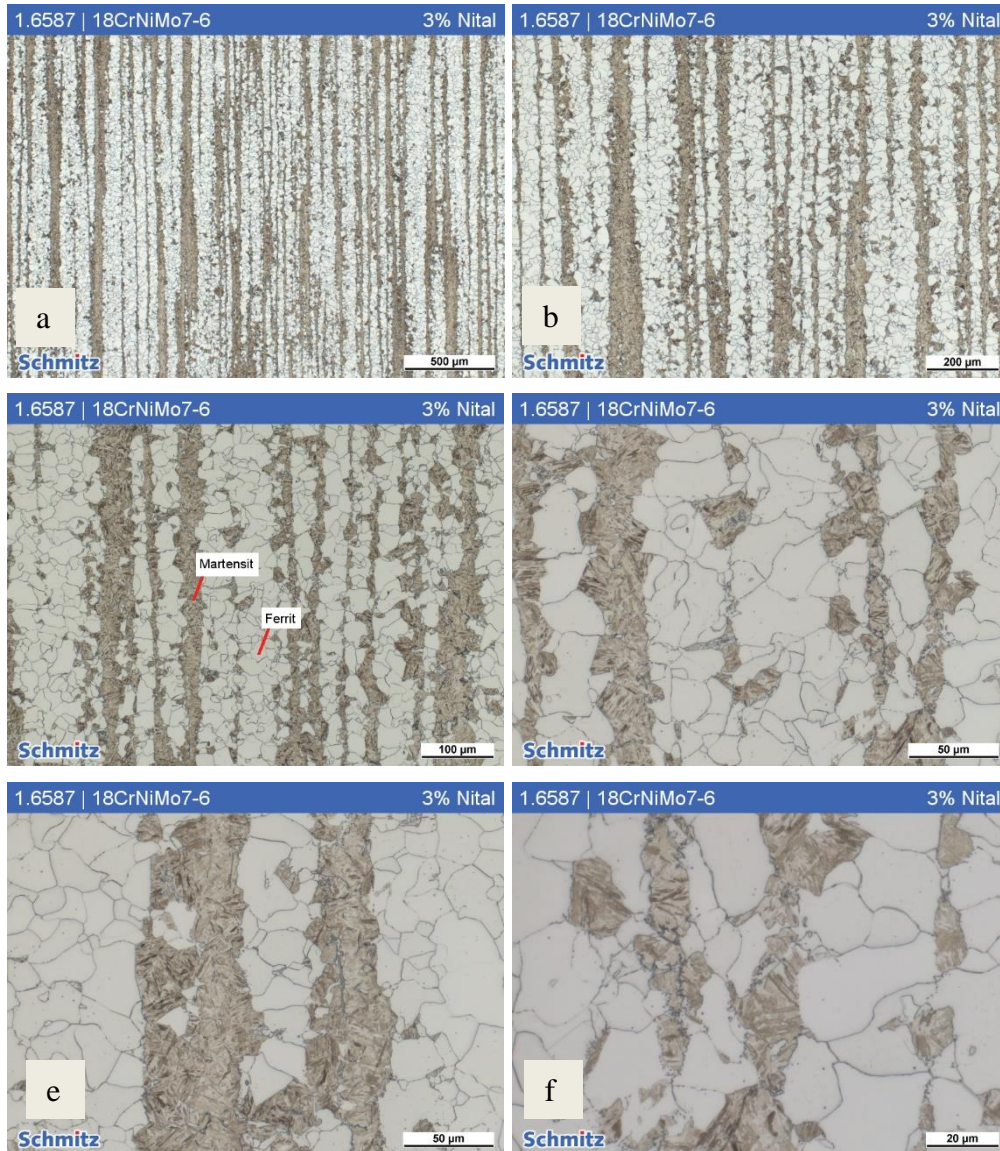
-	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P Máx.</i>	<i>S Máx.</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>
<b>18CrNiMo7-6</b>	0,15/0,21	<0,4	0,5/0,9	0,035	0,035	1,5/1,8	0,25/0,35	1,4/1,7

#### 2.1.2 Microestrutura teórica

A fim de se coletar embasamento teórico, para futuras comparações entre microestruturas encontrada e teórica, foram realizadas algumas pesquisas e coletadas algumas informações. A base de dados Schmitz [5] forneceu as microestruturas do aço 18CrNiMo7-6 cementado, atacado com nital 3 %, apresentado na Figura 4. A fase mais escura é a martensita e a mais clara é a ferrita.

P. Springer, U. Prah [6] estudaram o efeito do nióbio nas características de recristalização do aço 18CrNiMo7-6 quando passados no processo de forjamento a quente. Nos estudos eles utilizaram um aço 18CrNiMo7-6 como referência cujo a composição química pode ser vista na Tabela 2. No decorrer de suas análises, eles verificaram o processo de recristalização do aço referência para diferentes temperaturas com uma deformação de  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , como pode-se verificar na Figura 5, a imagem mostra recristalização parcial, completa ou nenhuma recristalização da austenita dependendo da temperatura. Vale ressaltar que é possível analisar a

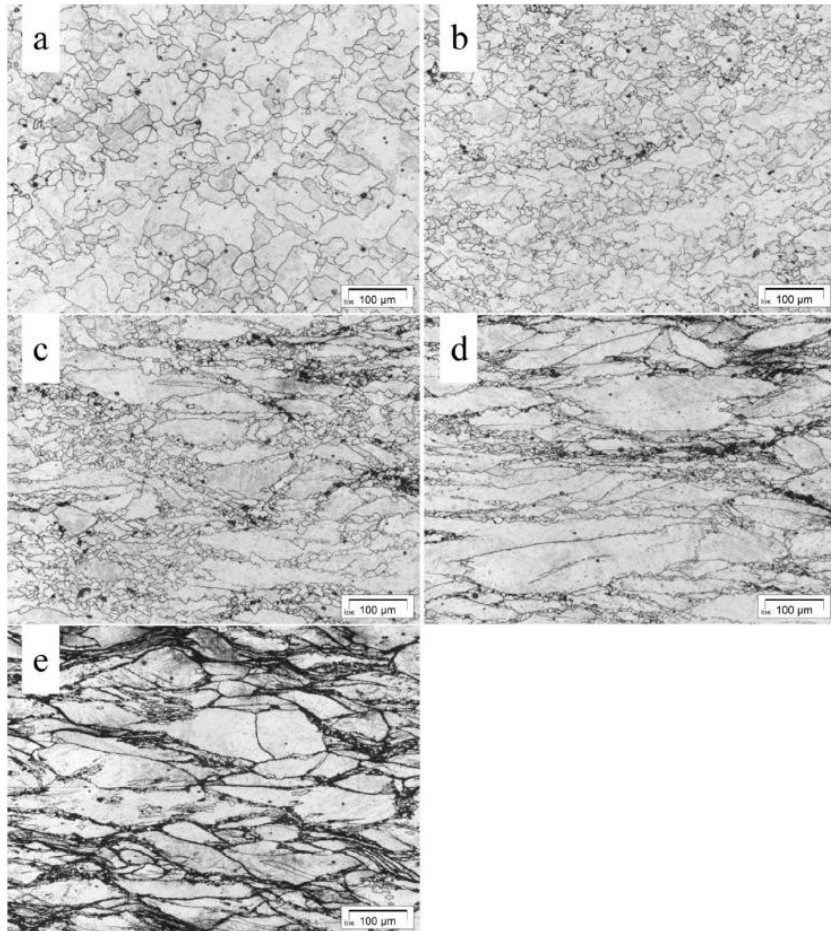
recristalização pelo tamanho de grão observado, sabendo, assim, que as microestruturas apresentadas nas Figuras 5 a e b estão totalmente recristalizadas, as apresentadas nas Figuras 5 c e d estão parcialmente recristalizadas e aquela da figura 5e está sem nenhuma recristalização.



**Figura 4:** Microestruturas do aço 18CrNiMo7-6 atacadas com nital 3%. [29]

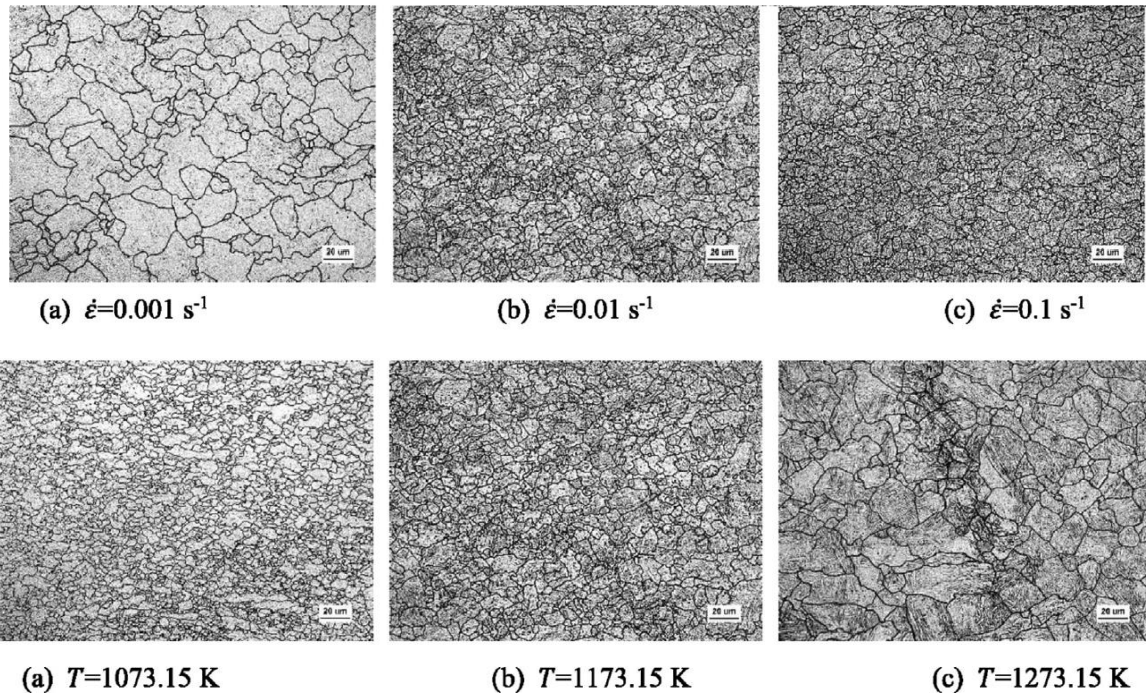
**Tabela 2:** Composição química do aço 18CrNiMo7-6 com adição de nióbio (Nb). [30]

	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Al	N	Nb
+Nb	0.17	0.20	0.54	0.009	1.64	0.32	1.56	0.029	0.012	0.031
ref.	0.16	0.22	0.56	0.010	1.64	0.31	1.54	0.03	0.012	0.005



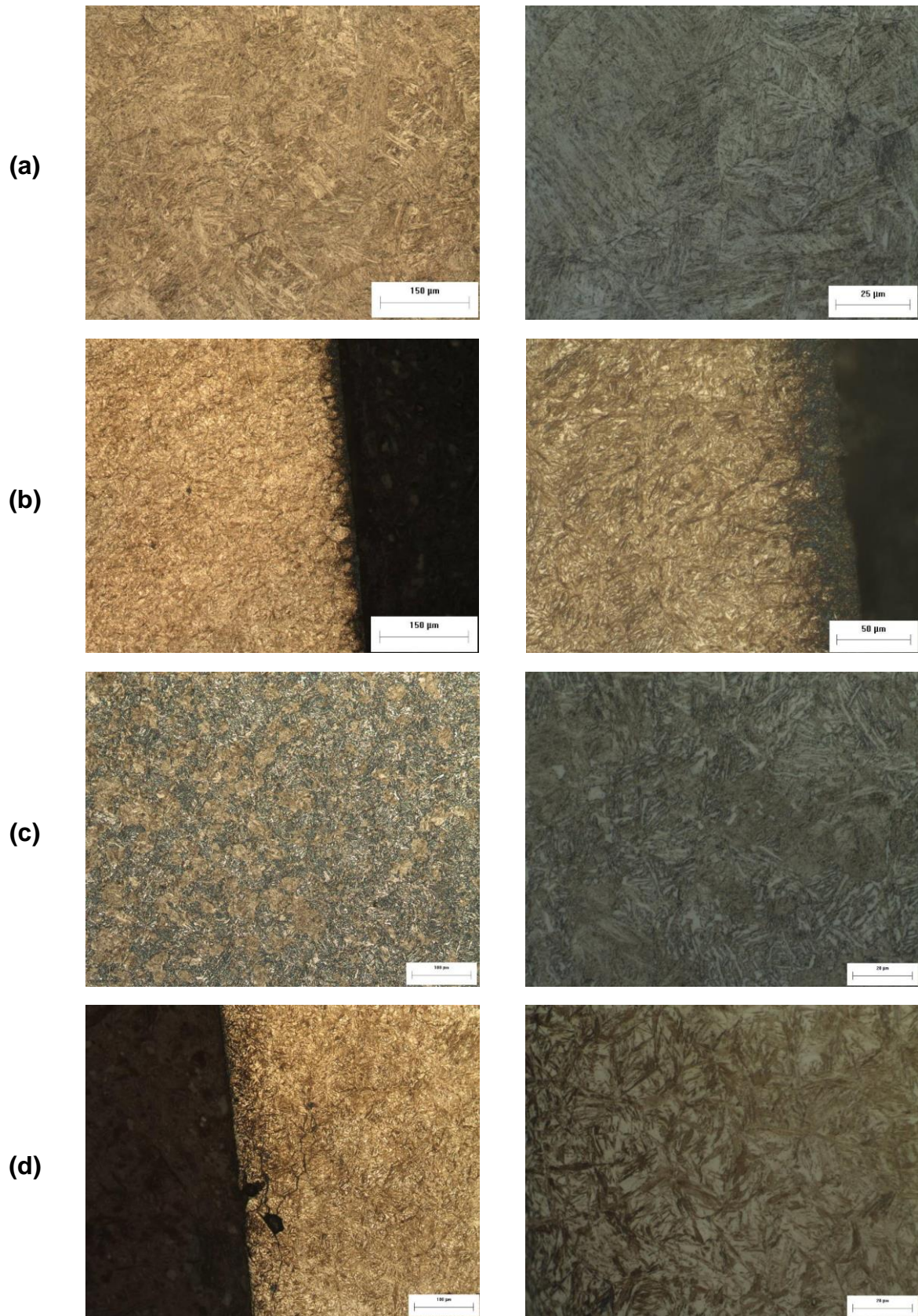
**Figura 5:** Microestruturas para diferentes temperaturas de forjamento. [6]

Runze Cao et al. [3] utilizou corpos de prova cilíndricos de aço 18CrNiMo7-6 diâmetro de 8 mm e altura de 12 mm, para analisar o seu processo de recristalização, para isso foi realizado testes de compressão isotérmica na máquina de simulação térmica Gleeble-3500. A compressão do corpo de prova na direção da altura é de 60%. As amostras foram primeiro aquecidas da temperatura ambiente até a temperatura de deformação a uma taxa de 10 K/s, e então mantida por 180 segundos para eliminar o gradiente de temperatura. A têmpera com água foi realizada rapidamente após o teste de compressão isotérmica para preservar a microestrutura. Depois desse processo eles realizaram a preparação da amostras e coletaram imagens que podemos ver na Figura 6, com elas observa-se que o tamanho de grão aumenta com o aumento da temperatura de deformação, ou, com a diminuição da taxa de deformação.



**Figura 6:** Microestrutura do aço 18CrNiMo7-6 para diferentes temperaturas e taxas de deformação. [3]

No arquivo da Villares Metals há registros de estudos do aço N6587, aço VM5A que corresponde a norma DIN 18CrNiMo7-6. A Figura 7a apresenta a microestrutura padrão na condição temperada e revenida para o aço N6587, na qual é composta de uma matriz de martensita revenida. A Figura 7b apresenta uma microestrutura representativa de cementação do aço N6587. A Figura 7c apresenta uma microestrutura não adequada para aço N6587 na condição temperada e revenida, composta de uma matriz de martensita revenida, bainita e ferrita. A Figura 7d apresenta uma microestrutura representativa de cementação não adequada do aço N6587, a camada cementada é constituída de martensita pouco revenida e elevada quantidade de austenita retida. Nota-se região superficial contendo trincas e contornos de grão.



**Figura 7:** Microestruturas obtidas em estudos do aço N6587. Arquivo Villares Metals.

### 2.1.3 Mecanismos de falha

Zhan-cheng Wei et al. [7] estudaram o comportamento do aço 18CrNiMo7-6 com a típica microestrutura martensítica temperada, analisando suas propriedades mecânicas, a evolução da sua microestrutura e a morfologia de sua fratura. A composição química do aço estudado pode ser vista na Tabela 3. O processo de tratamento térmico do aço, utilizado no estudo, foi a têmpera em óleo a 850°C por 1 hora e resfriamento ao ar. Neste trabalho, apenas as curvas de deformação e evolução da microestrutura dos corpos de prova sob a carga cíclica de 880 MPa foram selecionadas como os representantes para discussão.

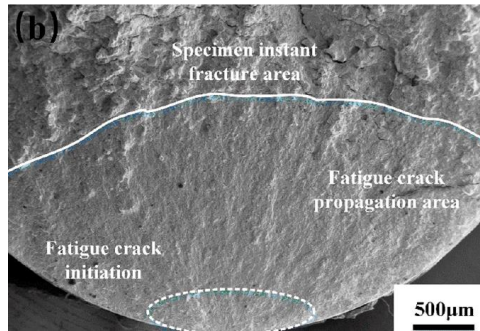
Na Figura 8 pode-se ver a morfologia da fratura que o corpo de prova apresentou sob carregamento dinâmico. Vale ressaltar que ao contrário da fratura por tração, a fratura por fadiga é dividida em três regiões diferentes.

Wang *et al.* [8] estudaram um eixo de engrenagem confeccionado no aço 18CrNiMo7-6 com as superfícies do dente e do eixo cementadas, com dureza de 58 – 60 HRC que trincou precocemente. Os autores relataram que após o tratamento térmico e processo de jateamento, foram encontradas fissuras no eixo da engrenagem, essas fissuras ocorreram na extensão axial, através do veio da engrenagem, como apresentado na Figura 9a. Com a estereografia, os autores observaram que havia a existência de uma distribuição agregada em forma de banda de inclusões granulares no material, que destroem a continuidade do material, formando concentradores de tensões, como apresentado na Figura 9b. [8]

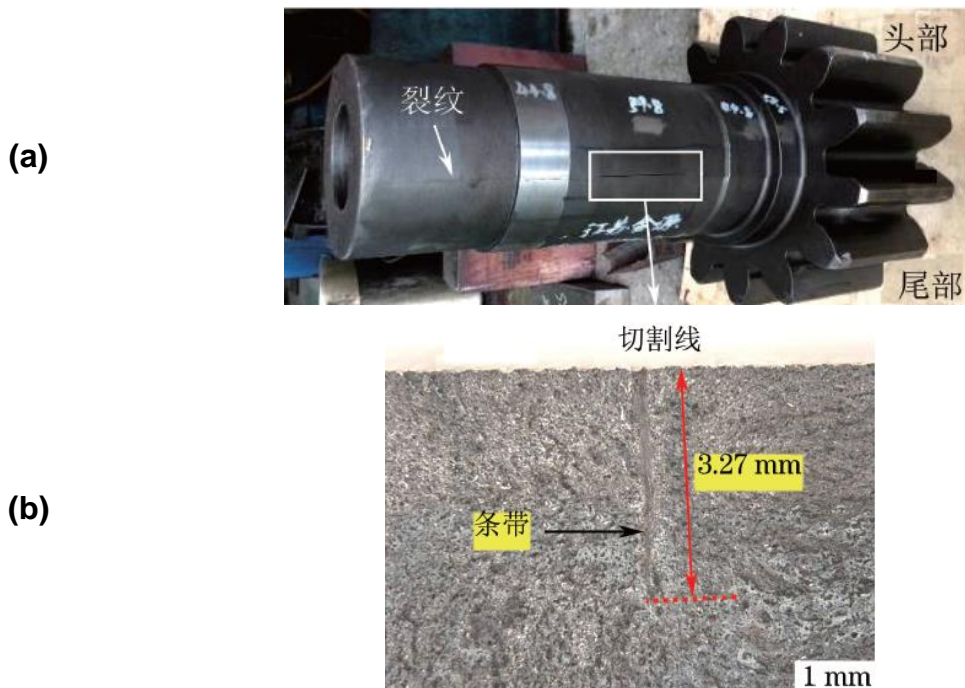
Os autores concluíram que essa distribuição agregada, a por ser concentrador de tensões, contribuiu para que ocorresse a fissuração do material devido a ações de grandes tensões internas residuais. Como forma de solucionar o problema, os autores indicaram que a matéria prima utilizada na confecção dessa ferramenta seja rigorosamente controlada para eliminar a distribuição agregada de inclusões e evitar a existência de defeitos do tipo escória na distribuição agregada. [8]

**Tabela 3:** Composição química do aço 18CrNiMo7-6. [7]

-	C	Si	Mn	P.	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu
<b>18CrNiMo7-6</b>	0,19	0,24	0,69	0,005	0,003	1,65	0,3	1,48	0,01	0,017	0,01



**Figura 8:** Morfologia da fratura encontrada após ensaio de fadiga. [7]



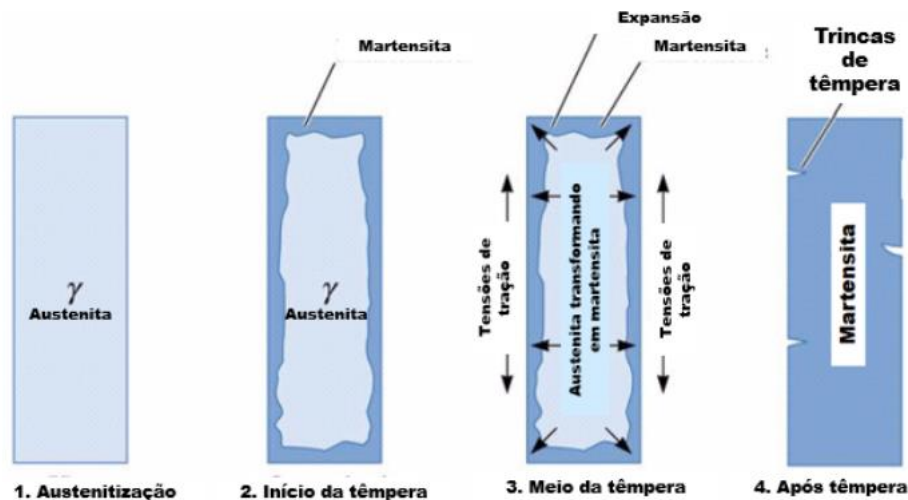
**Figura 9:** (a) Imagem visual da ferramenta; (b) Imagem da estereografia realizada na ferramenta. [8]

### 2.1.3.1 Trinca por têmpera

As trincas por têmpera têm como principal característica uma propagação em linha reta. Essas fissuras se originam de tensões residuais geradas pela transformação de fases austenita → martensita, que é uma transformação expansiva, ou seja, que gera aumento de volume. [9, 10, 11]

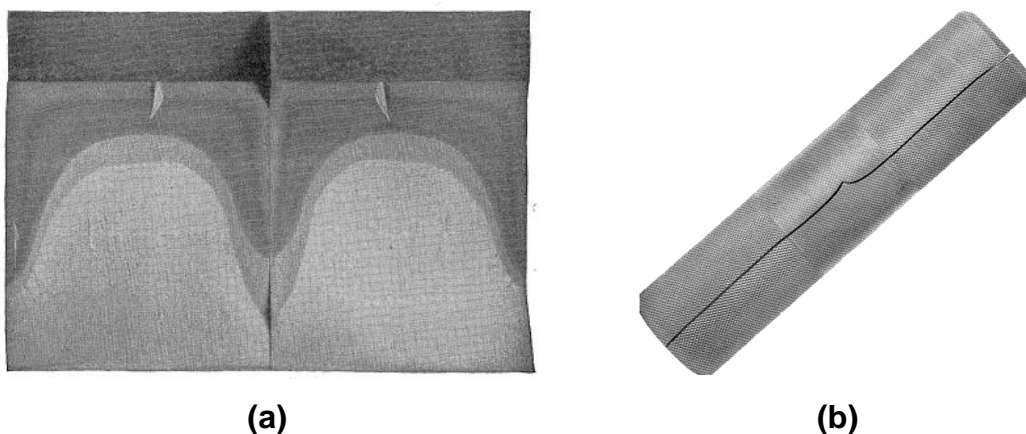
Durante o processo de têmpera o primeiro ponto a iniciar a formação de martensita é a superfície do material, como o núcleo apresenta uma dureza inferior, pois ainda não houve tal transformação, sendo composto basicamente por austenita, consegue absorver as tensões geradas durante a transformação de fase na

superfície. Porém, quando o núcleo do material atinge a temperatura para iniciar a formação de martensita, a superfície está com uma dureza maior, logo as tensões residuais da transformação ficam retidas no núcleo do material impondo tensões de tração na superfície do material. A Figura 10 apresenta um esquema ilustrando o mecanismo de formação das trincas de têmpera. [9, 10, 11]



**Figura 10:** Mecanismo de formação das trincas de têmpera. [10]

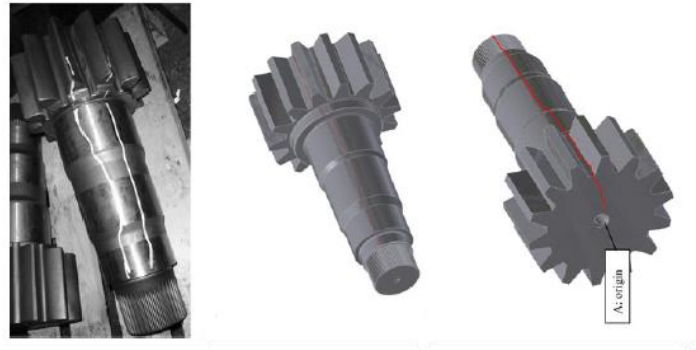
O livro *The Tool Steel Trouble-Shooter* [12] explora uma série de análises de falhas enumerando os pontos característicos presente na fratura do material. A Figura 11a mostra uma fratura na qual a descoloração presente nela é oriunda do processo de revenimento, comprovando que essa trinca se originou durante o processo de revenimento. A Figura 11b mostra uma ferramenta que trincou imediatamente após o processo de têmpera, como podemos observar o perfil de propagação da trinca é linear, o que é característico de uma trinca por têmpera.



**Figura 11:** Imagens de trincas por têmpera. [12]

D'Errico [13] estudou um pinhão que quebrou durante o processo de tempera,

como está apresentado na Figura 12, no qual a trinca se originou de um dos furos de fixação para operações de usinagem. Através de simulação computacional, o autor observou que as tensões residuais, geradas durante o processo de têmpera, podem ser suficientes para fazer com que pequenos defeitos presentes no material se tornem instáveis, podendo fazer a trinca nuclear e se propagar durante a têmpera

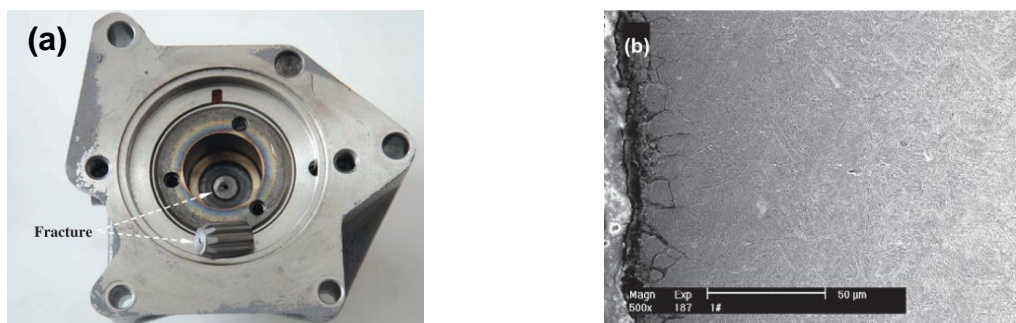


**Figura 12:** Pinhão analisado no artigo [13].

### 2.1.3.2 Oxidação intergranular

Zhi-wei Yu [14] estudou a fratura intergranular de um eixo estriado, como apresentado na Figura 13a. Eles observaram que houve oxidação intergranular próximo a superfície da ferramenta, que é um fenômeno típico de aços que passam por cementação a gás, como está apresentado na Figura 13b.

A oxidação intergranular cria “cavidades” nos contornos de grão que promovem o início e a propagação da trinca, porém, deve-se ressaltar que a presença de oxidação intergranular na superfície da ferramenta não é o suficiente para causar sua ruptura prematura. No entanto, em combinação com outros fatores, como por exemplo, concentração de tensões no local, pode-se aumentar a probabilidade de tal evento. [14]



**Figura 13:** (a) Ferramenta analisada; (b) Oxidação intergranular encontrada na superfície da ferramenta. [14].

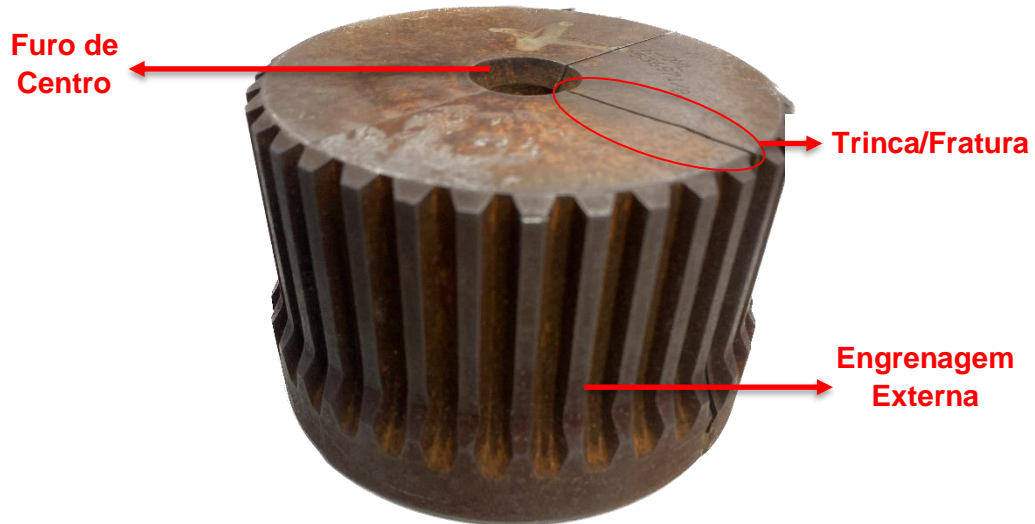
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de investigar a falha do pinhão, foram realizados diversos ensaios distintos, sendo eles:

- (i) Análise química: esse ensaio foi realizado via espectrômetro de emissão ótica por centelhamento, no qual os átomos depois de excitados por uma descarga elétrica entre um eletrodo e a amostra emitem luz, esta luz é direcionada para uma grade de dispersão que divide a luz e reflete em diversos comprimentos de onda, posiciona-se detetores nos comprimentos de ondas de interesse (elementos de interesse), onde é possível transformar a luz em pulsos elétricos e converter em intensidade do elemento. Essa análise foi realizada com o intuito de avaliar a composição química do material;
- (ii) Macrografia e estereografia: ensaio realizado de forma visual e com o auxílio do estereomicroscópio da marca Zeiss, com AxioCam ERc 5s acoplado, essa análise teve o intuito de avaliar a morfologia da fratura;
- (iii) Metalografia: ensaio realizado com o microscópio óptico da marca Zeiss, com AxioCam MRc acoplada, para esse ensaio as amostras tiveram que ser devidamente preparadas, passando pela preparação grossa (seguindo a sequência de granulometria das lixas: #100, #180, #400 e #600) e a preparação fina (passando por duas etapas de polimento: 6  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ ), para posteriormente serem atacadas quimicamente com o reagente Nital 4%. Essa análise teve como intuito avaliar a microestrutura do material e a fratura, buscando encontrar um possível local de nucleação da trinca;
- (iv) Microscopia eletrônica de varredura: ensaio realizado na microsonda eletrônica, modelo JXA-8230 da Jeol, com EDS (energia dispersiva de raios-X) integrado. Essa análise teve o intuito de avaliar regiões com segregações ou oxidação com maior resolução, e coletar a composição química nestes pontos. Para essa análise a amostra deve passar pela preparação fina e preparação grossa, descrita no item (iii);
- (v) Difração de raios-x: Ensaio realizado no difratômetro de raios-X portátil Rigaku, modelo MSF-3M, com o intuito de se analisar a porcentagem de austenita retida presente na amostra. Para essa análise a amostra deve passar pela preparação fina e preparação grossa, descrita no item (iii);
- (vi) Curva CHD (Case Hardness Depth): ensaio de microdureza realizado pelo

microdurômetro Qness 60 A+ EVO, da marca QATM, com o intuito de avaliar a espessura e dureza da camada cementada. Para essa análise a amostra deve passar pela preparação fina e preparação grossa, descrita no item (iii).

Para todas essas análises foi utilizado a região da amostra sinalizada na Figura 14, assim como as nomenclaturas utilizadas para identificar a região analisada.



**Figura 14:** Área analisada.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análise Química

Foi realizado a análise química do material a fim de verificar se sua composição está dentro da especificação da norma para o aço DIN 18CrNiMo7-6.

O resultado está apresentado na Tabela 4 e com ele podemos verificar que o material utilizado para a confecção dos pinhões tem composição química correspondente ao aço DIN 18CrNiMo7-6.

**Tabela 4:** Composição química encontrada na amostra analisada.

	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
Amostra	0,19	0,26	0,71	0,01	0,01	0,03	1,71	0,27	1,6	0,2	0,03
Especificação	0,15-0,21	<0,4	0,5-0,9	<0,035	<0,035	-	1,5-1,8	0,25-0,35	1,4-1,7	-	-

### 4.2 Macrografia

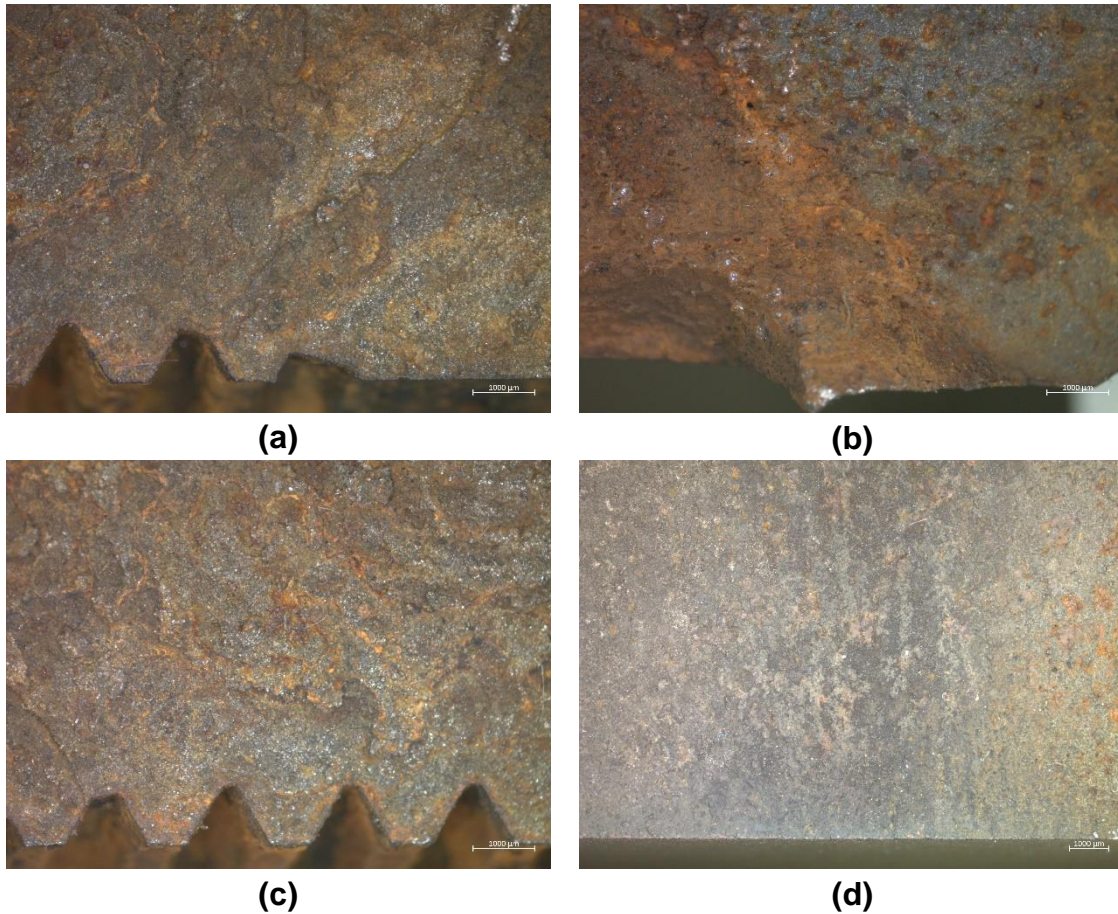
Ao realizarmos uma análise macrografica da amostra foi possível visualizarmos um fenômeno chamado *Shear lip*, região em destaque na Figura 15. Esse fenômeno é caracterizado por ter a aparência de “bordas”, devido a deformação plástica que ocorre antes do final da fratura, portanto tal região caracteriza o ponto final de propagação da trinca na amostra.



**Figura 15:** Análise macrografica da fratura da ferramenta.

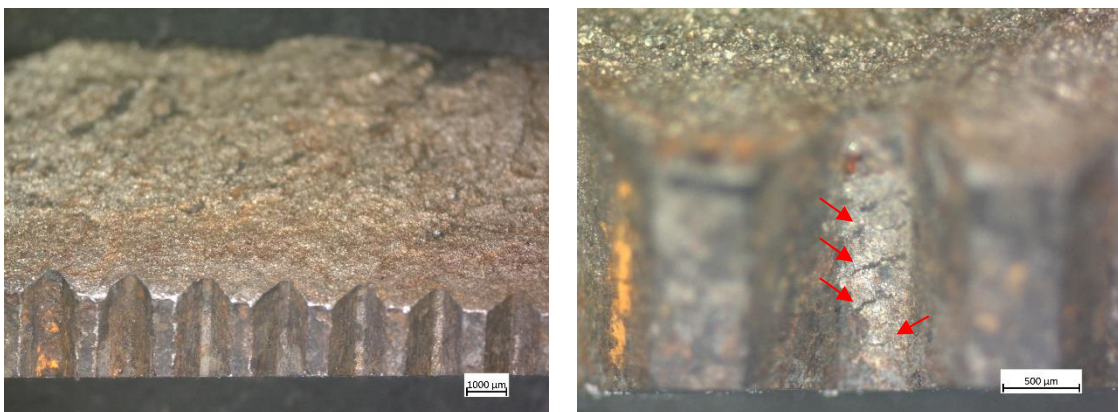
### 4.3 Estereografia

Fotos com o estereomicroscópio foram tiradas a fim de se observar alguma anomalia na região da fratura, como pontos com segregações e marcas que caracterizam o início de nucleação da trinca. Porém, não foi encontrado nada que sinalizasse algo. As fotos estão apresentadas na Figura 16.



**Figura 16:** Fotos tiradas, com o estereomicroscópio, da fratura do pinhão.

Foram tiradas algumas fotos da região da rosca do furo de centro do pinhão, a fim de se encontrar alguma anomalia, tais fotos estão apresentadas na Figura 17. Como podemos observar há a presença de micro trincas nessa região, que estão sinalizadas com setas vermelhas, isso pode ser um indicativo de que a nucleação da trinca ocorreu nesta região.



**Figura 17:** Fotos tiradas com o estereomicroscópio da rosca do furo de centro.

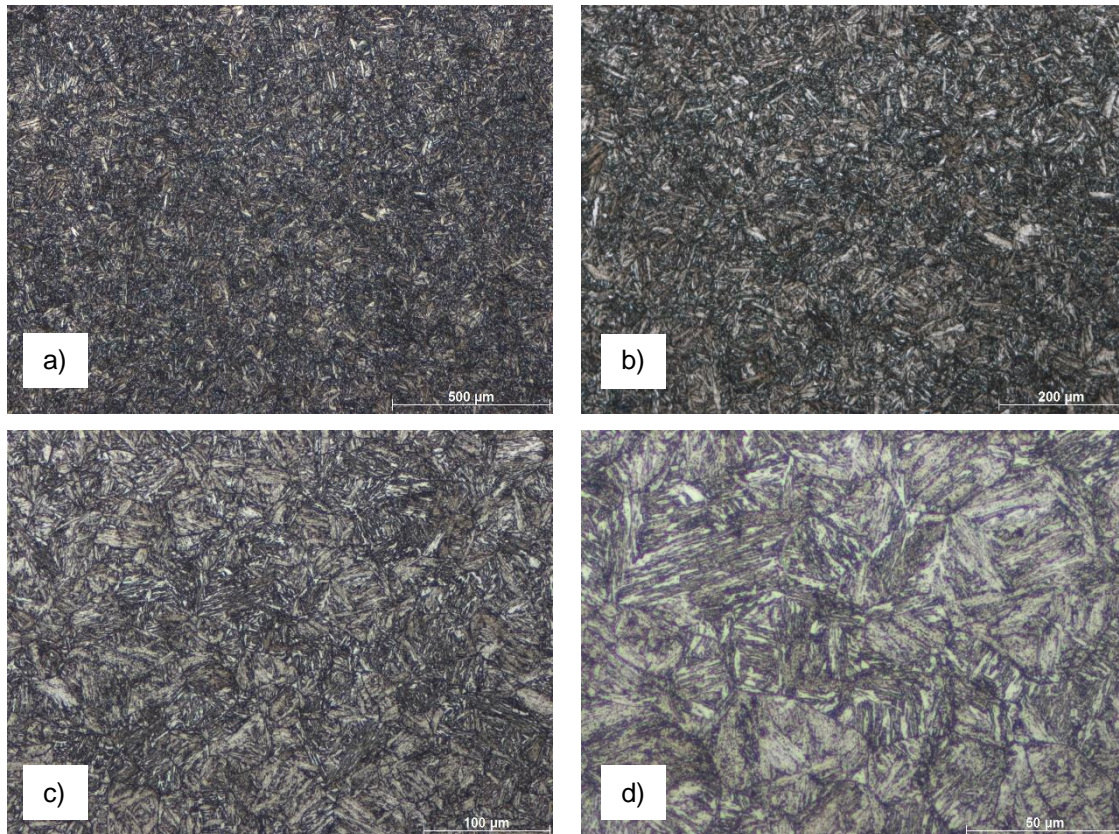
## 4.4 Metalografia

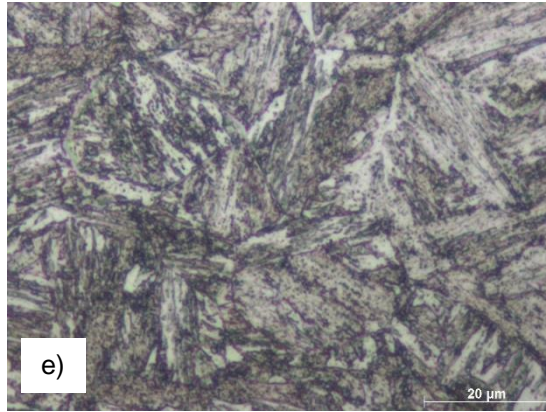
A fim de se analisar a microestrutura da ferramenta foram observadas 3 regiões diferentes: a região da fratura, região dos dentes externos e a região da rosca do furo de centro, presente no topo do pinhão. Além disso, metalografia das amostras também foram realizadas para se observar as fraturas.

### 4.4.1 Análise da microestrutura

Para a análise metalográfica as amostras foram devidamente preparadas e atacada com o reagente químico Nital 4%.

A Figura 18 apresenta as fotos da microestrutura do material na região do núcleo da ferramenta. Com ela podemos observar que o material apresenta microestrutura uniforme composta por martensita revenida.



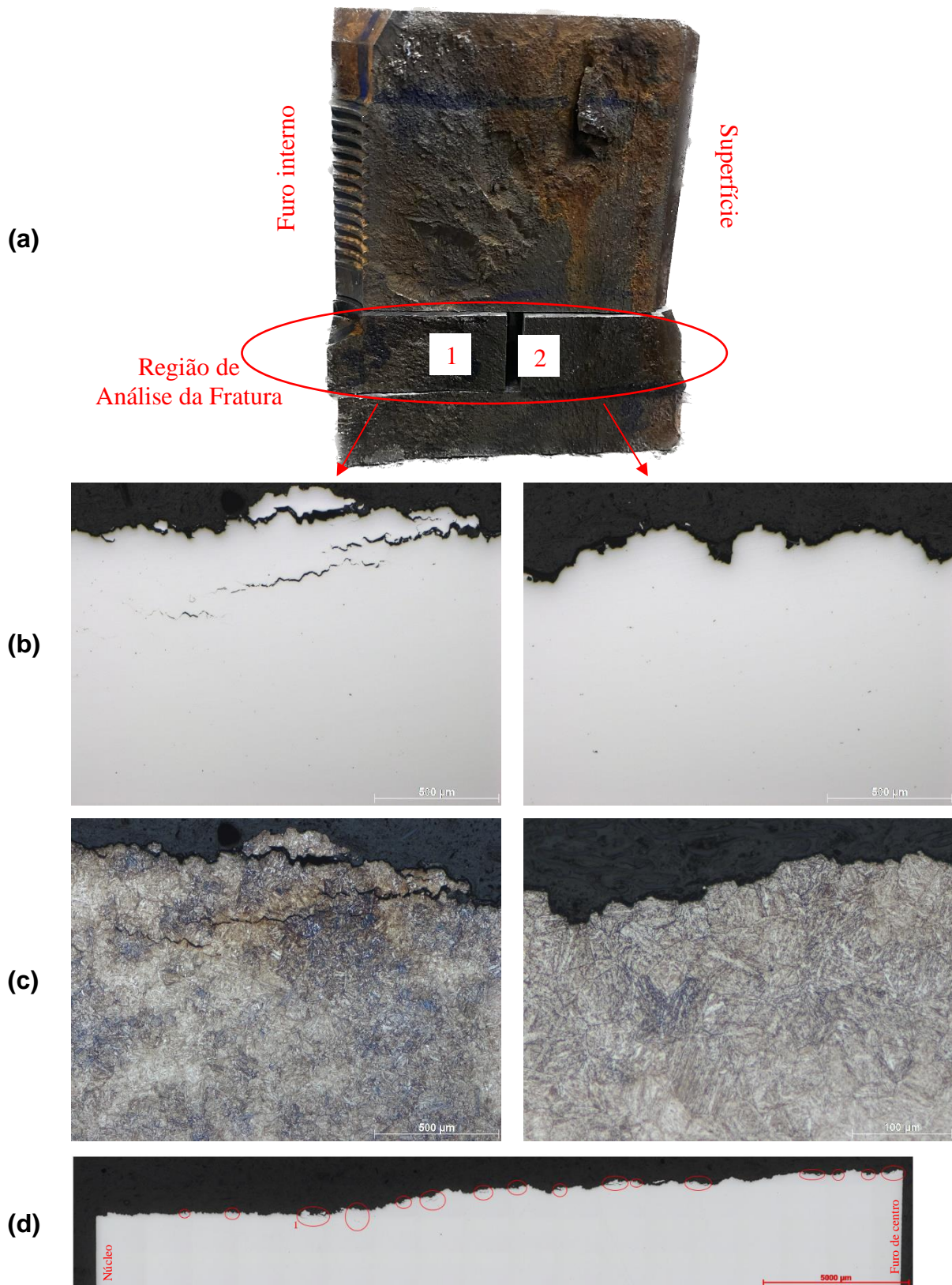


**Figura 18:** Microestrutura da ferramenta. Com aumento de (a) 50x, (b) 100x, (c) 200x, (d) 500x e (e) 1000x.

#### 4.4.2 Análise da fratura

A Figura 19 apresenta as fotos da região da fratura da ferramenta, sendo a Figura 19a uma foto macro para exemplificar a região de análise, a Figura 19b a região da fratura sem ataque químico, a Figura 19c a região da fratura com ataque químico e a Figura 19d apresenta um mosaico da fratura da amostra 1 identificado na Figura 19a.

Observando as imagens dessas regiões, em especial a Figura 19d é possível notar que a trinca caminhou do furo interno para a superfície do material, uma vez que próximo ao furo de centro nota-se uma concentração maior de micro trincas, quando comparado a região próximo ao núcleo do material. Com isso temos um indicativo de que a nucleação e início de propagação da trinca ocorreu na região do furo de centro.

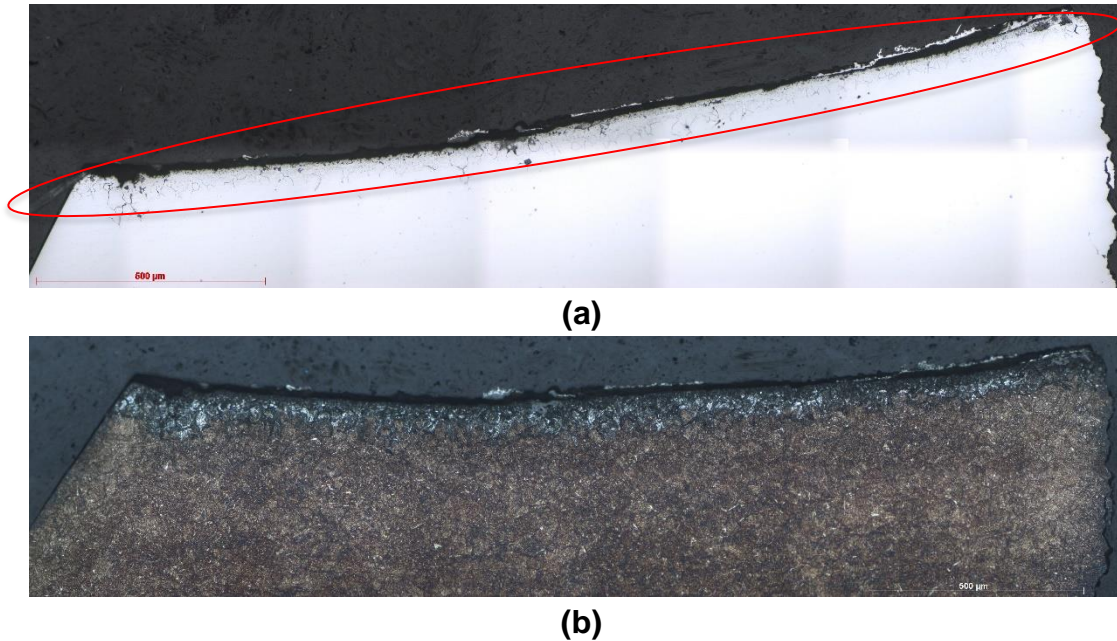


**Figura 19:** Análise da fratura da ferramenta. (a) Imagem das regiões analisadas; (b) Imagem da superfície de fratura do material, sem ataque químico, com 50x de aumento; (c) Imagem da superfície de fratura do material, com ataque químico, com

50x e 200x de aumento respectivamente; (d) Mosaico da fratura da amostra 1, com 50x de aumento.

#### 4.4.3 Análise do furo de centro

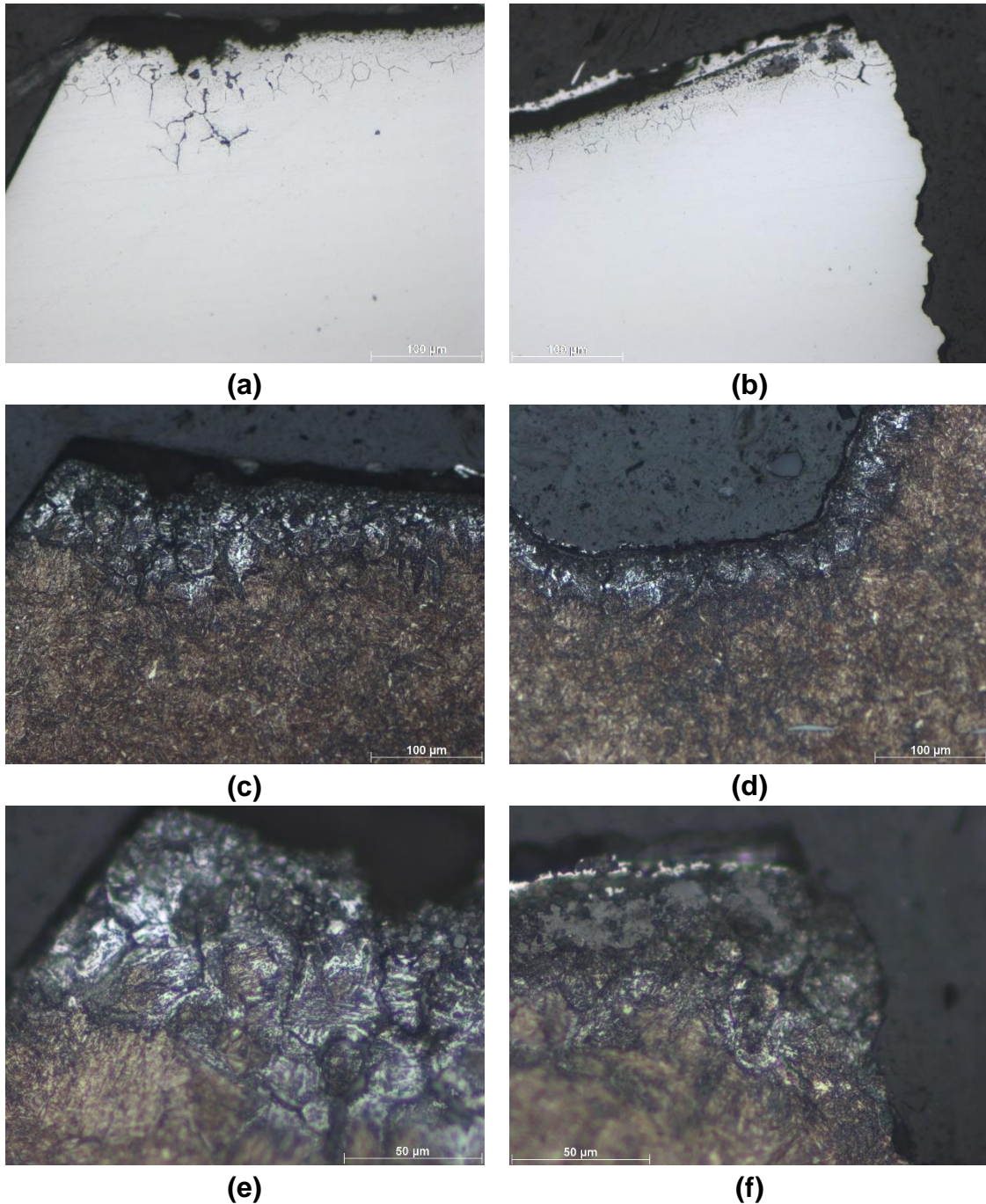
A Figura 20 apresenta mosaicos da superfície da rosca do furo de centro, no sentido tangencial. Nelas podemos observar a presença de corrosão intergranular por conta da morfologia hexagonal das marcas visualizadas via microscopia óptica.



**Figura 20:** Mosaico com 200x de aumento da região da rosca do furo de centro do pinhão. (a) Sem ataque químico e (b) Atacada quimicamente com Nital 4%.

A Figura 21 apresenta fotos, com maiores aumentos, da região da rosca do furo de centro, no sentido tangencial, em pontos de maior concentração de corrosão intergranular.

Com as imagens podemos observar que as extremidades do dente apresentam uma maior concentração dessa corrosão, foi possível notar também que na superfície dos dentes da rosca do furo de centro há a presença de uma camada com coloração escura. Por isso, esta amostra foi levada para uma análise no MEV-EDS a fim de analisar sua composição química, o resultado está apresentado na Figura 22.e.



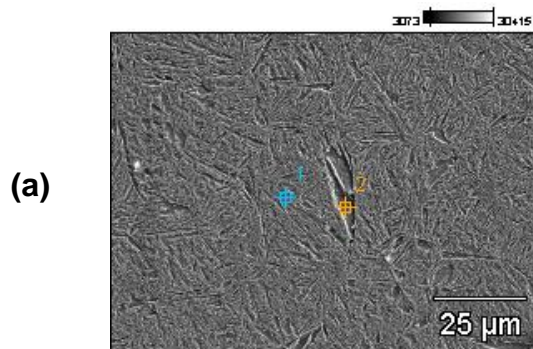
**Figura 21:** Microestrutura da região da rosca do furo de centro do pinhão, com aumento de (a), (b), (c) e (d) 200x, e (e) e (f) 500x.

#### 4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

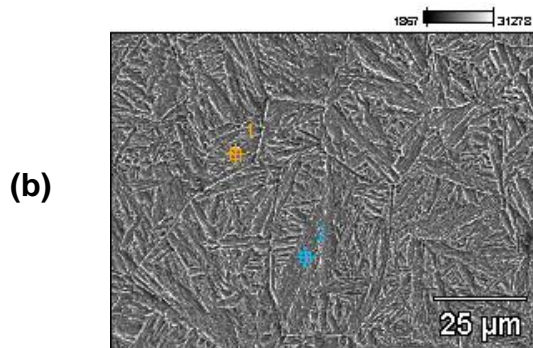
Foi realizado análises com o equipamento de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o objetivo de coletar um mapa composicional da ferramenta via EDS em 5 regiões distintas, com o objetivo de encontrar áreas com segregações heterogêneas. A Figura 22 apresenta os resultados encontrados para cada região.

A Figura 22.e mostra que a camada com a coloração escura encontrada nas

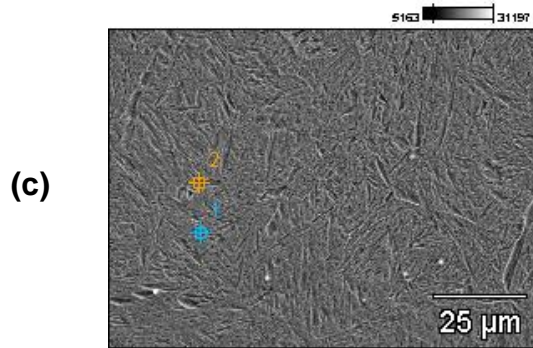
superfícies da região da rosca do furo de centro é oxidação que o material sofreu por ficar exposto ao tempo, podemos visualizar isso através do elevado teor de oxigênio na composição química nesta região.



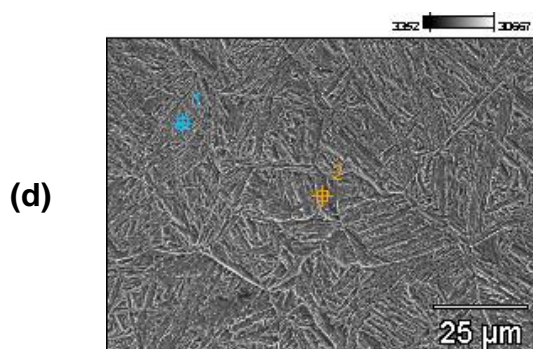
Ponto	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,6	2,28	1,2	94,61	1,24
2	0,55	1,77	1,08	94,46	2,13



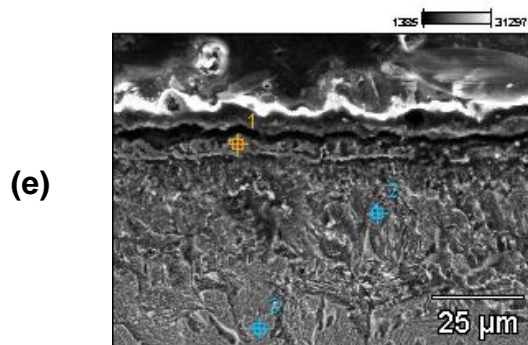
Ponto	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,43	2,19	1,37	94,23	1,78
2	0,60	1,78	1,08	94,67	1,87



Ponto	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,56	2,91	0,00	94,74	1,9
2	0,37	1,84	0,57	95,93	1,29



Ponto	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,58	2,11	1,10	94,02	2,19
2	0,45	1,94	1,31	94,35	1,95



Ponto	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	18,45	0,18	0,91	0,25	78,63	1,57
2	-	0,80	0,75	0,49	96,15	1,81
3	-	0,65	1,34	0,94	94,97	2,1

**Figura 22:** Análise de WDS realizada na amostra (Weight%), em 5 regiões.

#### 4.6 Difração de Raio-X (DRX)

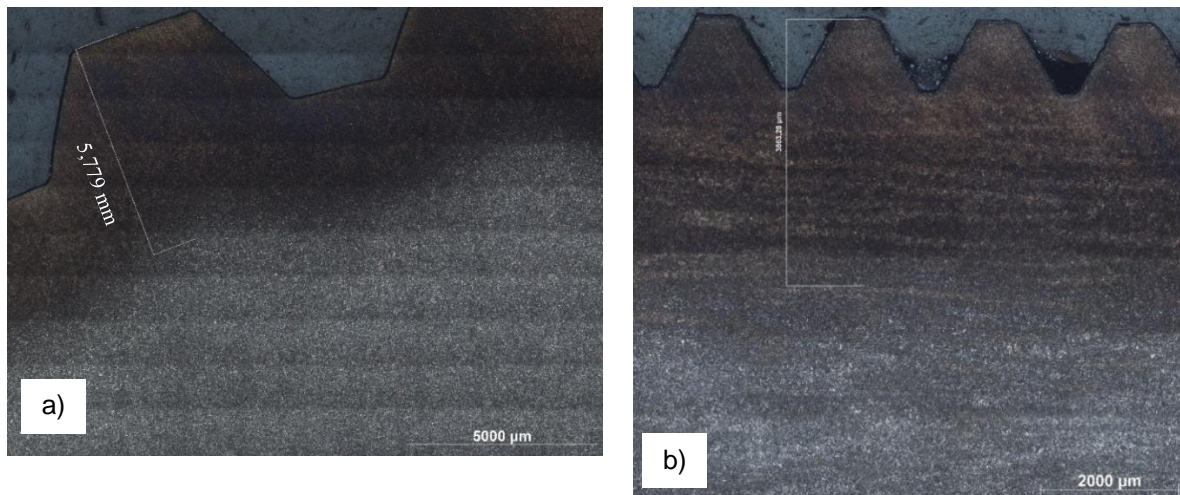
Foram utilizados ensaios de difração de raio-x para coletar a porcentagem de austenita retida na amostra, essa análise é importante para avaliar se a trinca poderia ser decorrente de elevado teor desta fase presente na microestrutura do material (>5 %), lembrando que, se o material apresenta elevado teor de austenita retida indica-se que o seu tratamento térmico de revenimento não foi bem conduzido.

No ensaio foi visto que o material apresenta 0,6 % de austenita retida, com isso podemos descartar que a trinca seja oriunda de um tratamento térmico incorreto.

#### 4.7 Análise da camada cementada

A Figura 23a apresenta um mosaico realizado da região dos dentes da engrenagem externa do pinhão, no qual podemos observar uma camada cementada de aproximadamente 5,779 mm. Como foi descrito na introdução deste trabalho, a espessura da camada cementada objetivada é de 2,35 - 2,75 mm, portanto podemos concluir que está região de análise apresenta uma camada cementada fora da especificação da ferramenta estudada.

A Figura 23b apresenta um mosaico da região da rosca do furo de centro, presente no topo da ferramenta. Um ponto que chamou a atenção é a presença de camada cementada de aproximadamente 3,863 mm de espessura nesta região.

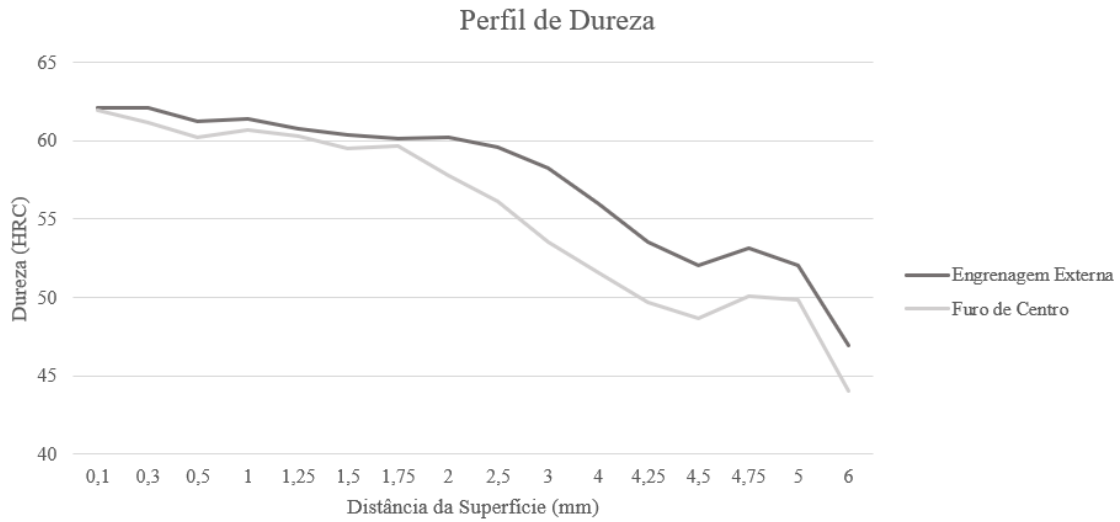


**Figura 23:** (a) Mosaico com 50x de aumento da região dos dentes externos; (b) Mosaico com 50x de aumento da região dos dentes da furação interna presente na ferramenta.

Foi realizado uma curva CHD (Case Hardness Depth) na região dos dentes do pinhão da engrenagem externa que apresenta cementação, como indicado na Figura 23a, com intuito de caracterizar a camada cementada de acordo com sua dureza e espessura. O resultado deste ensaio está apresentado na Figura 24d. Através da curva CHD sabemos que o processo de cementação da ferramenta gerou uma camada cementada efetiva de 5,456 mm, com dureza superficial de 62,1 HRC.

Na Figura 23b foi possível observar que no furo de centro também havia a presença de uma camada cementada, a fim de se estudar essa camada mais a fundo foi realizado um perfil de dureza na região, o resultado dados obtidos na análise estão apresentados na Figura 24c.

Para se estimar a espessura da camada cementada do furo de centro da ferramenta foi feito uma comparação de dados do perfil de dureza, que está apresentado na Figura 24a. Com isso podemos concluir que o comportamento de difusão do carbono durante a cementação foi semelhante para as duas regiões estudadas, gerando uma camada cementada efetiva grosseira, acima do objetivado.



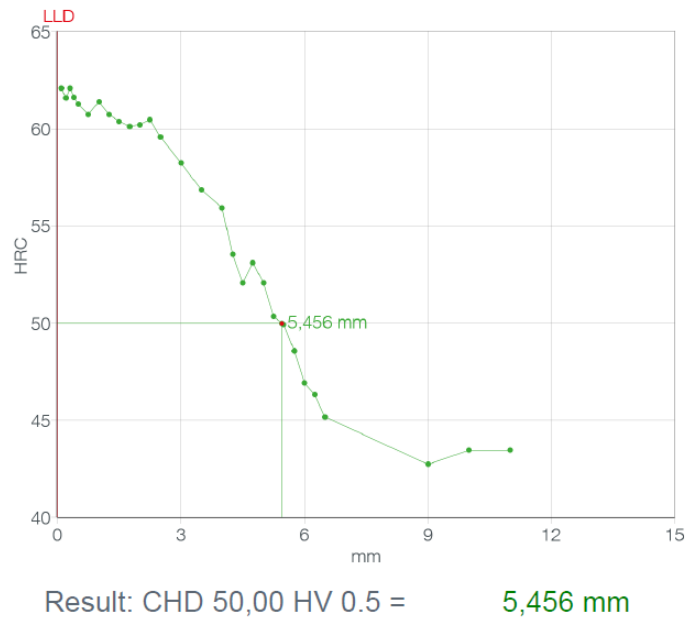
(a)

Engrenagem Externa		
Ponto	Distância da Superfície (mm)	Dureza (HRC)
1	0,10	62,08
2	0,20	61,58
3	0,30	62,08
4	0,40	61,62
5	0,50	61,27
6	0,75	60,74
7	1,00	61,38
8	1,25	60,74
9	1,50	60,39
10	1,75	60,13
11	2,00	60,22
12	2,25	60,48
13	2,50	59,57
14	3,00	58,24
15	3,50	56,85
16	4,00	55,94
17	4,25	53,53
18	4,50	52,06
19	4,75	53,12
20	5,00	52,06
21	5,25	50,33
22	5,50	49,93
23	5,75	48,57
24	6,00	46,92
25	6,25	46,31
26	6,50	45,17
27	9,00	42,73
28	10,00	43,45
29	11,00	43,45

(b)

Furo de Centro		
Ponto	Distância da Superfície (mm)	Dureza (HRC)
1	0,05	60,39
2	0,1	61,96
3	0,3	61,19
4	0,5	60,22
5	0,7	61,65
6	0,8	61,54
7	0,9	61,35
8	1,0	60,65
9	1,3	60,30
10	1,5	59,52
11	1,8	59,65
12	2,0	57,80
13	2,5	56,10
14	3,0	53,53
15	3,2	54,00
16	3,4	51,88
17	3,6	51,25
18	3,8	50,53
19	4,0	51,56
20	4,3	49,73
21	4,5	48,71
22	4,8	50,07
23	5,0	49,87
24	6,0	44,33
25	6,0	44,58
26	6,0	43,82
27	6,0	43,82
28	6,0	43,82

(c)



(d)

**Figura 24:** (a) Curva dos perfis de dureza; (b) e (c) Dados coletados no ensaio de perfil de dureza; (d) Curva CHD da engrenagem externa do pinhão.

## 5 DISCUSSÃO GERAL

A análise microestrutural realizada no pinhão nos mostra uma microestrutura homogênea composta por martensita revenida.

Foi possível observar com os resultados a presença de uma camada cementada espessa em dois pontos da ferramenta, nas engrenagens externas e no furo de centro presente no topo do pinhão, com dureza, espessura e perfil fora do especificado. Isso foi decorrente das medidas na seção analisada, como podemos ver no Apêndice A. Os dentes da engrenagem são “finos”, fazendo com que a camada cementada de ambos os lados se unam, uma vez que o perfil objetivado para tal camada foi de 2,35 – 2,75 mm. Foi observado também a presença de corrosão intergranular na região dos dentes da rosca do furo de centro, o que deixa a região fragilizada, propiciando a nucleação de trincas.

Após analisar todos os resultados experimentais obtidos acredita-se que o princípio de falha da ferramenta tenha sido trincas por têmpera, decorrente da fragilização gerada pela corrosão intergranular e cementação grosseira. As trincas por têmpera têm como principal característica uma propagação em linha reta, como observamos no pinhão, Figura 2. Essas fissuras se originam de tensões residuais geradas pela transformação de fases austenita → martensita, que é uma transformação expansiva, ou seja, que gera aumento de volume. Durante o processo de têmpera o primeiro ponto a iniciar a formação de martensita é a superfície do material, logo, o núcleo apresenta ainda uma dureza inferior, pois não houve tal transformação de fases, sendo composto basicamente por austenita, com isso, consegue absorver as tensões geradas durante a transformação de fase que estão ocorrendo na superfície. Porém, quando o núcleo do material atinge a temperatura para iniciar a formação de martensita a superfície está com uma dureza superior, logo as tensões residuais da transformação ficam retidas no núcleo do material impondo tensões de tração em sua superfície.

## 6 CONCLUSÃO

Após a realização de todos os ensaios de análises pode-se concluir de que a falha do pinhão se iniciou no furo de centro da ferramenta. Os filetes da rosca agiram como um concentrador de tensão devido a um somatório de fatores se tornando o ponto de início e propagação de trincas, são eles: design dos filetes; fragilização por corrosão intergranular; tensionamento na região cementada, ocasionado pela difusão de carbono durante o processo de cementação; tensões residuais de têmpera do núcleo da ferramenta impondo tensões de tração em sua superfície, que estava frágil por conta da elevada dureza e com presença de corrosão intergranular.

Como forma de solucionar o problema aconselhamos visitar o processo de tratamento térmico realizado na ferramenta, considerando os seguintes pontos:

- (i) Higienização do furo de centro após usinagem, pois um dos fatores que podem gerar corrosão intergranular é a presença de sujidade na região, como por exemplo óleo usado durante o processo de usinagem;
- (ii) Proteção do furo de centro e da engrenagem externa, que são áreas de encaixe do pinhão, durante o processo de cementação a gás, para evitar que a área seja cementada, essa proteção pode ser realizada com uma pintura com tinta protetiva chamada Condursal, ou no caso do furo de centro com um parafuso;
- (iii) Revisitar o processo de têmpera, para garantir que o resfriamento esteja acontecendo de maneira uniforme, e considerar um processo de alívio de tensões após têmpera a fim de se evitar a presença de tensões residuais na ferramenta.

## REFERÊNCIAS

- [1] AÇOS TORRES. “Aços para cementação”. Disponível em: <https://acostorres.com.br/acos/18crnimo7-6/>. Acesso em jul. 2023.
- [2] OVAKO. “Steel grade: 18CrNiMo7-6”. Disponível em: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/18crnimo7-6/>. Acesso em jul. 2023.
- [3] Sollis, C., Chen, Y., Cheng, Y.-T., & Yip, S. (2023). Mechanical behaviour of nanoporous metals: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 2695-2710. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.04.192
- [4] GERDAU. “Manual de aços”. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf). Acesso em jul. 2023.
- [5] SCHMITZ. “18CrNiMo7-6 dual-phase structure”. Disponível em: <https://www.schmitz-metallographie.de/en/gefuge/1-6587-18crnimo7-6-dual-phase-structure/>. Acesso em jul. 2023.
- [6] P. Springer, U. PrahI (2016). Characterisation of mechanical behavior of 18CrNiMo7-6 steel with and without nb under warm forging conditions through processing maps analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 237, 216-234. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.05.021.
- [7] Zhan-cheng Wei, Zhi-feng Yan, Jin-wen Zhang, Hong-xia Zhang, Zhi-xiang Wang, Wen-xian Wang (2023). Research on failure behavior of 18CrNiMo7-6 steel. DOI: /10.1016/j.engfailanal.2023.107306.
- [8] WANG Zhanhua, HUI Weijun, CHEN Zhen, ZHANG Yongjian, ZHAO Xiaoli. Effects of Vanadium and Austenitizing Temperature on Continuous Cooling Transformation Behavior of Mn-Cr Type Bainitic Forging Steels[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(18): 18145-18151.
- [9] Freitas, Paulo Sergio de. *Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática* / Paulo Sergio de Freitas. – São Paulo: SENAI-SP Editora, 2024.
- [10] FUOCO, Ricardo. “Trincas de têmpera em peças fundidas de aços”. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/trincas-de-t%C3%A4mpera-em-pe%C3%A7as-fundidas-a%C3%A7os-ricardo-fuoco/>. Acesso em fev. 2024
- [11] EPOWER METALS. “Quenching crack of failure steel caused by improper heat treatment”. Disponível em: <https://www.epowermetals.com/quenching-crack-of-failure-steel-caused-by-improper-heat-treatment.html>. Acesso em fev. 2024.
- [12] *The Tool Steel Trouble-Shooter: An Analysis of 107 Tool Failures*. Handbook 1964. Bethlehem Steel Coporation. U.S.A.63 páginas.
- [13] D'Errico, F. Failures Induced by Abnormal Banding in Steels. *J Fail. Anal. and Preven.* 10, 351–357 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11668-010-9374-3>.
- [14] Yu, Z., Xu, X., Yang, Z., & Li, Y. (2012). Case internal oxidation and intergranular

fracture of carburized splined-shaft. *Engineering Failure Analysis*, 22, 141–151.  
doi:10.1016/j.engfailanal.2012.0.

## APÊNDICE A - Medidas dos Dentes da Engrenagem Externa

