

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

**FILIPY LIGABUE CARVALHO**

**ESTUDO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO DE TUBOS**  
**NITRETADAS A PLASMA**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**FILIPY LIGABUE CARVALHO**

**ESTUDO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO DE TUBOS  
NITRETADAS A PLASMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Matrizes e Ferramentas.

Orientador: Prof. Me. Sandro Tomaz Martins

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**FILIPY LIGABUE CARVALHO**

**ESTUDO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO DE TUBOS  
NITRETADAS A PLASMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Matrizes e Ferramentas.

**Aprovado em: 28/06/2019.**

**Banca Examinadora**

Prof. Me. Sandro Tomaz Martins  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Cristina Moré Farias  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## RESUMO

A conformação de tubos com costura necessita de ferramentas com alto desempenho que possam atender as necessidades impostas pelo processo. O objetivo deste trabalho é avaliar e quantificar a influência da nitretação a plasma, aplicada a ferramentas de conformação de tubos, em relação ao desgaste superficial durante o processo produtivo. Para a análise do desempenho das ferramentas com nitretação foram avaliados parâmetros de rugosidade, alterações dimensionais do perfil das peças e identificação dos mecanismos de desgaste causados pelo processo. Essas análises foram realizadas também em ferramentas sem nitretação, assim foi possível quantificar a eficiência do tratamento de nitretação. Os resultados obtidos apresentaram uma tendência de variação dimensional de menor magnitude nas ferramentas com aplicação da nitretação, e também uma menor intensidade dos mecanismos de desgaste presentes. Ao fim do trabalho, concluiu-se que a nitretação teve influência positiva na diminuição do desgaste da superfície das ferramentas.

**Palavras chave:** Conformação de tubos com costura, nitretação a plasma, desgaste, rugosidade.

## **ABSTRACT**

Welded pipe forming process requires tools with high performance to meet the process requirements. This work assesses and quantifies the influence of plasma nitriding applied to forming tools on surface wear during the manufacturing process. Roughness parameters, dimensional changes, and wear mechanism were evaluated on the nitreted tools, as well on non-nitreted tools. The results showed a smaller dimensional variation in the nitreted tools, when compared with non-nitreted ones, and also a lower intensity of the mechanisms of wear present. It was concluded that the nitriding had a positive effect on wear reduction on tools' surface.

**Keywords:** Pipe forming, plasma nitriding, wear, roughness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desbobinamento e acúmulo de fitas .....	16
Figura 2 - Formação .....	17
Figura 3 - Estágios da formação .....	17
Figura 4 - Processo <i>HFIW</i> na soldagem longitudinal de tubos .....	18
Figura 5 - Etapa de cabeça turca.....	19
Figura 6 - Tubo redondo transformado em um tubo quadrado.....	20
Figura 7 - Tribossistema.....	21
Figura 8 - Regiões de contato superficial .....	23
Figura 9 - Processo de transferência de metal devido à adesão.....	24
Figura 10 - Mecanismo de formação de ranhuras produzidas por partículas encruadas.....	25
Figura 11 - Tipos de desgaste abrasivo .....	26
Figura 12 - Mecanismos de desgaste abrasivo .....	26
Figura 13 - Formação e propagação de trinca primária.....	27
Figura 14 - Formação de trinca secundária e ruptura de partícula de desgaste.....	28
Figura 15 - Categorias de desgaste triboquímico .....	29
Figura 16 - Típica camada nitretada .....	31
Figura 17 - Esquema básico de um equipamento de nitretação a plasma .....	32
Figura 18 - Microestrutura da amostra nitretada por 360 minutos .....	34
Figura 19 - Perfil de microdureza das amostras .....	34
Figura 20 - Microestrutura da amostra nitretada por 1 hora.....	35
Figura 21 - Medição do perfil da ferramenta.....	38
Figura 22 - Medição de rugosidade das ferramentas.....	38
Figura 23 - Ferramentas montadas para produção.....	39
Figura 24 - Corte das amostras .....	41
Figura 25 - Amostra retirada das ferramentas .....	43
Figura 26 - Camada nitretada, ampliação 200x (Nital 5%).....	49
Figura 27 - Camada nitretada, ampliação 500x (Vilela) .....	49
Figura 28 - Separação de áreas das amostras para análise .....	51
Figura 29 - Amostras 1 (Ampliação 1000x).....	52
Figura 30 - Amostra 2 (Ampliação 1000x) .....	52
Figura 31 - Amostra 1 (Ampliação 100x) .....	53

Figura 32 - Amostra 2 (Ampliação 100x) .....	54
Figura 33 - Amostra 3 (Ampliação 100x) .....	54
Figura 34 - Amostra 4 (Ampliação 100x) .....	55
Figura 35 - Amostra 5 (Ampliação 100x) .....	56
Figura 36 - Amostra 6 (Ampliação 6x) .....	56
Figura 37 - Amostra 4 (Ampliação 2000x) .....	57
Figura 38 - Amostra 6 (Ampliação 2000x) .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química AISI D2 .....	36
Tabela 2 - Produção com material laminado a quente.....	40
Tabela 3 - Produção com material zincado .....	40
Tabela 4 - Composição química materiais produzidos.....	40
Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos materiais produzidos .....	41
Tabela 6 - Identificação das amostras.....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores de rugosidade antes da conformação .....	44
Gráfico 2 - Rugosidade das ferramentas sem nitretação antes e após a conformação .....	45
Gráfico 3 - Rugosidade das ferramentas com nitretação antes e após a conformação .....	45
Gráfico 4 - Perfil das ferramentas com nitretação antes e após a conformação .....	47
Gráfico 5 - Perfil das ferramentas sem nitretação antes e após a conformação .....	47
Gráfico 6 - Desgaste das ferramentas .....	48
Gráfico 7 - Perfil de microdureza .....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BF	Bobina laminada a frio
BQ	Bobina laminada a quente
BZ	Bobina zincada
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EUA	Estados Unidos da América
HFIW	<i>High Frequency Induction Welding</i>
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
HRC	<i>Rockwell Hardness C</i>
HV	<i>Vickers Hardness</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
Pa	<i>Pascal</i>
Ra	Desvio médio aritmético de rugosidade
Rz	Média aritmética das rugosidades parciais
RPM	Rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
Torr	<i>Torricelli</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVO.....	14
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1	CONFORMAÇÃO DE TUBOS .....	16
<b>2.1.1</b>	<b>Desbobinamento .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Formação.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Soldagem do tubo por <i>HFIW</i> .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Etapa de calibração .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Etapa de cabeça turca .....</b>	<b>19</b>
2.2	TRIBOLOGIA .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Atrito .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Desgaste .....</b>	<b>23</b>
2.2.2.1	Mecanismos de desgaste .....	23
2.2.2.1.1	<i>Desgaste por adesão .....</i>	<i>24</i>
2.2.2.1.2	<i>Desgaste por abrasão.....</i>	<i>25</i>
2.2.2.1.3	<i>Desgaste por fadiga .....</i>	<i>27</i>
2.2.2.1.4	<i>Reação triboquímica .....</i>	<i>28</i>
2.3	NITRETAÇÃO .....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Mecanismos de endurecimento por nitretação .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2</b>	<b>A estrutura da camada nitretada.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Nitretação a plasma.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Nitretação a plasma do aço AISI D2.....</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
3.1	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS .....	36
<b>3.1.1</b>	<b>Preparação das ferramentas .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Preparação dos corpos de prova .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Nitretação a plasma.....</b>	<b>37</b>

<b>3.1.4</b>	<b>Caracterização metrológica das ferramentas .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Produção de tubos com as ferramentas.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Análise da microestrutura da camada nitretada.....</b>	<b>41</b>
3.1.6.1	Análise metalográfica.....	42
3.1.6.2	Perfil de microdureza .....	42
<b>3.1.7</b>	<b>Análise da superfície de desgaste .....</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
4.1	ANÁLISE METROLÓGICA.....	44
<b>4.1.1</b>	<b>Rugosidade.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Caracterização metrológica.....</b>	<b>46</b>
4.2	ANÁLISE DA CAMADA NITRETADA .....	48
<b>4.2.1</b>	<b>Análise metalográfica.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Microdureza.....</b>	<b>50</b>
4.3	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE.....	51
<b>4.3.1</b>	<b>Amostras sem nitretação .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Amostras com nitretação .....</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE A – AMOSTRA 1.....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE B – AMOSTRA 2 .....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE C – AMOSTRA 3.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE D – AMOSTRA 4.....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE E – AMOSTRA 5 .....</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE F – AMOSTRA 6 .....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO MATERIAL .....</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO B – GRÁFICO TÊMPERA .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO C – CERTIFICADO NITRETAÇÃO .....</b>	<b>84</b>
	<b>ANEXO D – GRÁFICOS DO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A conformação de tubos é um processo de deformação plástica na qual uma chapa plana é conformada progressivamente, até tomar a forma tubular desejada e posteriormente ser soldada em seu sentido longitudinal. As aplicações desses tubos são as mais variadas, principalmente nas indústrias de construção civil, moveleiras, automotivas e mecânicas.

Os tubos podem ser produzidos em uma variada gama de matérias-primas (tipo de aço utilizado), que são normalmente fornecidas segundo especificações ASTM, DIN, AISI, SAE, ABNT e outras. A matéria-prima utilizada é comprada em forma de bobinas, que são classificadas em três grandes grupos: BF (bobina laminada a frio), BQ (bobina laminada a quente) e BZ (bobina zincada). As espessuras da matéria-prima utilizada variam normalmente de 0,30 a 6,35 mm.

As máquinas utilizadas para produção de tubos são conhecidas como formadoras de tubos. Essas formadoras podem produzir uma gama extensa de produtos, com variadas formas, dimensões e espessuras de material. Os perfis de tubos mais produzidos e comercializados são os redondos, quadrados, retangulares e oblongos. Em casos especiais pode ser estudada a viabilidade da fabricação de ferramentais para produção de outras geometrias de tubos.

As ferramentas utilizadas no processo de conformação de tubos requerem um ótimo desempenho com relação à resistência ao desgaste. Os aços utilizados para fabricação dessas ferramentas são os aços ferramenta para trabalho a frio, da série D (*Die Steels*) de alto teor de cromo e carbono, que têm como principais características elevada dureza e resistência ao desgaste. O aço AISI D2 é o mais popular da série D, e o mais utilizado na fabricação de ferramentais para conformação de tubos.

Um problema recorrente em matrizes de conformação de tubos é o desgaste prematuro de ferramentas, que acaba afetando a qualidade do produto, e que conseqüentemente diminui a eficiência do processo e encurta a vida útil dessas ferramentas.

Tratamentos de modificação de superfícies são utilizados frequentemente em aços ferramenta, visando aumentar seu desempenho. Esses tratamentos são capazes de melhorar a superfície das peças elevando sua dureza, resistência à fadiga ao desgaste e à corrosão. Um tratamento bastante utilizado atualmente é a nitretação, que se trata de um processo termoquímico que consiste na introdução de nitrogênio na superfície de um aço, formando uma camada de nitretos de alta dureza e resistência ao desgaste.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi selecionado um ponto crítico de desgaste dos ferramentais utilizados na conformação de tubos. Esse ponto é conhecido como etapa de

cabeça turca. Nesse estágio ocorre a transformação de tubos redondos em tubos quadrados ou retangulares.

Para avaliação do desgaste causado nas ferramentas na etapa de cabeça turca, foram utilizadas ferramentas fabricadas em aço AISI D2 com tratamento térmico de têmpera e triplo revenimento, conjuntamente com ferramentas com tratamento adicional de nitretação a plasma. Isso possibilitou uma quantificação da eficiência da nitretação com relação ao desgaste.

Os ensaios propostos foram realizados na empresa Panatlântica Tubos S.A. localizada em Caxias do Sul - RS.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho foi motivado devido às crescentes exigências nas indústrias de conformação de tubos por maior produtividade e desempenho das ferramentas utilizadas. Cada vez mais as empresas procuram por ferramentas mais eficientes e adequadas aos seus processos.

Os ferramentais utilizados no processo de conformação de tubos têm um custo bastante elevado de fabricação e na grande maioria dos casos, as empresas optam por ter apenas um ferramental para produção de cada de tubo, ou seja, não possuem reposição. Em caso de problemas com um ferramental são gerados grandes transtornos, como atrasos na entrega de pedidos, perda de vendas e diminuição da qualidade do produto entregue.

O principal problema enfrentado atualmente no processo de fabricação de tubos é o desgaste prematuro das ferramentas de conformação. Esse desgaste excessivo leva à ocorrência de problemas nos tubos, como marcas, riscos e variações dimensionais, além de diminuir o tempo de vida útil das ferramentas.

Com isso, surge a necessidade de avaliar formas de melhorar o desempenho desses ferramentais, aumentando sua resistência ao desgaste e conseqüentemente sua vida útil.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tratamento termoquímico de nitretação a plasma, em ferramentas de conformação de tubos, na diminuição do desgaste durante o processo produtivo.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão definidos abaixo:

- a) quantificar a perda de material da superfície das ferramentas com e sem nitretação;
- b) identificar os mecanismos de desgaste presentes no processo de conformação de tubos;
- c) avaliar as mudanças ocorridas na superfície das ferramentas após a aplicação da nitretação a plasma;
- d) avaliar a composição microestrutural da camada nitretada obtida no aço AISI D2.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONFORMAÇÃO DE TUBOS

Halmos (2006, pg. 22) define a conformação de tubos como um processo de dobragem contínua que consiste na passagem de uma chapa plana por múltiplos pares de rolos, onde a chapa progressivamente vai tomando forma tubular sem alteração de sua espessura e a temperatura ambiente. O processo tem grande flexibilidade pois podem ser conformados perfis de variadas formas e complexidade.

Bidabadi (2016, p. 2) comenta que a proporção de deformação da chapa deve ser distribuída de maneira uniforme em cada passagem de rolos, caso contrário, defeitos como curvatura, torção e flambagem de borda, entre outros, são propensos a aparecer.

Braga (2004, p.3) divide o processo de conformação de tubos nas etapas a seguir.

#### 2.1.1 Desbobinamento

É o início da fabricação, a bobina de aço é desenrolada e tem sua extremidade soldada com a bobina anterior, mediante a soldagem MIG ou TIG, e assim sucessivamente, formando uma única tira que alimentará toda a linha de tubos.

Após o desbobinamento pode ou não haver a etapa de acúmulo de fitas, realizada com objetivo de armazenar o maior volume possível de material, de modo a evitar a parada da linha durante a emenda de fitas para formação da tira contínua. A figura 1 ilustra esses processos.

Figura 1 - Desbobinamento e acúmulo de fitas



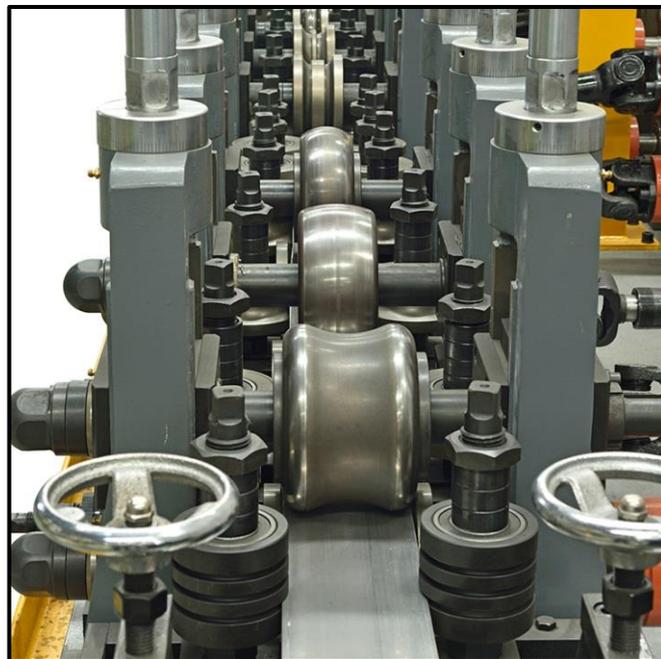
Fonte: Olimpia Tube Mills (2018).

### 2.1.2 Formação

É onde ocorre a entrada da chapa na linha, trata-se da etapa mais importante do processo, pois é onde ocorrem as maiores deformações plásticas do material. A formação é dividida normalmente em dois estágios o *Break Down* e o *Fin Pass*, sendo estes constituídos geralmente de 5 e 3 pares de rolos cada um, respectivamente. Além destes, entre os pares de rolos existem os rolos laterais.

As figuras 2 e 3, exemplificam essa etapa e os estágios que a constituem:

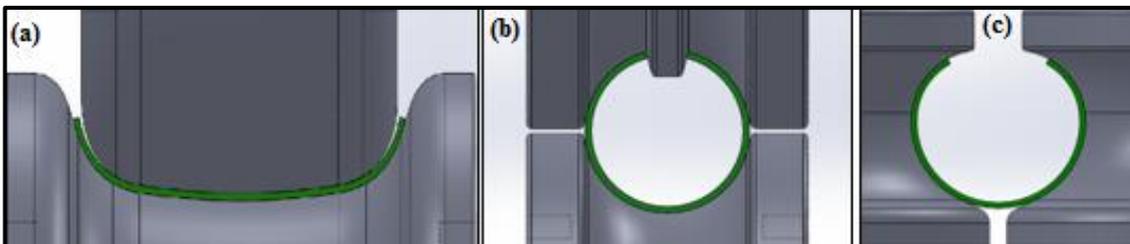
Figura 2 - Formação



Fonte: Olimpia 80 Tube Mills (2018).

Figura 3 - Estágios da formação

(a) *Break Down*; (b) *Fin Pass*; (c) Rolos laterais



Fonte: O autor (2018).

- a) *Break Down*: é onde ocorre a entrada da chapa plana e tem-se o início da deformação. Tem como principais funções o tracionamento da chapa, a formação das bordas e do perfil circular do tubo, é composto por cinco pares de rolos;

- b) *Fin Pass*: estágio que sucede o *Break Down*. Tem como principal objetivo alinhar as bordas da chapa para a soldagem, sendo constituído de 3 pares de rolos;
- c) Rolos laterais: não causam deformação plástica na chapa, funcionam como guias para entrada do tubo no passo subsequente. Ficam localizados entre os pares de rolos do *Break Down* e do *Fin Pass*.

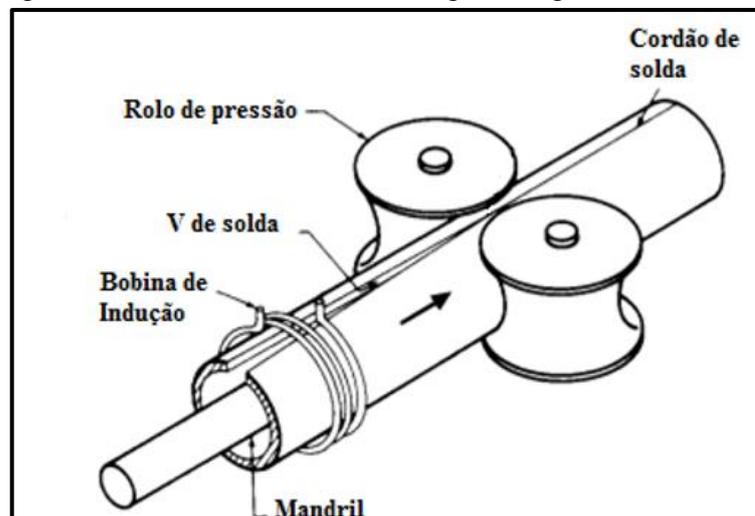
### 2.1.3 Soldagem do tubo por *HFIW*

Após a etapa de formação o tubo dever ser soldado em seu sentido longitudinal. Vários processos são utilizados para soldagem, incluindo arco de argônio, laser, plasma, resistência elétrica, contato de alta frequência. O mais utilizado é o processo de soldagem por indução de alta frequência (*HFIW*).

Segundo Modenesi e Marques (2000, p. 38) a soldagem por indução de alta frequência (*HFIW*), é frequentemente usada na fabricação de tubos de aço, devido principalmente à alta velocidade de soldagem, proporcionado um grande volume de produção.

O processo *HFIW* consiste basicamente no aquecimento das extremidades de um esboço tubular, essas extremidades formam um “V” (chamado V de solda) um pouco antes do ponto de soldagem, como mostra a figura 4. O aquecimento se dá pela corrente induzida por alta frequência, por meio de uma bobina de indução, e é suficiente para fundir as extremidades enquanto as mesmas são simultaneamente pressionadas, no ponto de soldagem, por rolos de pressão. Ocorre, então, a expulsão do metal fundido que contém impurezas e óxidos formados durante o aquecimento (SILVA, 2016, p. 13).

Figura 4 - Processo *HFIW* na soldagem longitudinal de tubos



Fonte: Adaptado de Modenesi e Marques (2000).

O aquecimento da junta tende a ser bem localizado, o que minimiza alterações no metal no ponto de soldagem, a temperatura alcança 1250°C (MODENESI e MARQUES, 2000, p. 38).

Em ensaios realizados por Alé et al. (2012), verificou-se que o processo *HFIW* deve ser evitado na soldagem de aços com alto teor de silício, pois esse elemento aumenta significativamente a resistividade do aço, reduzindo a magnitude da corrente induzida para uma mesma potência de soldagem.

Após a soldagem, os tubos passam por um tanque de resfriamento contendo óleo solúvel em água. Além do resfriamento da solda, o óleo cria uma película protetora na superfície do tubo, que evita a corrosão, podendo assim serem armazenados por períodos maiores.

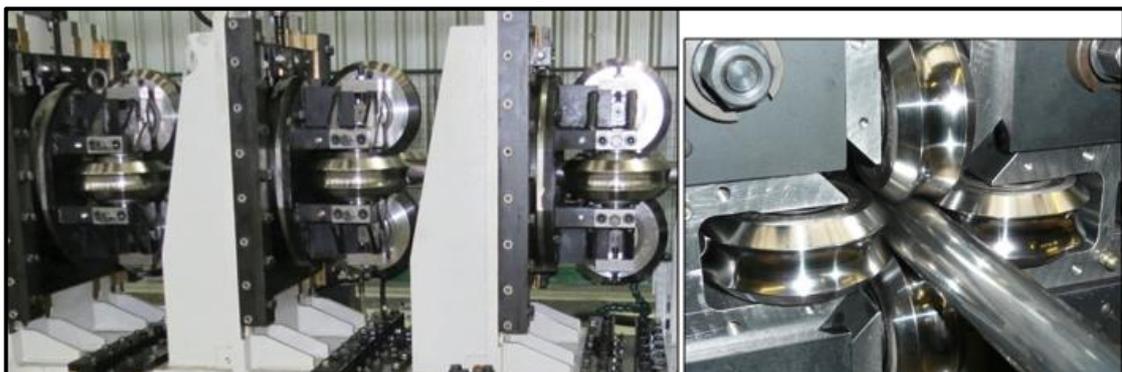
#### 2.1.4 Etapa de calibração

Após a soldagem e resfriamento do tubo, chega o estágio de calibração onde ocorrem pequenas deformações no tubo, para o acerto dimensional final. Esta etapa é responsável por deixar o tubo dentro das tolerâncias necessárias para o atendimento da norma. Normalmente esta etapa é dividida em 4 pares de rolos.

#### 2.1.5 Etapa de cabeça turca

Este é o último estágio antes do corte do tubo, sua função depende da geometria final do perfil. Em tubos circulares, a função da etapa de cabeça turca é deixar a barra de tubo retilínea e sem torções. Em tubos quadrados, retangulares ou outras geometrias que não sejam circulares, esta etapa tem a função de transformar o tubo no perfil desejado. A figura 5 ilustra essa etapa.

Figura 5 - Etapa de cabeça turca

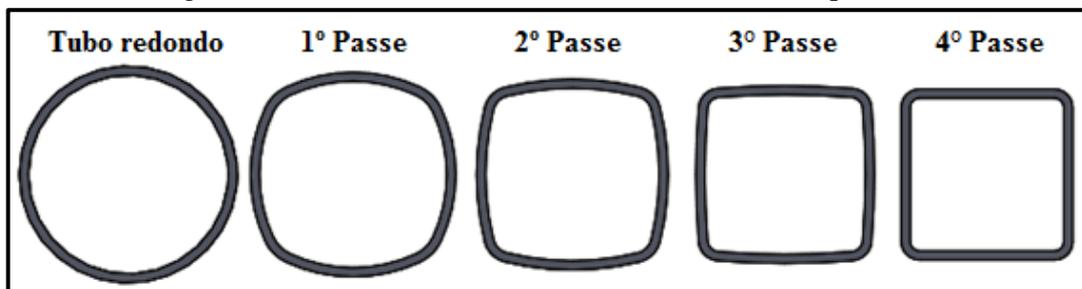


Fonte: Olimpia 80 Tube Mills (2018).

A etapa de cabeça turca é geralmente dividida em 4 conjuntos de rolos, cada conjunto é composto por dois rolos verticais e dois rolos horizontais. A homogeneidade percentual de deformação entre os passes de rolos é muito importante nesta etapa, pois evita o aparecimento de defeitos superficiais na peça. A figura 6 mostra progressivamente os perfis de um tubo redondo sendo transformado em um tubo quadrado.

O tubo de perfil circular é deformado pelos 4 passes de rolos sucessivos até chegar ao perfil desejado. Este estágio se caracteriza por uma pressão de contato entre as ferramentas de conformação e o tubo, levando a um maior desgaste das ferramentas quando comparadas com outras de diferentes estágios.

Figura 6 - Tubo redondo transformado em um tubo quadrado



Fonte: O autor (2018).

Após a etapa de cabeça turca chega o estágio de corte, onde o tubo é separado em barras de tamanho comercial de 6 metros ou em comprimentos especiais conforme solicitação dos clientes e disponibilidade do fabricante.

## 2.2 TRIBOLOGIA

O termo tribologia, que vem do grego *Tribo* (roçamento) e *Logos* (estudo), foi citado oficialmente pela primeira vez em maio de 1966 e pode ser definido como a ciência e a tecnologia que relaciona a interação entre superfícies com movimento relativo entre si (SINATORA, 2005, p. 2).

A tribologia estuda o atrito, o desgaste, a lubrificação e suas interações. No estudo da tribologia, percebe-se que a resistência ao desgaste e a força de atrito não são dependentes apenas dos materiais envolvidos e suas composições. Essas medidas são afetadas também pelas condições de trabalho, ambiente, rugosidade superficial, presença de óxidos, lubrificantes ou abrasivos e o tipo de desgaste envolvido. Sendo assim, é necessário especificar um sistema de

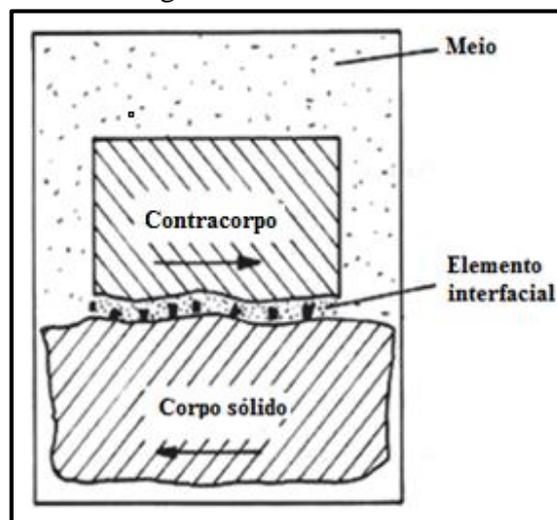
modo a delimitar o campo de validade das propriedades tribológicas. A este sistema atribui-se o nome de Tribossistema ou Sistema Tribológico.

De acordo com a norma DIN 50320 (1979, p. 2), um sistema tribológico ou tribossistema é composto por 4 elementos: o corpo sólido, o contracorpo, o elemento interfacial e o meio.

O contracorpo pode ser um sólido, um líquido, um gás ou uma mistura desses. Já os lubrificantes e partículas presentes na região de contato, atuam como elemento interfacial. Em casos especiais, o elemento interfacial pode estar ausente.

A figura 7 mostra, de forma simplificada, o tribossistema geral de acordo com a norma DIN 50320 (1979, p. 2). A estrutura do tribossistema é determinada pelos elementos que o constituem, suas propriedades e interações entre eles.

Figura 7 - Tribossistema



Fonte: Adaptado de Norma DIN 50320 (1979).

O estudo das propriedades tribológicas das superfícies é fundamental em inúmeras aplicações industriais. O desenvolvimento de técnicas de tratamento superficial, visando melhorar as propriedades de superfície dos materiais é essencial. Esses tratamentos permitem transformar materiais metálicos convencionais em materiais com propriedades especiais e específicas para cada aplicação.

### 2.2.1 Atrito

Leonardo da Vinci (1452 – 1519) foi um dos primeiros estudiosos da tribologia, deu importantes contribuições no entendimento dos fenômenos envolvidos nos sistemas

tribológicos. Formulou alguns dos princípios do atrito em seus estudos. Mostrou que as forças de atrito eram dependentes da força normal ao deslizamento de corpos e do grau de acabamento das superfícies em contato e independentes da área de contato. Investigou a influência do lubrificante na redução do atrito. Além de introduzir o coeficiente de atrito como sendo proporcional a força normal (ZUM-GAHR, 1987, p.1).

Aproximadamente dois séculos depois, independentemente dos estudos realizados por Da Vinci, Guillaume Amontons (1663 - 1705) apresentou os seus resultados experimentais e interpretações sobre o atrito e definiu a primeira e segunda lei de atrito aceitas atualmente (MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011, p. 4):

- a) primeira lei: A força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada.
- b) segunda lei: A força de atrito é independente da área de contato aparente.

Além disso, mostrou que o uso de lubrificantes, como a gordura de porco, formava uma camada que impedia o contato entre os corpos, independente do material dos corpos (ZUM-GAHR, 1987, p.1).

A terceira lei do atrito é atribuída a Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806) (SINATORA; TANAKA, 2007, p. 34):

- c) terceira lei: A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

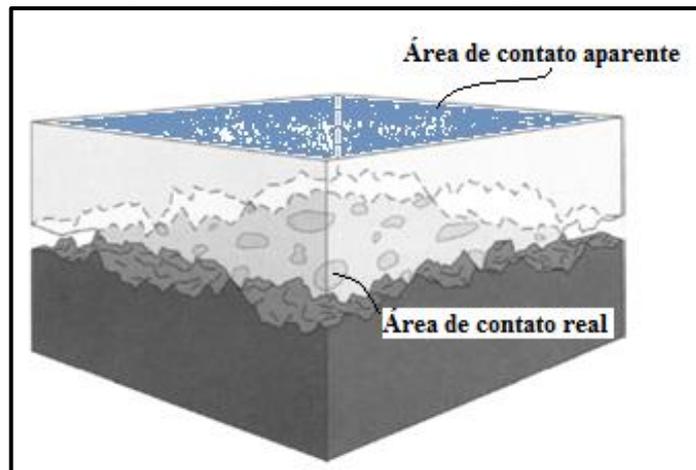
O atrito é definido por Hutchings e Shipway (2017, p. 37) como a resistência encontrada por um corpo ao deslizar sobre outro corpo.

Stachowiak e Batchelor (2005, p. 483) definem o atrito como a dissipação de energia entre os corpos deslizantes.

A maioria das superfícies, até as que são polidas, são extremamente rugosas na escala micrométrica. As irregularidades presentes nessas superfícies são denominadas asperezas.

Quando duas superfícies planas e paralelas se aproximam, tem-se a percepção que o contato ocorre em toda a superfície, porém essa área de contato é aparente, pois, o contato ocorre inicialmente em apenas alguns picos das asperezas dessas superfícies, esse é o contato real entre as superfícies, a figura 8 ilustra duas superfícies em contato. À medida que a força normal é aumentada, as superfícies se aproximam mais e há um aumento do número de asperezas em contato. Isso provoca um aumento da pressão nessas áreas levando a deformação plástica e à ocorrência de microsoldas nesses pontos. Essas uniões oferecem resistência ao cisalhamento dando origem as forças de atrito entre as superfícies (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017, p.18).

Figura 8 - Regiões de contato superficial



Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor (2005).

## 2.2.2 Desgaste

A norma DIN 50320 (1979, p. 1) define desgaste como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é, o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um outro corpo sólido, líquido ou gasoso.

Segundo Zum-Gahr (1987, p. 4) desgaste não é uma propriedade intrínseca do material, mas sim uma característica do sistema tribológico. Raramente é catastrófico, mas reduz a eficiência operacional. Isso pode resultar em mudanças dimensionais de componentes ou danos superficiais e causar problemas secundários, como vibração ou desalinhamentos.

### 2.2.2.1 Mecanismos de desgaste

Existe na literatura uma série de mecanismos diferentes que definem o desgaste. Segundo a norma DIN 50320 (1979, p. 6), nos processos de desgaste estão envolvidos basicamente quatro mecanismos ou uma combinação deles. Estes mecanismos são:

- a) Adesão: formação e posterior rompimento das ligações adesivas. Por exemplo, juntas soldadas a frio.
- b) Abrasão: remoção de material por riscamento, produzido por partículas duras que são forçadas e se movimentam contra uma superfície sólida.
- c) Fadiga: fadiga mecânica e formação de trincas superficiais devido a tensões cíclicas nas superfícies em contato por deslizamento ou rolamento que resultam na remoção do material.

- d) Reação triboquímica: formação de produtos de reações químicas resultantes da interação química entre os elementos do tribossistema.

Segundo Zum-Gahr (1987, p. 111), o tipo de desgaste predominante em cada tribossistema depende dos elementos envolvidos e das condições de funcionamento deste tribossistema. Na maioria das situações, diferentes mecanismos de desgaste ocorrem simultaneamente, e um pode levar a ocorrência de outro.

A deformação plástica geralmente não é considerada um mecanismo de desgaste, mas desempenha um papel importante em muitos processos de desgaste (ZUM-GAHR, 1987, p. 86).

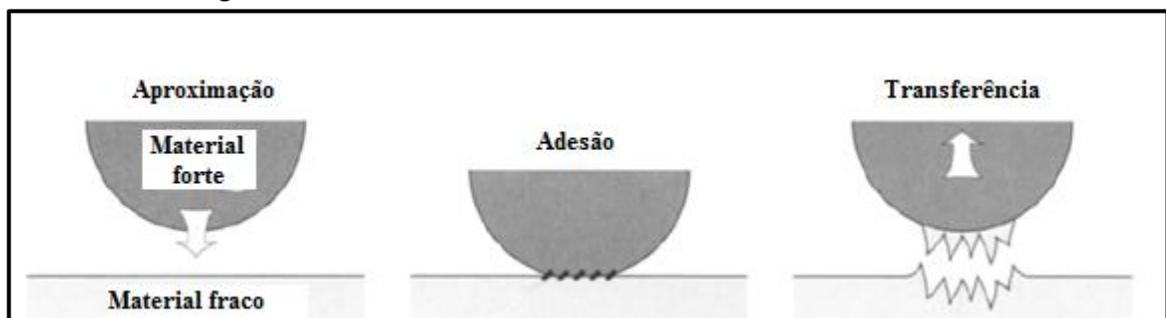
#### 2.2.2.1.1 Desgaste por adesão

Zum-Gahr (1987, p. 87) define desgaste por adesão como o resultado de altas pressões de contato entre as asperezas de duas superfícies em deslizamento relativo, que produzem a transferência de material entre as superfícies.

O desgaste adesivo pode ocorrer quando uma superfície desliza sobre outra e está relacionado com o contato e interação entre as asperezas das duas superfícies. Nessas situações, geram-se forças de atração nos pontos de contato das asperezas. Como a área de contato nas asperezas é muito pequena, desenvolvem-se localmente altas pressões de contato que provocam deformação plástica, adesão e conseqüentemente a formação de junções localizadas, na figura 9 é mostrado o processo de adesão e transferência de metal entre superfícies.

O deslizamento relativo das duas superfícies em contato provoca a ruptura dessas junções, dependendo das condições superficiais, temperatura de contato, características de encruamento, geometria local e distribuição de tensões, a junção poderá ser rompida. Caso o rompimento ocorra em outro local que não a interface original, uma partícula de uma superfície é transferida para a outra superfície, dando início ao processo de desgaste por adesão.

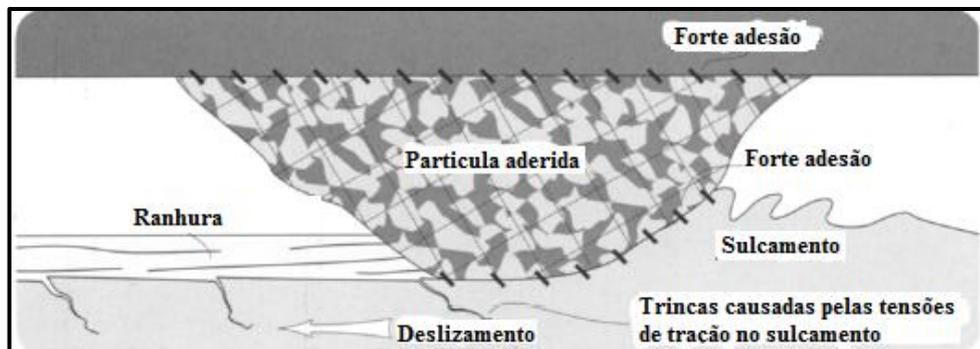
Figura 9 - Processo de transferência de metal devido à adesão



Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor (2005).

As partículas de desgaste arrancadas ficam aderidas as superfícies e acabam se somando com outras partículas, que podem ser do mesmo material, do material do contracampo ou até mesmo componentes do meio interfacial. Com isso ocorre um aumento do tamanho da partícula e forma uma espécie de liga metálica dos dois metais, conforme ilustrado na figura 10. À medida que isso ocorre, a partícula sofre encruamento e oxidação e torna-se achatada. Essa partícula que permanece aderida a superfície do material acaba provocando a formação de microrranhuras devido ao sulcamento da superfície do material. Esse sulcamento pode levar a formação de trincas devido à altas tensões de tração que são desenvolvidas no ponto de contato.

Figura 10 - Mecanismo de formação de ranhuras produzidas por partículas encruadas



Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor (2005).

Para Stachowiak e Batchelor (2005, p. 553), o desgaste adesivo é caracterizado por altas taxas de desgaste e coeficiente de atrito instável, uma das formas de reduzi-lo é mediante o aumento da rugosidade superficial ou da dureza dos corpos em contato.

#### 2.2.2.1.2 Desgaste por abrasão

No desgaste abrasivo, o material é removido ou deslocado de uma superfície por partículas duras, ou às vezes por protuberâncias duras que são forçadas e se movem contra uma superfície sólida (HUTCHINGS; SHIPWAY 2017, p.165).

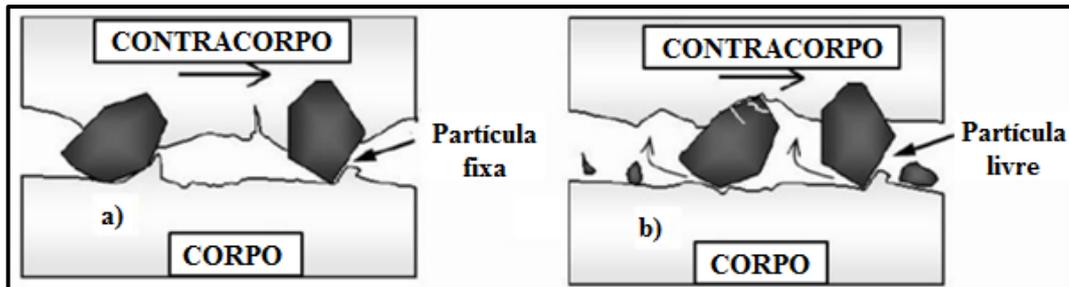
O desgaste por abrasão é causado pela interação mecânica de saliências grosseiras ou partículas de dureza elevada contra as superfícies de trabalho, provocando perda de massa por corte ou por arrancamento (SUSKI, 2004, p. 17).

Hutchings e Shipway (2017, p. 165) destacam que conforme a forma de atuação da partícula, o desgaste abrasivo é normalmente classificado em dois e três corpos, dependendo, respectivamente, se o abrasivo é fixo ou livre entre as duas superfícies, a figura 11 ilustra essas duas formas de desgastes abrasivo.

A abrasão de dois corpos é causada por protuberâncias duras na superfície ou por partículas duras ligadas a ela, já na abrasão de três corpos as partículas duras estão livres para rolar e deslizar entre as superfícies.

Figura 11 - Tipos de desgaste abrasivo

a) desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos



Fonte: Adaptado de Gates (1998).

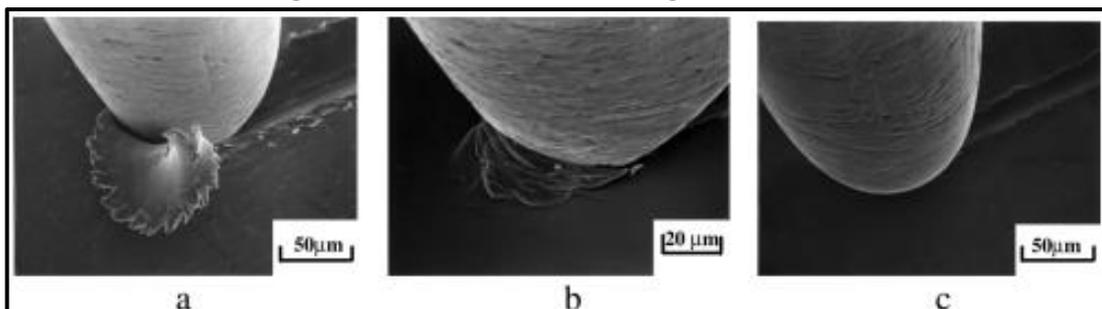
Hutchings e Shipway (2017, p. 174) classificam os mecanismos causadores do desgaste abrasivo, como fratura frágil e deformação plástica.

Na fratura frágil, o trincamento ocorre em contatos repetidos das partículas duras, que concentram tensões maiores que o limite de resistência do material. Grandes fragmentos de material são arrancados da superfície devido a formação e propagação de trincas.

Os mecanismos envolvidos na deformação plástica são ilustrados na figura 12:

- a) Microcorte: a grande profundidade de penetração faz com que as tensões sejam elevadas a ponto de causar ruptura do material mais mole, resultando na remoção do material na forma de cavaco. Torneamento é um exemplo de abrasão por corte.
- b) Formação de proa: ocorre deslocamento de material para a frente do abrasivo além de deslocamento lateral.
- c) Sulcamento: o material sofre uma pequena deformação plástica e o abrasivo desloca o material lateralmente, não há remoção de material.

Figura 12 - Mecanismos de desgaste abrasivo



Fonte: Hokkirigawa; Kato (1988).

Segundo Zum-Gahr (1987, p. 98), o sulcamento e o microcorte são os mecanismos dominantes quando se trata de desgaste abrasivo de materiais dúcteis. A proporção de material que é deslocado lateralmente pelo sulcamento ou removida pelo corte depende do ângulo de ataque da partícula abrasiva. Ângulos pequenos favorecem a ocorrência de sulcamento, enquanto ângulos maiores causam desgaste por microcorte.

### 2.2.2.1.3 Desgaste por fadiga

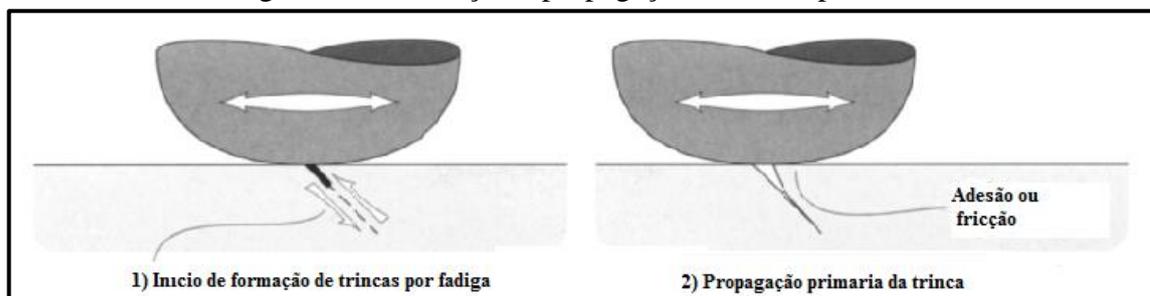
O desgaste devido a fadiga pode ser caracterizado pela formação de trincas e posterior lascamento do material, provocado pelo carregamento cíclico e repetitivo de superfícies sólidas. Esses carregamentos podem ser resultantes de rolamento ou impacto de sólidos e/ou líquidos na superfície.

Na fadiga por rolamento são propostos dois mecanismos para a formação de lascamentos superficiais: as trincas por compressão e as subsuperficiais, as figuras 13 e 14 ilustram estes fenômenos.

Segundo Zum-Gahr (1987, p. 101), trincas por compressão são causadas por alta tensão de compressão na área de contato. As trincas na superfície sólida iniciam em inclusões superficiais, endentações de processos produtivos, endentações causadas pelas partículas de desgaste ou algo que concentre as tensões na superfície do material. As trincas iniciadas na superfície do material propagam-se inclinadas em relação a superfície do material.

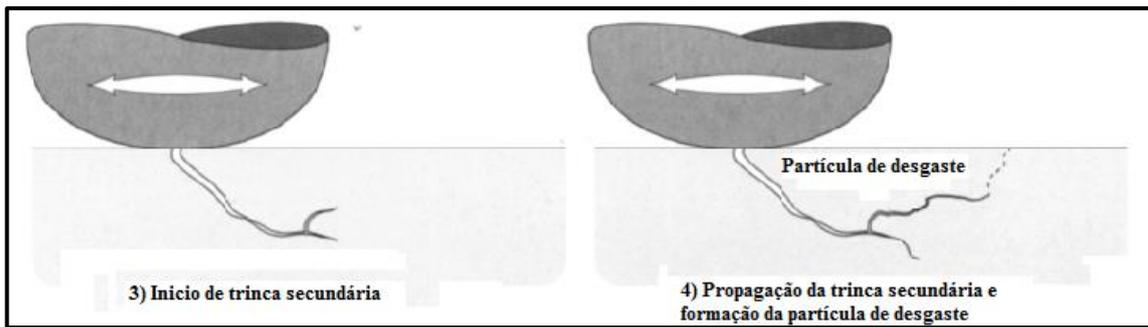
As trincas subsuperficiais ocorrem principalmente em contatos sobrecarregados onde são formadas trincas nas zonas de deformação plástica, logo abaixo da superfície resultando em seu lascamento (SUSKI, 2004, p. 22).

Figura 13 - Formação e propagação de trinca primária



Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor (2005).

Figura 14 - Formação de trinca secundária e ruptura de partícula de desgaste



Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor (2005).

Uma trinca se forma e se propaga na superfície do material podendo atingir a região subsuperficial. Então pode ocorrer o aparecimento de uma trinca secundária, junto à trinca inicial, que se propagará e, caso chegue à superfície, levará à ruptura de parte do material originando uma partícula de desgaste.

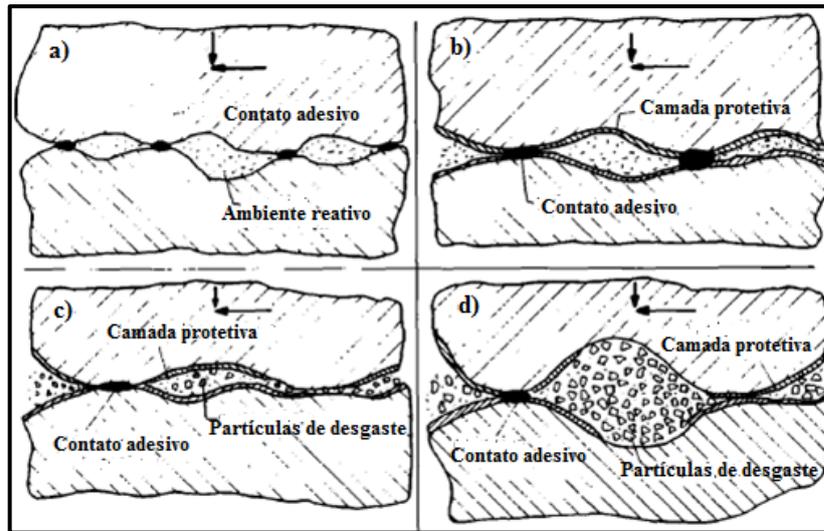
#### 2.2.2.1.4 Reação triboquímica

Zum-Gahr (1987, p 104) define o desgaste triboquímico como aquele caracterizado pelo contato entre duas superfícies sólidas em um ambiente corrosivo que pode ser líquido ou gasoso. O processo de desgaste ocorre por formação e remoção contínua da camada de reação na superfície de contato. Na presença de oxigênio, os fragmentos de desgaste consistem basicamente de óxidos, os quais são formados sobre as superfícies e são removidos devido ao deslizamento relativo entre as superfícies.

Zum-Gahr (1987, p 105) divide o mecanismo de desgaste triboquímico em 4 categorias, conforme ilustrado na figura 15.

- a) contato metálico entre as rugosidades das superfícies, que geram uma remoção de metal devido à adesão;
- b) reações químicas dos metais com o ambiente que resultam em camadas protetivas superficiais e reduzem o contato metálico;
- c) trincamento de camadas protetivas superficiais devido à alta pressão local ou microfadiga resultando em fragmentos não-metálicos de desgaste;
- d) fragmentos metálicos e não metálicos podem agir abrasivamente e desgastar as superfícies de contato. Novas formações e deslocamentos de camadas protetivas superficiais podem levar a um maior desgaste.

Figura 15 - Categorias de desgaste triboquímico



Fonte: Adaptado de Zum-Gahr (1987).

Os danos superficiais e perdas de massa são causados pela repetida ocorrência desses diferentes processos. O desgaste triboquímico é fortemente influenciado pela cinética da formação de camadas superficiais e as propriedades que determinam a resistência à remoção. O desgaste por reação triboquímica é atenuado em casos que a camada de reação produzida e o substrato são de durezas próximas ZUM-GAHR (1987, p 104).

### 2.3 NITRETAÇÃO

A nitretação é um processo de introdução superficial de nitrogênio na superfície do aço formando uma camada dura de nitretos. As temperaturas utilizadas no processo são relativamente baixas, não ocorrendo transformação de fase, o que minimiza distorções microestruturais no material (SILVA; MEI, 2010, p. 171).

O endurecimento superficial é promovido pelo nitrogênio, que se difunde a partir da superfície das peças para o seu interior, reagindo com os elementos contidos nos aços e formando nitretos de elevada dureza e resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 2003, p. 129).

Os principais objetivos na nitretação são produzir superfícies de alta dureza, resistência ao desgaste, melhorar a resistência à fadiga e a corrosão.

Atualmente são empregados três diferentes meios de nitretação, são eles: nitretação a gás, nitretação iônica ou a plasma e nitretação líquida ou banho de sais.

A nitretação a gás utiliza a amônia como meio para difundir o nitrogênio na superfície do metal. Nesse processo, a nitretação é realizada numa atmosfera de amônia numa temperatura

de 500 a 565°C. A amônia, nessas condições, dissocia-se parcialmente na superfície da peça liberando assim o nitrogênio nascente (ALVES JR., 2001, p. 71).

Na nitretação líquida o meio nitretante é uma mistura de sais, o banho típico é composto de sais de sódio e potássio. Em relação aos outros processos, a nitretação líquida tem a vantagem de necessitar de um menor tempo de tratamento (CHIAVERINI, 2003, p. 132).

A nitretação a plasma é geralmente feita em atmosferas contendo H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> em baixas pressões. A diferença de potencial induzida entre o cátodo (peça) e o ânodo (carcaça do reator) favorece a ionização do gás formando o plasma (CHIAVERINI, 2003, p. 136).

### **2.3.1 Mecanismos de endurecimento por nitretação**

Os dois principais mecanismos de endurecimento superficial do processo de nitretação são o endurecimento por solução sólida e o endurecimento por precipitação.

O endurecimento por solução sólida segundo Dieter (1998, p. 183), ocorre devido a introdução de átomos de soluto em solução sólida em uma rede de átomos solventes, produzindo uma liga mais forte que o metal puro. Dependendo da relação entre o tamanho dos átomos de soluto e solvente, ocorrem dois tipos de solução sólida, intersticial e substitucional. No caso da nitretação, os átomos de nitrogênio são significativamente menores que os do solvente ocasionando a solução sólida intersticial.

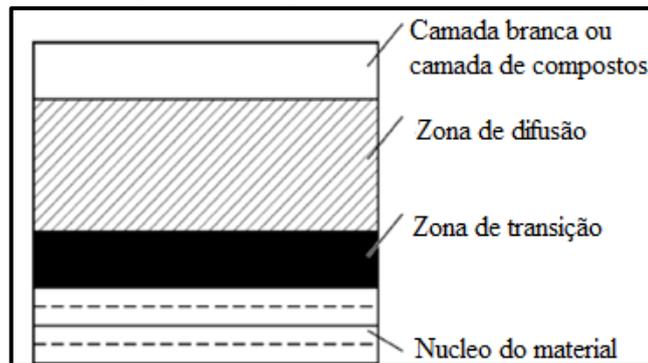
### **2.3.2 A estrutura da camada nitretada**

A estrutura da camada nitretada, mostrada na figura 16 é formada por uma camada de compostos também conhecida como camada branca, uma zona de difusão e a zona de transição.

A camada branca se localiza no topo da estrutura, é formada basicamente por nitretos e carbonitretos, possui altíssima dureza e grande fragilidade, possui propriedades que podem ser comparadas às da cerâmica. A espessura da camada branca é determinada pelo tempo, temperatura, composição química do aço e composição gasosa do processo, representando, em geral, menos de 10% do tamanho da camada nitretada total (PYE D. 2006, p. 487).

Segundo Gobbi (2009, p. 27) as melhorias tribológicas e de resistência a corrosão dos materiais depende da espessura, uniformidade, composição de fases e microestrutura da camada branca. O aumento do potencial de nitrogênio no decorrer do processo de nitretação favorece a formação da camada de compostos, devido à disponibilidade de átomos de nitrogênio acima do limite de solubilidade na matriz de ferro.

Figura 16 - Típica camada nitretada



Fonte: Adaptado de Pye (2006).

A zona de difusão está localizada logo abaixo da camada branca. Nessa região, uma parte do nitrogênio fica dissolvida nos interstícios da ferrita, provocando o endurecimento por solução sólida e a outra parte forma nitretos de ferro levando ao endurecimento por precipitação (SILVA; MEI, 2010, p. 180). Os precipitados formados são fases de elevada dureza, e sua precipitação provoca uma distorção na rede cristalina, o que promove um maior efeito em aumento de resistência.

A zona de transição é a camada intermediária entre a zona de difusão e o núcleo do material, que não é afetado pela nitretação, nessa zona ocorre apenas o mecanismo de endurecimento por solução sólida.

Uma menor espessura de camada branca com uma zona de difusão subjacente é a combinação desejada para a maioria das aplicações da nitretação. A dureza e a profundidade da camada nitretada estão diretamente ligadas a quantidade de elementos formadores de nitretos. Via de regra, quanto maior a quantidade de elementos de liga, maior será a dureza e menor a profundidade da camada nitretada (FROEHLICH, 2003, p.38).

Silva et. al. (2017), estudaram a influência da geometria de peças de ferragens metálicas utilizadas nas redes de distribuição e transmissão de energia elétrica nitretadas a plasma, em relação a formação da camada nitretada, e concluíram que a geometria interfere significativamente na qualidade da formação da camada nitretada. Em peças com geometria simples e pequena dimensão a camada tende a ser mais homogênea.

### 2.3.3 Nitretação a plasma

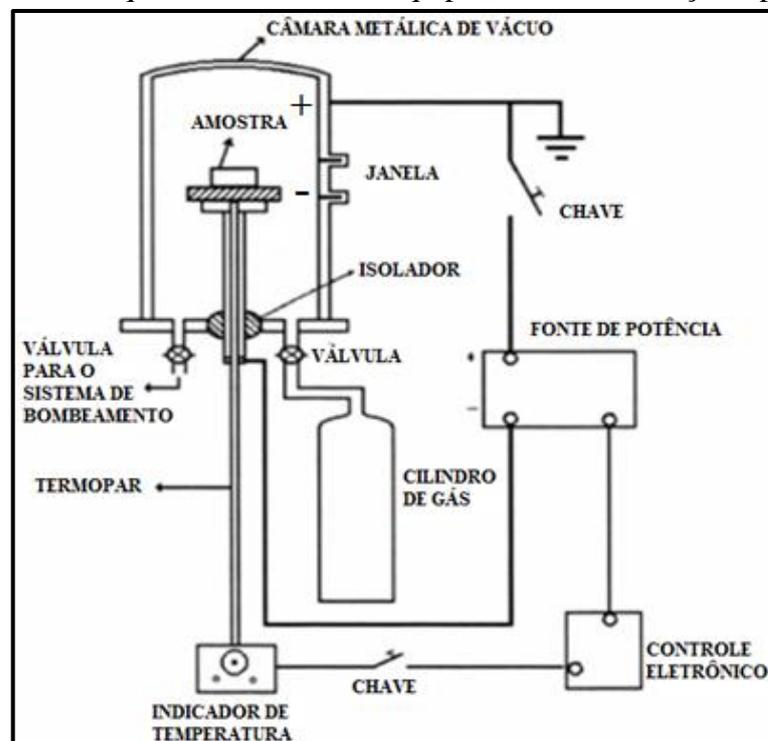
A nitretação a plasma foi patenteada em 1931 por J.J. Egan nos EUA e em 1932 por Berghaus na Alemanha, mas somente em 1960 teve início seu uso comercial (ALVES JR., 2001, p. 5).

Trata-se de um processo de endurecimento superficial de natureza química no qual o nitrogênio se combina com o ferro e outros elementos de liga dos aços. O processo provoca um impacto de átomos de nitrogênio na superfície do aço, provocando o aquecimento da peça e absorção do nitrogênio pelo material.

O método de nitretação iônica é um processo físico-químico ativado não só pelo efeito da temperatura, mas também pela ação cinética dos íons acelerados contra o substrato (GOBBI, 2009, p. 46).

A figura 17 ilustra um equipamento de nitretação a plasma.

Figura 17 - Esquema básico de um equipamento de nitretação a plasma



Fonte: Adaptado de Froehlich (2003).

Os componentes a serem nitretados são colocados em uma câmara metálica, onde uma atmosfera nitretante, em geral misturas de  $N_2$  e  $H_2$ , a baixa pressão 133 a 1333 Pa (1 a 10 Torr), é ionizada por meio da aplicação de uma diferença de potencial elétrico de 350 a 1000 Volts, entre dois eletrodos imersos no reator. A peça que passará pelo processo fica acoplada ao cátodo (-), e as paredes da câmara funcionam como ânodo (+).

Dessa forma, por meio de uma descarga elétrica, é gerado e mantido o plasma, por meio do qual íons são acelerados pelo campo elétrico e bombardeiam a peça com considerável energia cinética.

Quando uma determinada diferença de potencial é aplicada entre dois eletrodos, posicionados dentro de uma mistura gasosa em condições de temperatura e pressão específicas, pode ocorrer a geração de uma descarga brilhante “*glow discharge*”, que determina a ocorrência do plasma (PINEDO, 2000, p. 37).

Alves Jr. (2001, p. 20) cita as principais vantagens da nitretação a plasma em relação aos outros métodos de nitretação:

- a) Baixas temperaturas de tratamento: pode-se tratar as peças a partir de 300°C;
- b) Tempo reduzido de tratamento: obtém-se espessuras de camada aceitáveis num tempo máximo de 20 horas;
- c) Melhor controle da camada nitretada: estrutura da camada pode ser completamente controlada devido ao alto controle nos parâmetros de processo.
- d) Uniformidade da camada nitretada: o plasma é uniforme em toda a superfície da peça, gerando uma camada extremamente uniforme;
- e) Menor poluição: devido ao fato de utilizar gases não poluentes;

#### **2.3.4 Nitretação a plasma do aço AISI D2**

O aço AISI D2 é um dos mais utilizado na indústria metal-mecânica. Dentre suas características cabe destacar a boa combinação de propriedades mecânicas, como alta dureza, boa resistência ao desgaste, boa tenacidade e menor distorção dimensional no tratamento térmico, quando comparado a outros aços ferramenta para trabalho a frio. É utilizado em matrizes para corte, estampagem, embutimento, pentes para laminação de roscas, punções, calibres, mandris, lâminas para corte a frios e fieiras para trefilação (SILVA; MEI, 2010, p. 379).

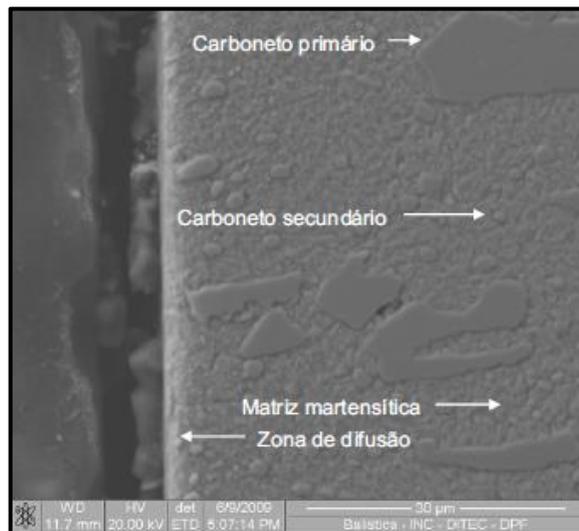
O aço AISI D2 é utilizado com tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, que aumentam muito sua performance e melhoram suas propriedades mecânicas. Ultimamente alguns trabalhos introduziram tratamentos de nitretação a plasma no aço AISI D2, após a têmpera e revenimento, visando um aumento de dureza superficial e consequentemente aumento de resistência ao desgaste.

Em estudos realizados por Gobbi (2009) foi avaliada a influência do tempo de nitretação na formação da camada nitretada, e na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2. As temperaturas utilizadas para têmpera e revenimento foram de 1050°C e 540°C, respectivamente. Na nitretação utilizou-se a temperatura de 400°C com uma pressão

de 450 Pa, e uma mistura gasosa de 80% em volume de H<sub>2</sub> e 20% de N<sub>2</sub>. Os tempos de nitretação empregados foram de 30, 60, 120, 180 e 360 min.

Na avaliação das microestruturas das amostras notou-se a ausência de camada branca em todas as condições estudadas. Na figura 18 é mostrada a micrografia da amostra nitretada por 360 min em que pode se observar uma microestrutura martensítica com carbonetos primários, secundários e uma pequena camada de difusão.

Figura 18 - Microestrutura da amostra nitretada por 360 minutos

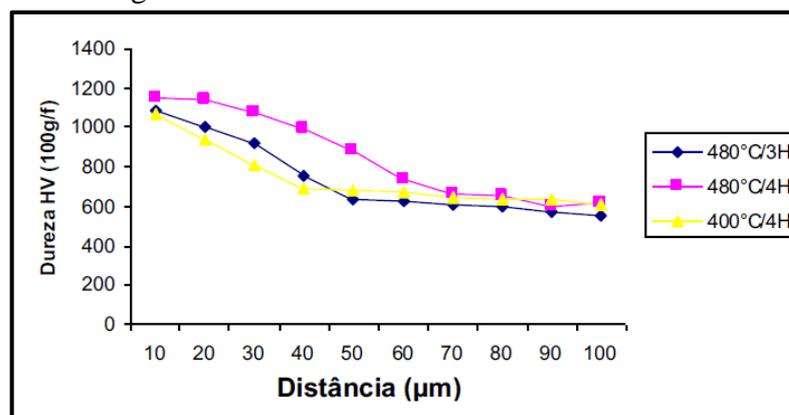


Fonte: Gobbi (2009).

Valadão (2008) avaliou o desempenho do aço AISI D2 nitretado a plasma visando aplicação industrial. As amostras foram nitretadas por 3 e 4 h, utilizando temperaturas de 400 e 480°C com composição de 80% de nitrogênio e 20% de hidrogênio.

A microdureza da camada nitretada por 4 h apresentou a maior dureza chegando próximo a 1200 HV. O perfil de microdureza é mostrado na figura 19.

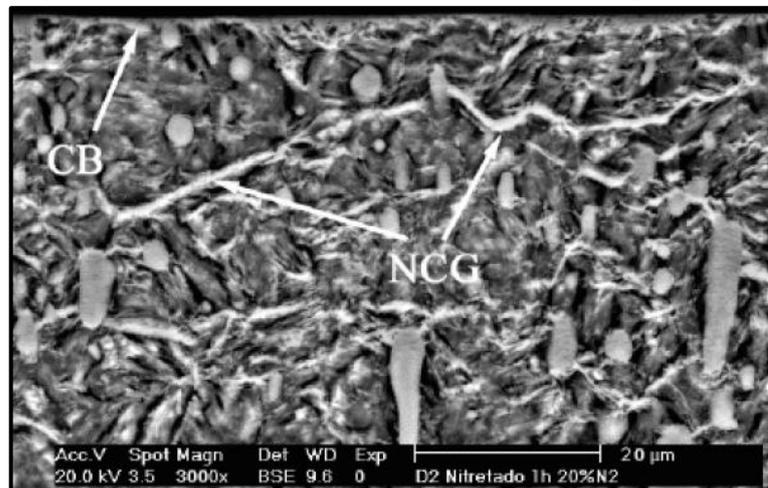
Figura 19 - Perfil de microdureza das amostras



Fonte: Valadão (2008).

Estudos realizados por Franco Jr (2003) revelam a microestrutura obtida para o aço AISI D2 submetido à nitretação a plasma, em atmosfera com 20% de N<sub>2</sub>, a 520°C e diferentes tempos de tratamento. O tratamento superficial foi realizado a partir de material austenitizado a 1080°C, por 30 min, com resfriamento em óleo e revenimento duplo a 540°C, por 2 h cada e resfriamento a ar. Para a amostra nitretada por 1 h, ilustrada na figura 20, observa-se presença de camada branca (indicada pela seta com sigla CB) com espessura irregular e não totalmente fechada. Pouco abaixo da camada branca, observa-se a presença de precipitados ao redor dos contornos de grão da austenita, indicados pela seta com sigla NCG.

Figura 20 - Microestrutura da amostra nitretada por 1 hora.



Fonte: Franco Jr (2003).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foi detalhada a metodologia utilizada para a realização dos ensaios, os materiais e equipamentos utilizados.

#### 3.1 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

##### 3.1.1 Preparação das ferramentas

Para realização dos ensaios foram selecionadas quatro ferramentas já utilizadas na produção. Como não eram ferramentas novas, foi realizada uma usinagem na superfície do perfil que entra em contato com o tubo durante a conformação. Isso garantiu um bom acabamento superficial e um dimensional correto e uniforme entre todas as peças. A usinagem foi realizada no setor de manutenção da empresa.

##### 3.1.2 Preparação dos corpos de prova

Foram utilizados dois corpos de prova de aço AISI D2 de ( $\varnothing 25,50 \times 30$  mm), fornecidos pela empresa Schmolz + Bickenbach do Brasil. O aço foi recebido no estado recozido e a composição química do material, segundo certificado do fornecedor, pode ser observada na tabela 1. No anexo A, pode ser consultado o certificado do material.

Tabela 1 - Composição química AISI D2

<b>Composição química (%)</b>							
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>
1,47	0,33	0,005	0,83	0,85	0,38	0,025	11,75

Fonte: Schmolz + Bickenbach do Brasil (2018).

Os corpos de prova foram tratados termicamente com os mesmos parâmetros utilizados nos tratamentos térmicos das ferramentas utilizadas nos ensaios.

A têmpera foi realizada na empresa Tecnovacum de Caxias do Sul, o equipamento utilizado foi um forno a vácuo da marca TAV. Utilizou-se uma temperatura de austenitização de 1080°C, seguida de um resfriamento com N<sub>2</sub> gasoso até a temperatura de 25°C. Após isso,

os corpos de prova foram submetidos a um triplo revenimento por 4 h a uma temperatura de 520°C. O anexo B, mostra o gráfico do tratamento térmico de têmpera no forno a vácuo.

### **3.1.3 Nitretação a plasma**

A nitretação a plasma, realizada em duas ferramentas e nos dois corpos de prova, foi fornecida pela empresa Plasmar Tecnologia de Caxias do Sul. Foram utilizados os seguintes parâmetros de processo:

- a) Tempo de nitretação: 10 h;
- b) Mistura gasosa: 60% hidrogênio e 40% nitrogênio;
- c) Temperatura: 500°C;
- d) Pressão: 800 Pa.

Segundo certificado do fornecedor, a dureza superficial da camada nitretada atingiu 69 HRC (1000 HV). O certificado do tratamento e os gráficos podem ser observados nos anexos C e D, respectivamente.

### **3.1.4 Caracterização metrológica das ferramentas**

Após a nitretação, foi realizada a análise metrológica dos perfis das ferramentas. Estas atividades foram realizadas no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP) da Universidade Caxias do Sul.

Os perfis das ferramentas foram medidos utilizando-se uma máquina de medição por coordenadas (MMC) Carl Zeiss, modelo Gagemax 7/7/5-HTG, com sistema operacional CNC, precisão de 0,0018 mm e dimensão de área útil de 750 x 500 x 500 mm.

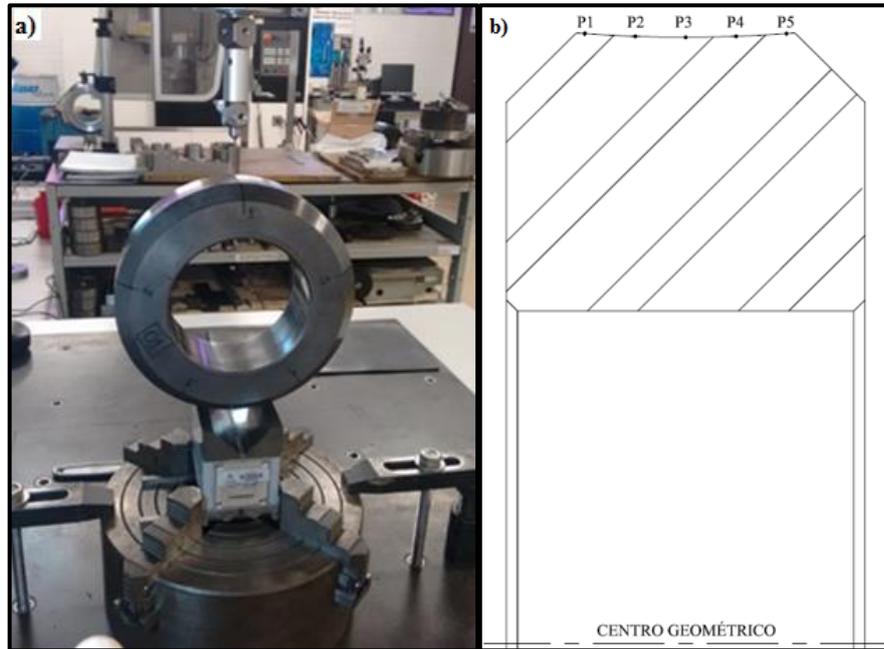
Para medição, primeiramente foi definido o centro geométrico da peça, e a partir deste centro foram obtidas as distâncias até os pontos selecionados. A medição foi realizada em cinco pontos, identificados como P1, P2, P3, P4 e P5, como mostrado na figura 21.

No total foram realizadas cinco medições ao longo do perímetro das ferramentas, com estes dados foi calculada a média aritmética, obtendo-se assim a distância do centro da ferramenta até cada ponto.

A medição de rugosidade do perfil das ferramentas foi realizada utilizando-se um rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SurfTest SJ-301. O equipamento tem capacidade de resolução de 0,01 µm, com raio de ponta do apalpador de diamante de 5 µm.

Figura 21 - Medição do perfil da ferramenta

a) Posicionamento para medição do perfil; b) Pontos de medição

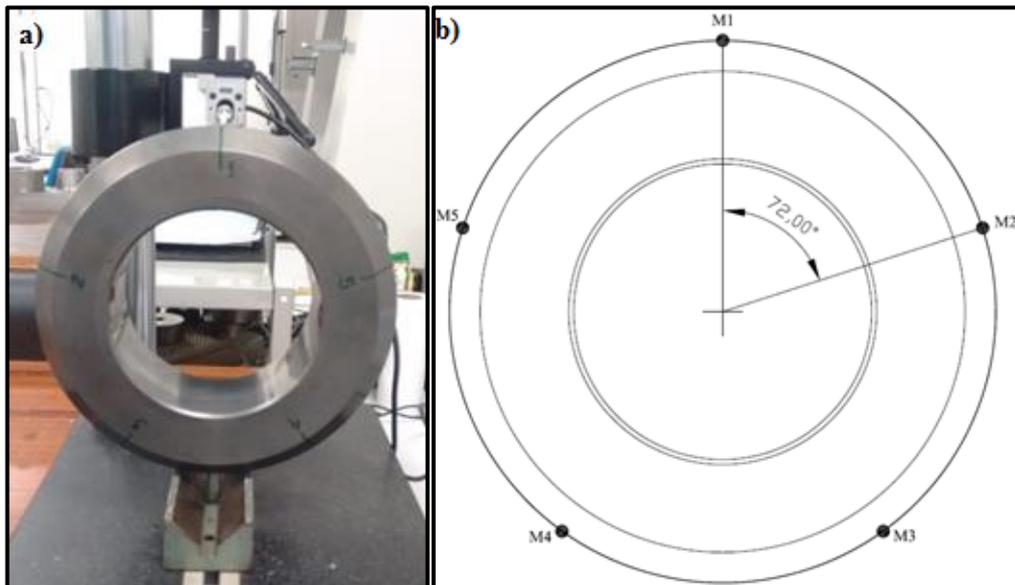


Fonte: O autor (2019).

Foram realizadas cinco medições de rugosidade do perfil das ferramentas, os pontos de medição foram distribuídos ao longo do perímetro das ferramentas separados por  $72^\circ$ , e foram identificados como M1, M2, M3, M4 e M5, como mostrado na figura 22. Após obtenção dos dados, calculou-se a média aritmética da rugosidade do perfil de cada ferramenta.

Figura 22 - Medição de rugosidade das ferramentas

a) Posicionamento para medição da rugosidade; b) Pontos de medição



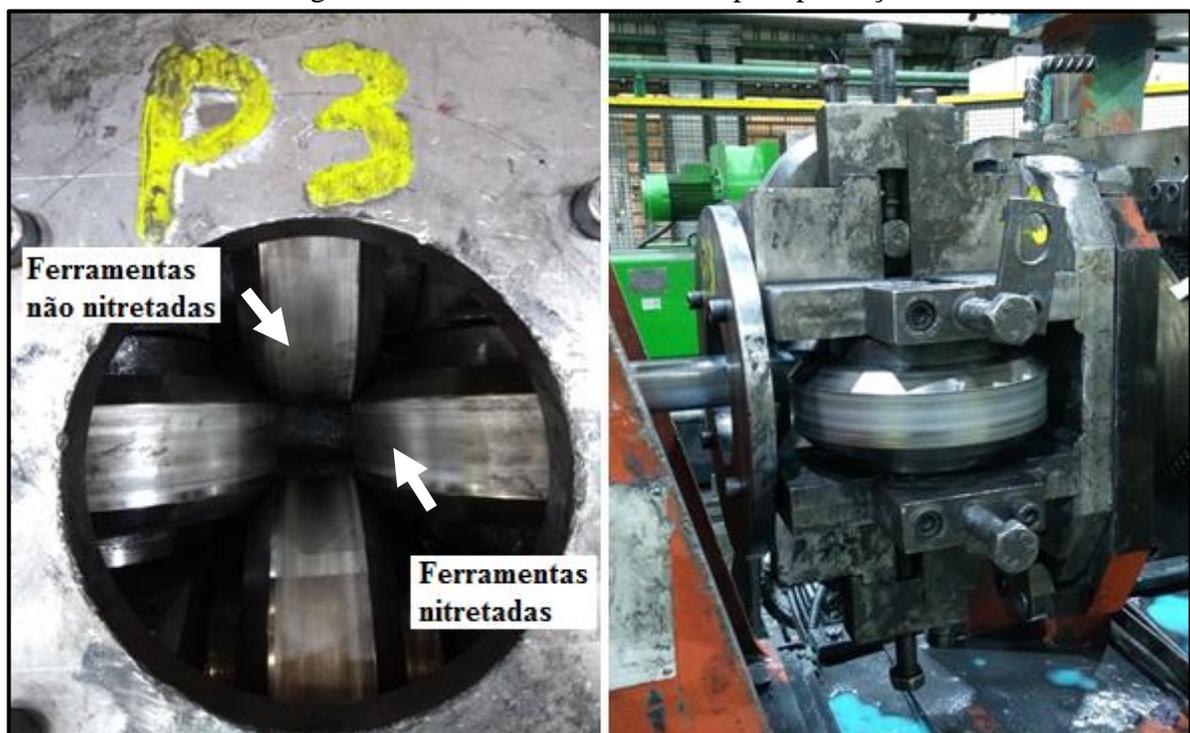
Fonte: O autor (2019).

### 3.1.5 Produção de tubos com as ferramentas

Após a caracterização metrológica dos perfis das ferramentas, iniciou-se a produção. A conformação foi realizada em uma formadora de tubos MTM 80, com capacidade de produção de tubos de  $\text{Ø}26,70$  mm até  $\text{Ø}101,60$  mm com espessuras de 1,95 mm a 4,75 mm.

Na figura 23 é mostrada como foi realizada a montagem das ferramentas em máquina para produção. Foram utilizadas duas posições de montagem para cada ferramenta. Uma delas foi montada na posição vertical e a outra na posição horizontal, com intuito de que as forças de conformação assim atuem de modo semelhante, tanto nas ferramentas nitretadas quanto nas não nitretadas. O processo foi realizado durante quatro rodadas de produção, a montagem sempre foi mantida fixa, sem alterações das posições das peças.

Figura 23 - Ferramentas montadas para produção



Fonte: O autor (2019).

O tubo produzido durante o período foi o tubo quadrado 40 x 40 mm, que é derivado do tubo redondo de  $\text{Ø}50,80$  mm. As espessuras, tipos de materiais e quantidades produzidas estão descritas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Produção com material laminado a quente

<b>Espessuras</b>	<b>Material</b>	<b>Massa produzida (ton.)</b>	<b>Comprimento produzido (m)</b>
2,00	SAE 1008	60,43	25181,35
2,00	SAE 1010	5,39	2246,15
2,25	SAE 1008	17,54	6494,29
2,65	SAE 1008	86,62	27945,19
3,00	SAE 1008	107,00	30572,04
3,35	SAE 1010	1,71	438,56
3,75	SAE 1010	21,55	4887,18
4,75	SAE 1008	32,65	6058,88

Fonte: O autor (2019).

Tabela 3 - Produção com material zincado

<b>Espessuras</b>	<b>Material</b>	<b>Massa produzida (ton)</b>	<b>Comprimento produzido (m)</b>
1,95	ZSTE 380	17,52	7629,57
1,95	NBR7008 ZC	18,72	8140,57
1,95	NBR7008 ZAR230	116,54	50670,93
2,30	ZSTE 380	14,46	5162,43
2,70	NBR7008 ZAR230	15,74	4917,78
2,70	ZSTE 380	41,96	13111,29

Fonte: O autor (2019).

A produção com material laminado a quente foi de 103823,64 m e com material zincado foram produzidos 89632,58 m. A produção total chegou a 193456,22 m.

Nas tabelas 4 e 5 são apresentadas a composição química e as propriedades mecânicas dos materiais produzidos.

Tabela 4 - Composição química materiais produzidos

<b>Material</b>	<b>Composição química (% máxima)</b>						
	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>
<b>SAE 1008</b>	0,10	0,50	0,03	0,05	-	-	-
	0,13	0,6	0,03	0,05	-	-	-
<b>SAE1010</b>	0,10	0,50	0,03	0,05	-	-	-
	0,13	0,6	0,03	0,05	-	-	-
<b>NBR 7008 ZC</b>	0,15	0,60	0,04	0,03	-	-	-
	0,15	0,60	0,04	0,03	-	-	-
<b>NBR 7008 ZAR 230</b>	0,20	-	0,04	0,04	-	-	-
	0,20	-	0,04	0,04	-	-	-
<b>ZSTE 380</b>	0,10	1,20	0,03	0,03	0,50	0,09	0,22
	0,10	1,20	0,03	0,03	0,50	0,09	0,22

Fonte: O autor (2019).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos materiais produzidos

Material	Propriedade mecânicas (MPa)	
	LE (medido)	LR (medido)
SAE 1008	330	376
	LE (medido)	LR (medido)
SAE1010	265	408
	LE (medido)	LR (medido)
NBR 7008 ZC	272	370
	LE (mínimo)	LR (mínimo)
NBR 7008 ZAR 230	230	310
	LE (mínimo)	LR (mínimo)
ZSTE 380	380	460

Fonte: O autor (2019).

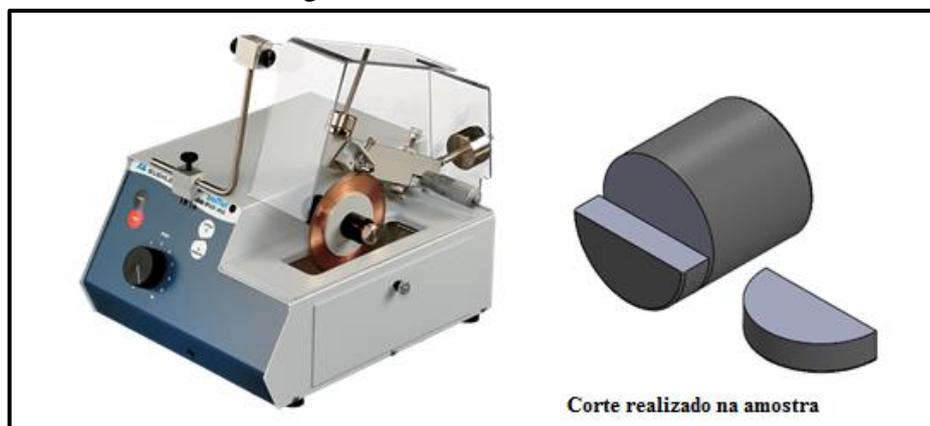
Os materiais SAE 1008, SAE 1010 e NBR 7008 ZC não possuem nas suas normas especificações mínimas de propriedades mecânicas. Os dados apresentados na tabela são provenientes de ensaios anteriores realizados no LAMEC da Universidade de Caxias do Sul, por solicitação da empresa.

### 3.1.6 Análise da microestrutura da camada nitretada

Para análise da camada nitretada foram utilizados os dois corpos de prova, os quais foram preparados no Laboratório de Metalografia (LAMET) da Universidade Caxias do Sul.

As amostras com dimensão inicial de  $\varnothing 25,50 \times 30$  mm foram cortadas utilizando-se uma máquina de corte IsoMet Low Speed Saw – Buehler (mostrada na figura 24), e um disco diamantado de  $\varnothing 103 \times 0,3$  mm de espessura, em baixa velocidade (120 rpm).

Figura 24 - Corte das amostras



Fonte: Buehler (2019).

A etapa seguinte ao corte foi o embutimento em baquelite, de forma que a superfície a ser analisada ficasse exposta no topo do cilindro prensado. Para o lixamento foram utilizadas lixas com granulometria de 240, 320, 400, 600 e 1200. As peças foram lixadas em uma direção, e a cada mudança de granulometria de lixa, eram giradas em 90 graus afim de remover todas as marcas da lixa anterior. Após o lixamento foi realizado um polimento com pastas de diamante de 3  $\mu\text{m}$  e de 0,5  $\mu\text{m}$ .

#### 3.1.6.1 Análise metalográfica

Para análise metalográfica e obtenção de imagens da camada nitretada foi utilizado um microscópio óptico Nikon modelo Epiphot 200.

A fim de encontrar o melhor contraste possível nas imagens da camada nitretada, as duas amostras utilizadas para análise foram atacadas com dois reagentes. Uma delas foi atacada com Nital 5% e a outra foi atacada com Vilella.

#### 3.1.6.2 Perfil de microdureza

Para determinação do perfil de microdureza Vickers utilizou-se um microdurômetro HMV-2T da fabricante SHIMADZU.

A medição de microdureza para obtenção do perfil foi realizada em pontos distantes (5  $\mu\text{m}$ ) entre si, e a cada mudança de ponto de medição, o indentador era deslocado nos eixos x e y, evitando a sobreposição de pontos.

A primeira medição foi realizada a 10  $\mu\text{m}$  da borda do material, pois ao se aproximar muito do limite entre o material e a baquelite ocorria escorregamento do indentador, tornando a leitura imprecisa.

A carga aplicada no ensaio foi de 490 mN, com tempo de aplicação de 15 s. Para assegurar a confiabilidade dos resultados, foram feitas três medidas de microdureza para cada distância.

#### 3.1.7 Análise da superfície de desgaste

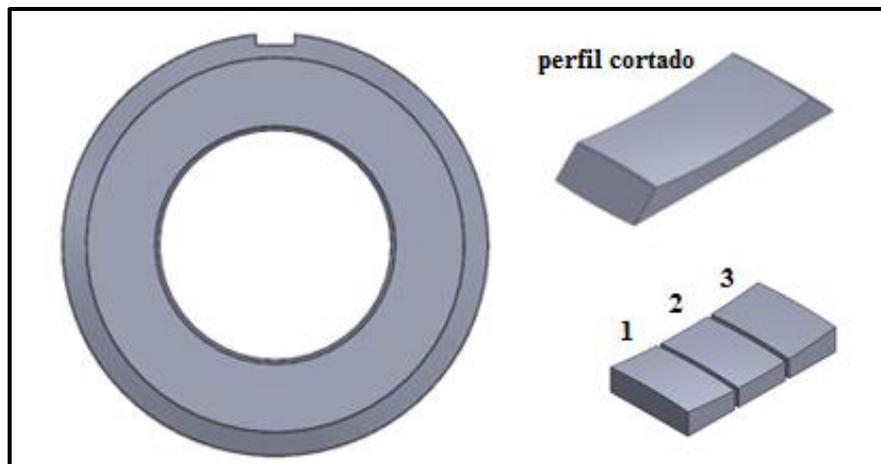
A superfície de desgaste foi avaliada no Laboratório Central Microscopia (LCMIC) da UCS. O equipamento utilizado para essa análise foi um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo da marca SHIMADZU modelo SSX-500 SUPERSCAN.

Para análise da superfície de desgaste, foi necessário realizar um corte na lateral das ferramentas, extraindo uma amostra de todo o perfil de contato da ferramenta com o tubo. O corte foi realizado por eletro erosão a fio, na empresa Usimagi Indústria Metalúrgica de Caxias do Sul.

Após a retirada das amostras, as mesmas foram separadas em três peças menores, possibilitando avaliação do desgaste em três diferentes regiões do perfil das ferramentas.

Na figura 25 é mostrado o corte realizado na ferramenta e as amostras retiradas para análise.

Figura 25 - Amostra retirada das ferramentas



Fonte: O autor (2019).

Para caracterização e comparação das superfícies as amostras foram enumeradas de 1 a 6, conforme tabela 6.

Tabela 6 - Identificação das amostras

<b>Amostra</b>	<b>Condição</b>
1	Sem nitretação R1
2	Sem nitretação R2
3	Sem nitretação R3
4	Com nitretação R1
5	Com nitretação R2
6	Com nitretação R3

Fonte: O autor (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

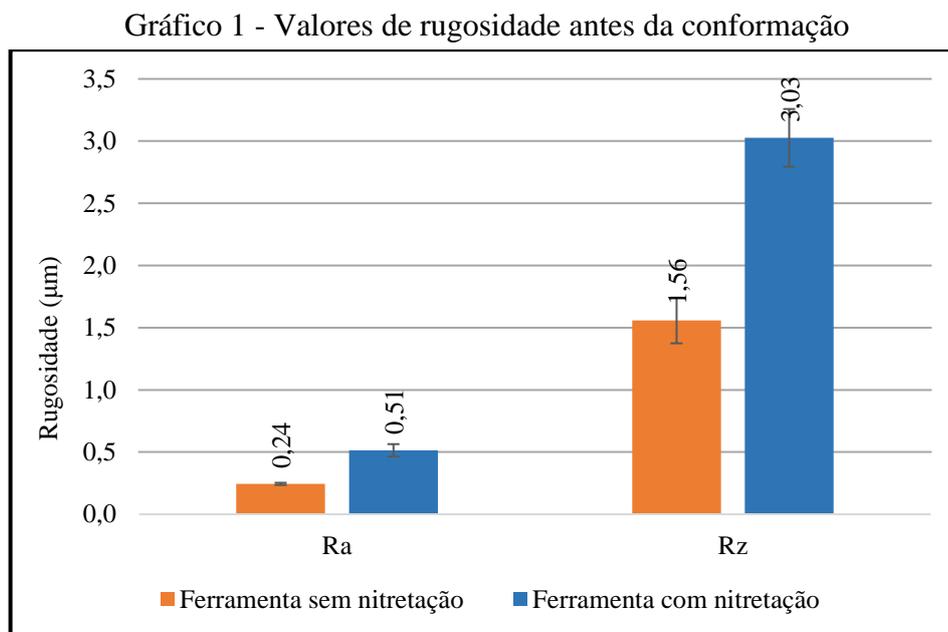
Neste capítulo são apresentados os resultados provenientes dos ensaios realizados. Primeiramente, são apresentados os resultados da análise metrológica das ferramentas antes e após a produção com as ferramentas. Na sequência, é apresentada a análise da microestrutura da camada nitretada dos corpos de prova. Por fim, é avaliada a superfície de desgaste das ferramentas após a realização da conformação de tubos.

### 4.1 ANÁLISE METROLÓGICA

#### 4.1.1 Rugosidade

A primeira avaliação realizada com relação a qualidade superficial das ferramentas foi a comparação da rugosidade das ferramentas antes e depois do tratamento de nitretação.

Foram avaliados os parâmetros Ra e Rz em ( $\mu\text{m}$ ), e a partir dos cinco resultados obtidos ao longo do perfil das ferramentas foram calculadas as médias de rugosidade das ferramentas. O gráfico 1 mostra os resultados, as incertezas das medidas levam em consideração o desvio padrão das medições.

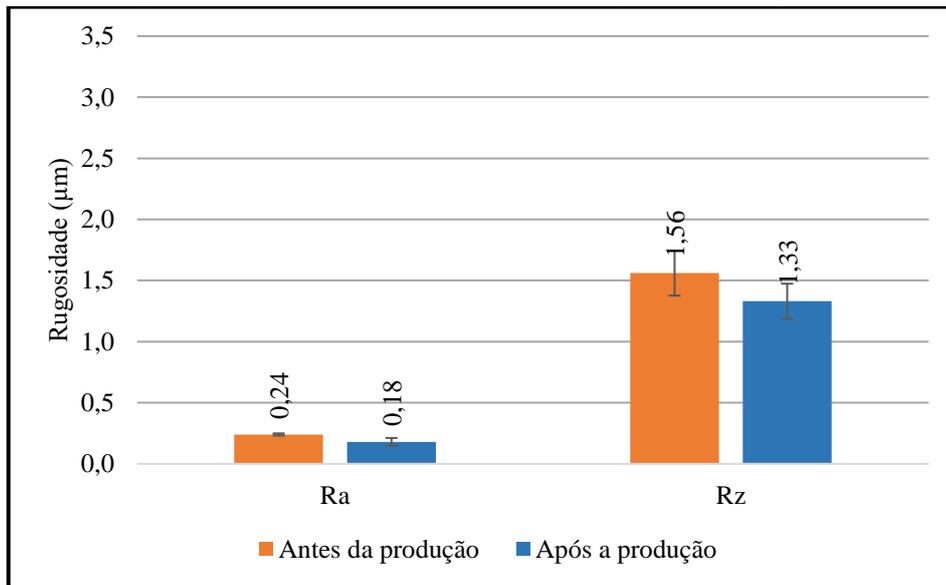


Fonte: O autor (2019).

Os valores de rugosidade Ra e Rz das ferramentas sofreram um acréscimo após a realização da nitretação a plasma. Oliveira, Lima e Rocha (2016, p. 695) atribuem esse aumento de rugosidade devido ao bombardeamento iônico que ocorre na superfície do material, onde átomos do substrato são arrancados levando a um aumento da rugosidade.

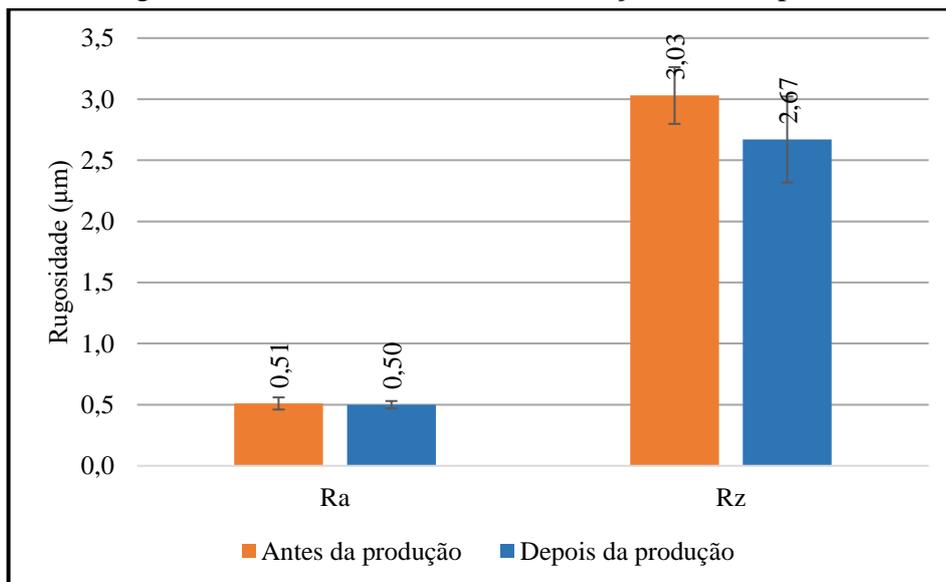
Os gráficos 2 e 3 comparam a rugosidade das ferramentas antes e após a realização da conformação de tubos.

Gráfico 2 - Rugosidade das ferramentas sem nitretação antes e após a conformação



Fonte: O autor (2019).

Gráfico 3 - Rugosidade das ferramentas com nitretação antes e após a conformação



Fonte: O autor (2019).

A rugosidade Ra da ferramenta sem nitretação sofreu uma diminuição de aproximadamente 30%, enquanto a rugosidade Ra da ferramenta com nitretação decaiu em 2%. A menor sensibilidade ao decaimento de Ra da ferramenta nitretada, pode estar ligada a maior resistência a deformação das asperezas da superfície nitretada, diminuindo assim a variação desse parâmetro.

A rugosidade Rz de ambas ferramentas apresentou diminuição após a conformação, chegando a uma redução de 17% na ferramenta sem nitretação e 13% na ferramenta com nitretação.

Essas diminuições de rugosidade podem estar relacionadas ao contato e deslizamento entre o material conformado e a superfície das ferramentas. O contato causa uma laminação na superfície das ferramentas, e conseqüentemente, uma diminuição na altura das asperezas o que leva a uma diminuição nos valores de rugosidade.

A diferença de comportamento dos valores Ra e Rz entre as ferramentas pode ser explicada devido a forma de obtenção de cada parâmetro. Enquanto o Ra corresponde à média aritmética dos valores absolutos, em relação à linha média. Rz é a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parciais, acima e abaixo da linha média ao longo do comprimento da amostragem.

Como o parâmetro de rugosidade Rz é calculado considerando-se as distâncias entre picos e vales da superfície analisada, a diferença de rugosidade Rz das ferramentas pode ter sido menor devido à existência de vales mais profundos nas ferramentas nitretadas, em decorrência do arrancamento de átomos pelos íons positivos gerados durante o processo de nitretação.

#### **4.1.2 Caracterização metrológica**

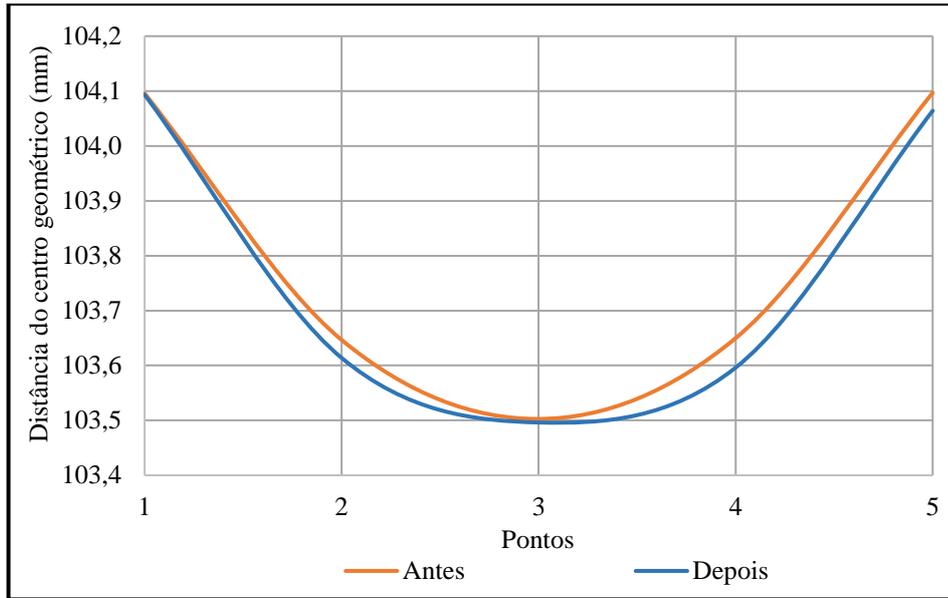
Nos gráficos 4 e 5 são apresentados os perfis das ferramentas antes e após a produção, nota-se claramente a diferença entre os perfis devido à redução de distância entre o centro da ferramenta e os pontos de medição.

A redução causada nas ferramentas com nitretação foi mais homogênea, de menor intensidade ou no mínimo da mesma ordem de grandeza que a redução causado nas ferramentas sem nitretação.

Devido à deformação causada no perfil da ferramenta sem nitretação, possivelmente, em um período maior de análise já seriam notadas imperfeições na superfície do tubo.

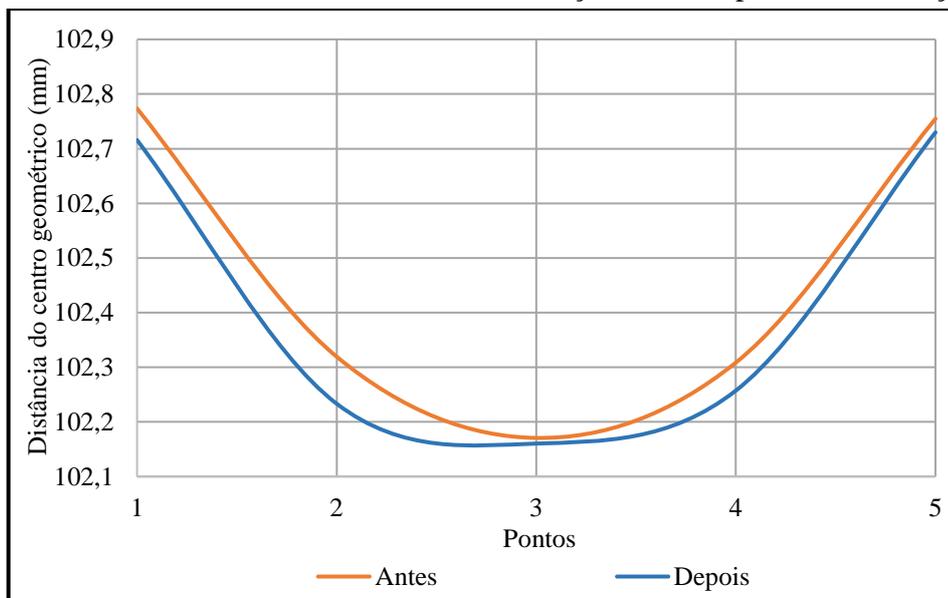
Outro ponto que pode ser notado nos gráficos, é a diferença de desgaste entre os pontos do lado esquerdo e direito das ferramentas, uma possível explicação pode estar relacionada ao alinhamento de máquina. Como as posições das ferramentas não foram alteradas durante a produção isto fica mais evidente.

Gráfico 4 - Perfil das ferramentas com nitretação antes e após a conformação



Fonte: O autor (2019).

Gráfico 5 - Perfil das ferramentas sem nitretação antes e após a conformação



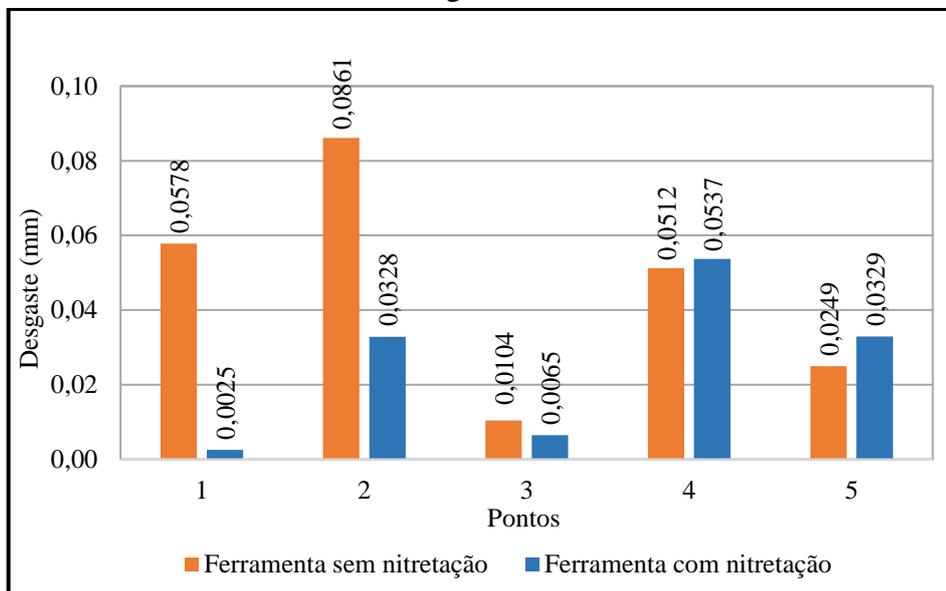
Fonte: O autor (2019).

No gráfico 6 são apresentados os valores da redução de distância entre o centro das ferramentas e os 5 pontos distribuídos em seu perfil. Observa-se que as maiores reduções

ocorreram nos pontos laterais, isso pode ser explicado devido a estes pontos estarem localizados onde ocorre a formação do raio do tubo, e conseqüentemente, o encruamento do material. O ponto 3 que fica no centro da ferramenta apresentou menor redução de diâmetro, provavelmente, em decorrência de um menor contato do tubo com a ferramenta nesse ponto devido a um menor esforço de conformação realizado.

Pode ser observado também que a ferramenta com nitretação apresentou menor redução de diâmetro nos pontos 1, 2 e 3. Pode-se relacionar este resultado com um menor desgaste da ferramenta nesses pontos.

Gráfico 6 - Desgaste das ferramentas



Fonte: O autor (2019).

## 4.2 ANÁLISE DA CAMADA NITRETADA

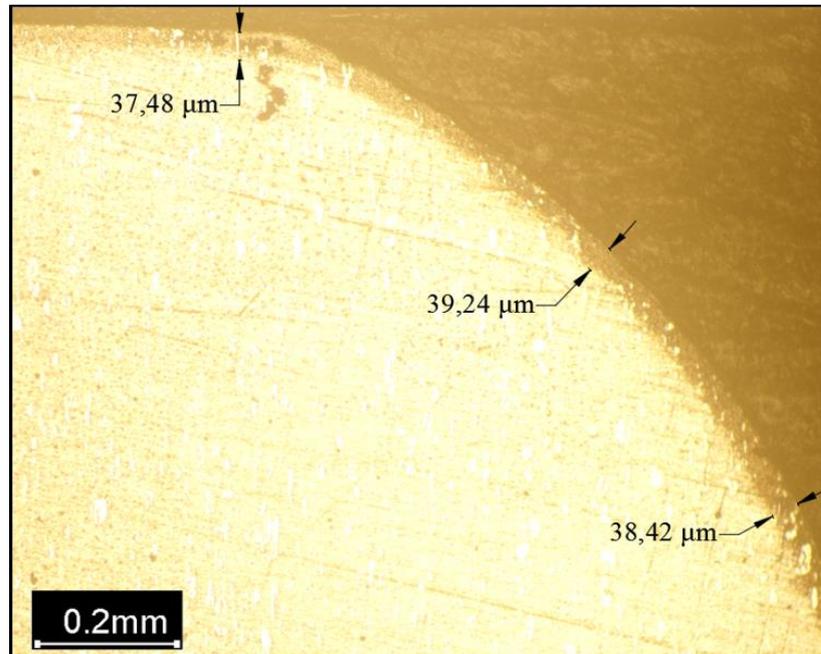
### 4.2.1 Análise metalográfica

A camada nitretada mostrada na figura 26 apresentou espessura bastante uniforme, variando entre 37,5 e 39  $\mu\text{m}$ . Conforme abordagem apresentada na revisão bibliográfica, a espessura da camada está diretamente ligada à quantidade de elementos formadores de nitretos presentes no material nitretado. Em geral quanto maior a quantidade de elementos de liga, menor a profundidade da camada nitretada.

Na figura 27 nota-se a presença de camada branca com bastantes irregularidades e de espessura entre 1 e 2  $\mu\text{m}$ . Uma das possíveis causas dessas irregularidades pode estar ligada ao

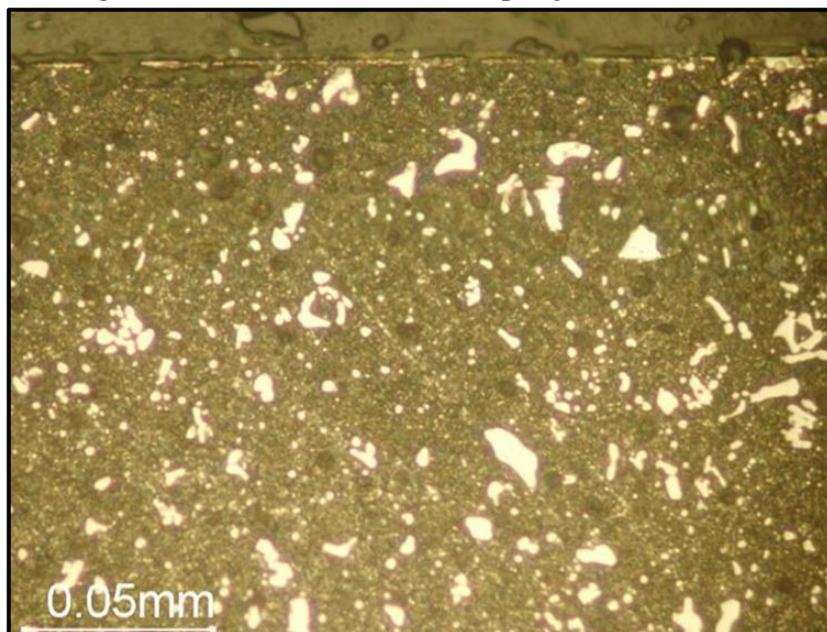
grande teor de carbono e cromo no aço AISI D2, que favorece para maiores tempos de nitretação, a formação de carbeto de cromo e dificultam a formação de nitretos de ferro e cromo, que são os componentes que formam a camada branca. (Valadão 2008, p.56).

Figura 26 - Camada nitretada, ampliação 200x (Nital 5%)



Fonte: O autor (2019).

Figura 27 - Camada nitretada, ampliação 500x (Vilela)



Fonte: O autor (2019).

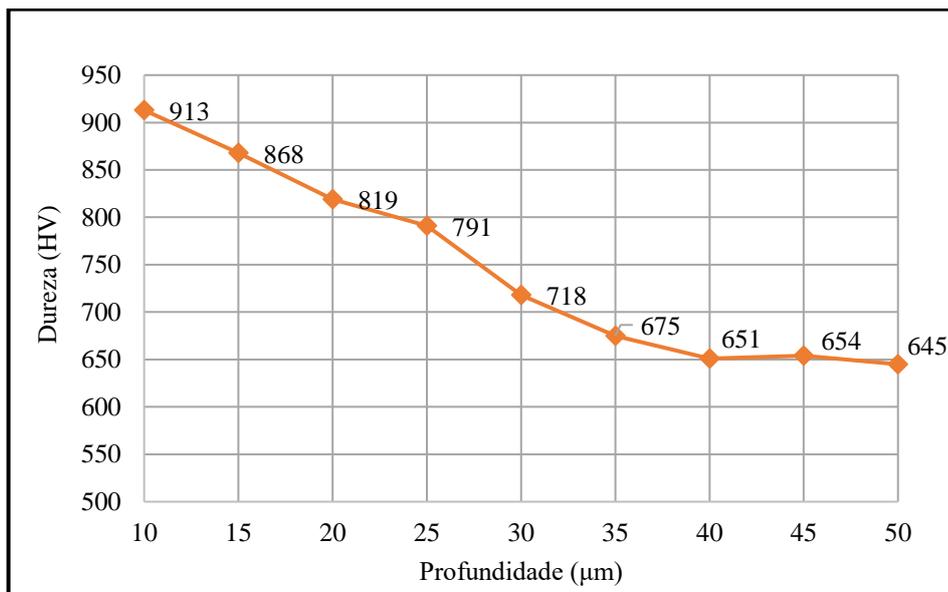
Considerando que o aumento da espessura da camada branca diminui a ductibilidade da camada nitretada, a configuração obtida no tratamento foi satisfatória então é esperado que se obtenha a necessária resistência ao desgaste nas ferramentas.

As medições de espessura apresentadas nas figuras 26 e 27 foram realizadas com auxílio do software AutoCad.

#### 4.2.2 Microdureza

No gráfico 7 observa-se que a influência da nitretação na dureza ocorre até 35  $\mu\text{m}$ , visto que a partir daí as medições se tornam constantes e com mínima variação ficando claro que já se trata do núcleo do material. Essa constatação corrobora com a análise metalográfica.

Gráfico 7 - Perfil de microdureza



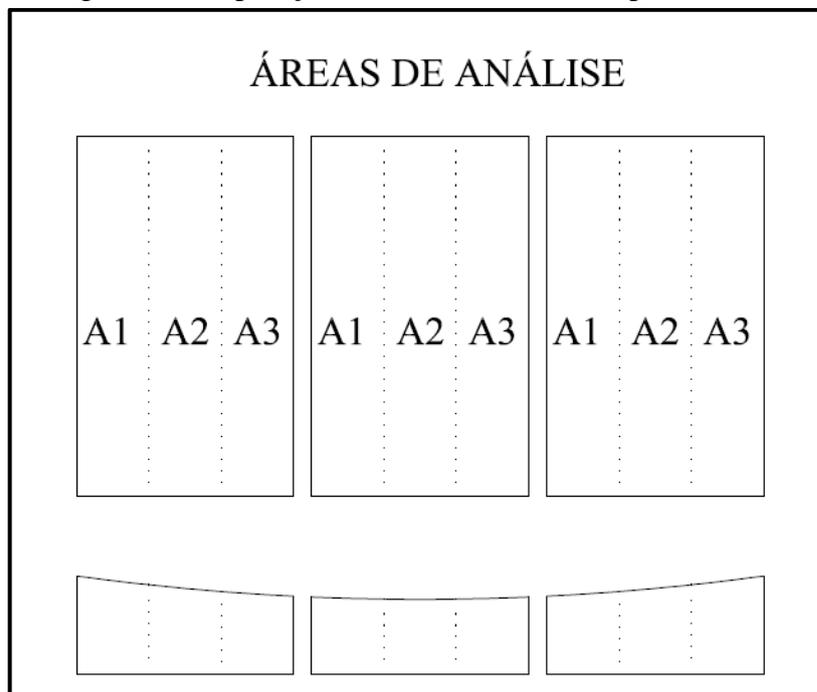
Fonte: O autor (2019).

Comparando o perfil de microdureza encontrado com o perfil apresentado na revisão bibliográfica, pode-se notar valores de dureza menores na camada nitretada. Isso pode estar ligado à disponibilidade de nitrogênio durante o tratamento de nitretação, visto que porcentagens maiores de nitrogênio levam à formação de camada branca com maior profundidade (devido a uma disponibilidade de átomos de nitrogênio acima do limite de solubilidade na matriz de ferro).

### 4.3 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE DESGASTE

Para realização das análises, cada amostra teve sua superfície de desgaste separada em três áreas a fim de obter a maior abrangência possível nas imagens. A figura 28 ilustra como foi realizada essa separação. No total, foram analisadas 6 amostras, cada uma com três áreas, totalizando 18 pontos. Cada ponto resultou em 5 imagens da superfície com ampliações de 100, 500, 1000, 2000 e 5000 vezes, totalizando 90 imagens.

Figura 28 - Separação de áreas das amostras para análise



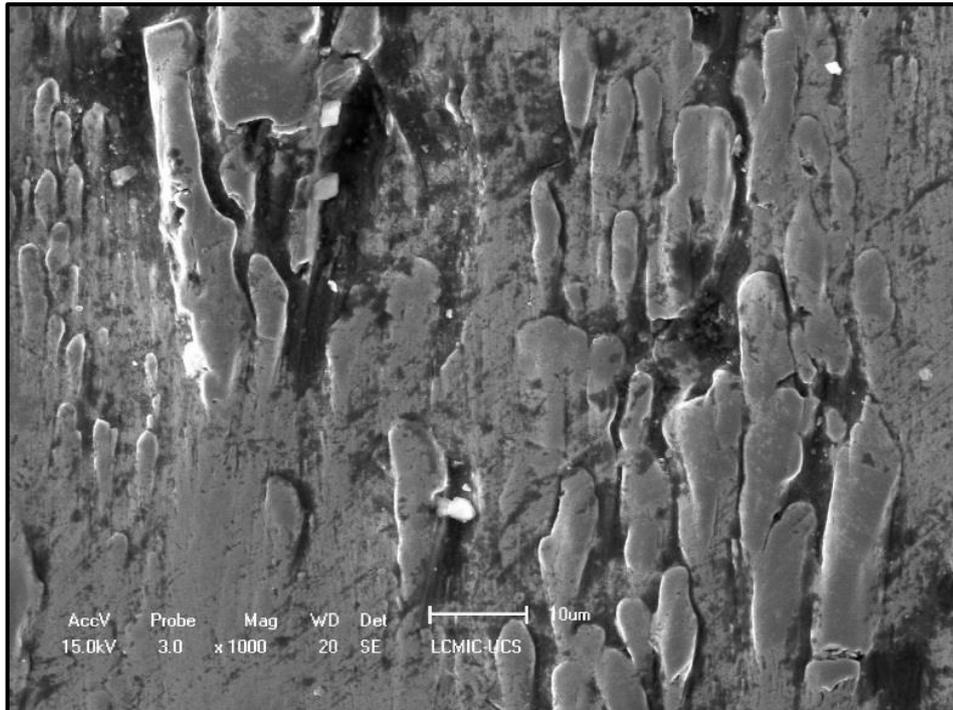
Fonte: O autor (2019).

A primeira análise realizada mostrou que o desgaste nas três áreas de cada amostra é semelhante, então foi assumido que não há diferença entre os mecanismos de desgaste presentes nas áreas A1, A2 e A3 de cada amostra.

#### 4.3.1 Amostras sem nitretação

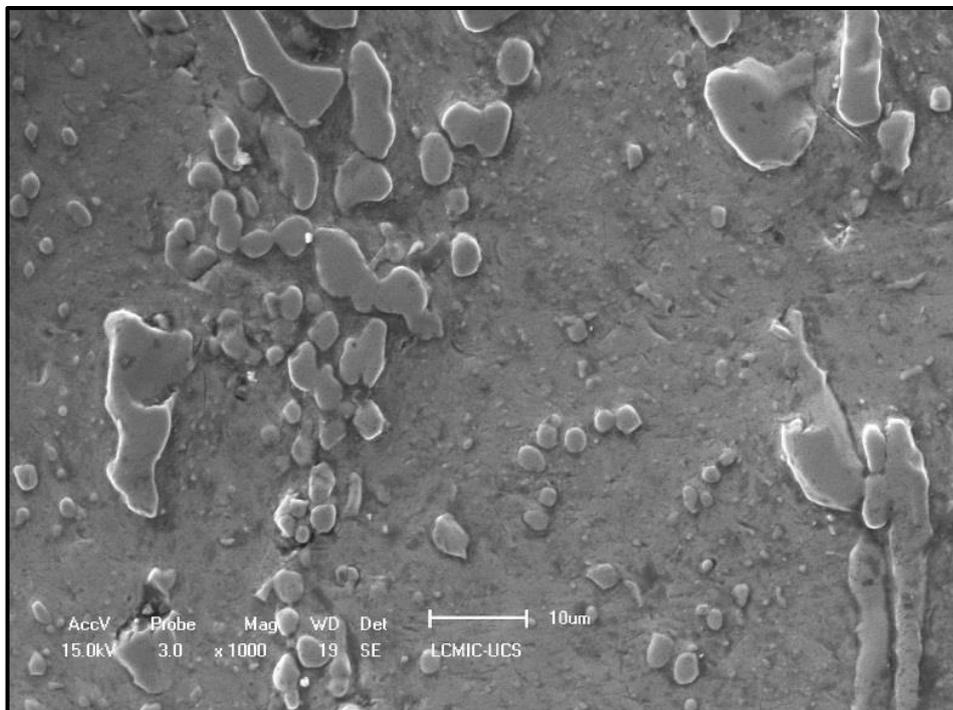
As amostras 1 e 2, ilustradas nas figuras 29 e 30, apresentaram material aderido à superfície com características distintas. O material aderido à superfície da amostra 1 possui uma geometria bastante alongada enquanto o material da amostra 2 tem geometria circular. Isso pode ser efeito da maior força de conformação aplicada a região onde está localizada a amostra 1 devido à formação do raio do tubo neste ponto.

Figura 29 - Amostras 1 (Ampliação 1000x)



Fonte: O autor (2019).

Figura 30 - Amostra 2 (Ampliação 1000x)



Fonte: O autor (2019).

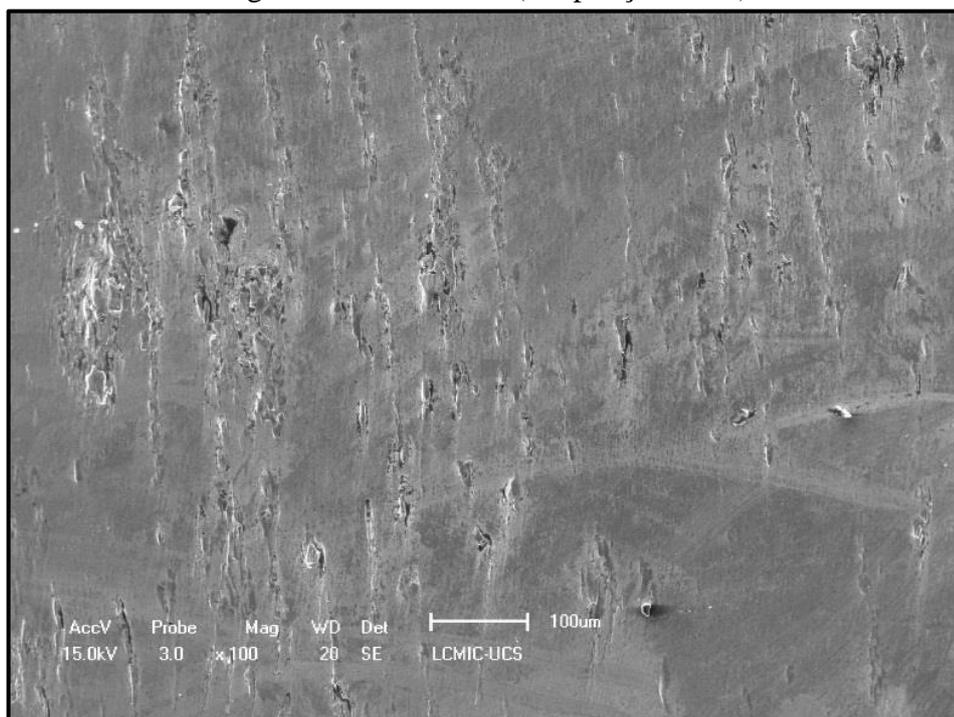
A amostra 3 que está localizada em um ponto simétrico a amostra 1 apresentou comportamento semelhante, isso mostra que as forças de conformação são uniformes em todo

o perfil. Como a localização da amostra 2 é central esse efeito não se repetiu nessa amostra devido à menor força de conformação aplicada a essa área.

Esse material aderido à ferramenta, provavelmente, foi arrancado da superfície do tubo durante a conformação, devido à grande diferença de dureza das superfícies. Visto que, o material de menor dureza perde partículas para o de maior dureza durante a formação, e posterior rompimento das ligações adesivas entre eles.

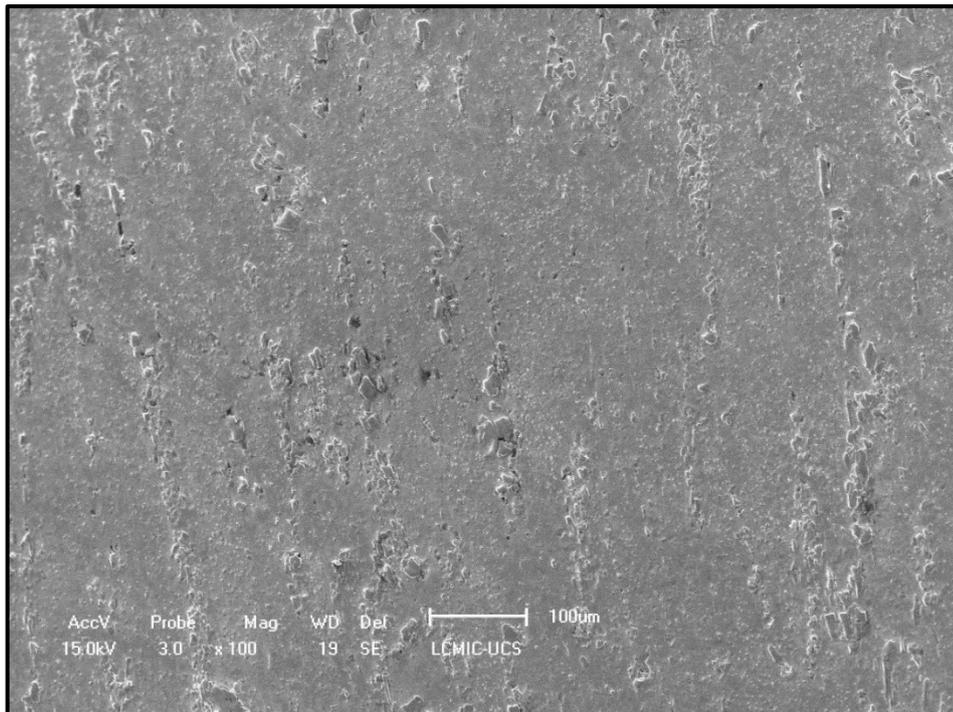
Nas figuras 31, 32 e 33 são mostradas as superfícies de desgaste das amostras sem nitretação. Os mecanismos de desgaste que podem ser notados principalmente nas amostras 1 e 3, são o desgaste adesivo e o desgaste abrasivo. Podem ser visualizados sulcos em decorrência do deslizamento de partículas abrasivas que levaram a um riscamento da superfície da ferramenta.

Figura 31 - Amostra 1 (Ampliação 100x)



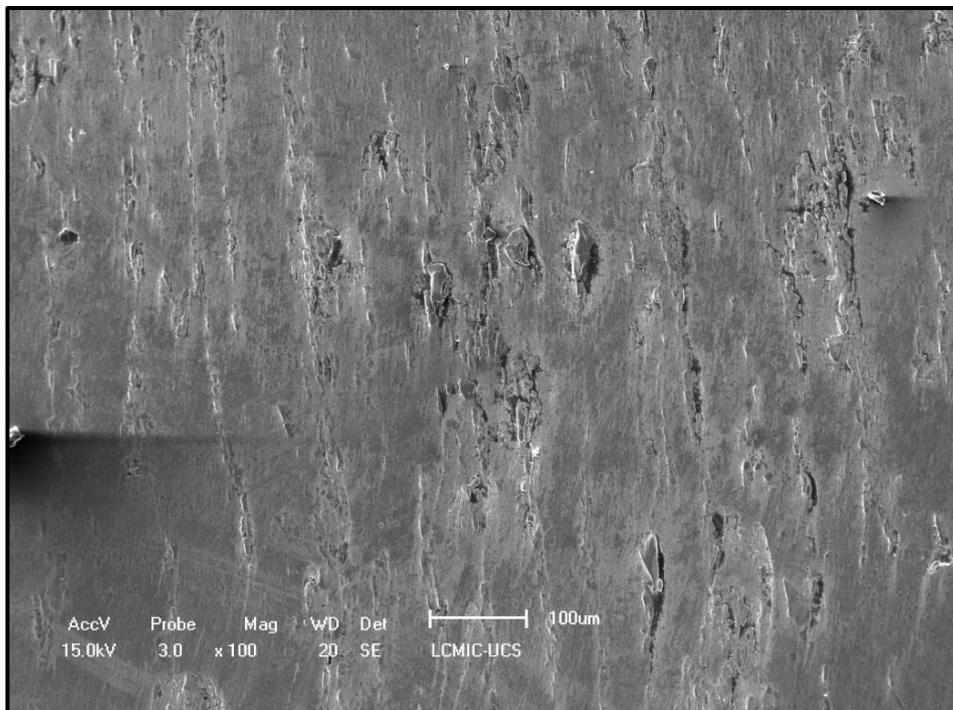
Fonte: O autor (2019).

Figura 32 - Amostra 2 (Ampliação 100x)



Fonte: O autor (2019).

Figura 33 - Amostra 3 (Ampliação 100x)



Fonte: O autor (2019).

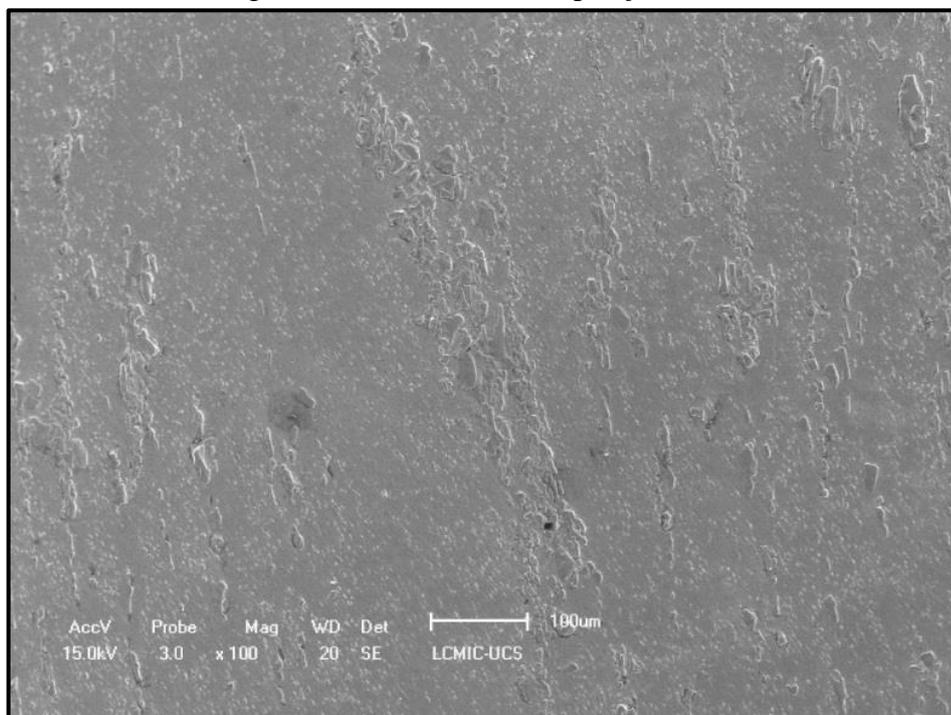
#### 4.3.2 Amostras com nitretação

As superfícies desgastadas das amostras nitretadas, mostradas nas figuras 34, 35 e 36 apresentaram comportamento semelhante ao das amostras não nitretadas, com relação ao alongamento das partículas aderidas à superfície.

As amostras 4 e 6 apresentaram menor incidência de riscos de desgaste abrasivo, e a percepção da direção de conformação não é tão clara em relação as amostras 1 e 3. Isso se nota especialmente na amostra 6. A amostra 5 que é localizada na região central da ferramenta apresentou grande quantidade de material aderido à superfície, isso pode ser efeito da geometria parabólica da ferramenta, que leva a um acúmulo de material arrancado da superfície do tubo na parte mais profunda do perfil.

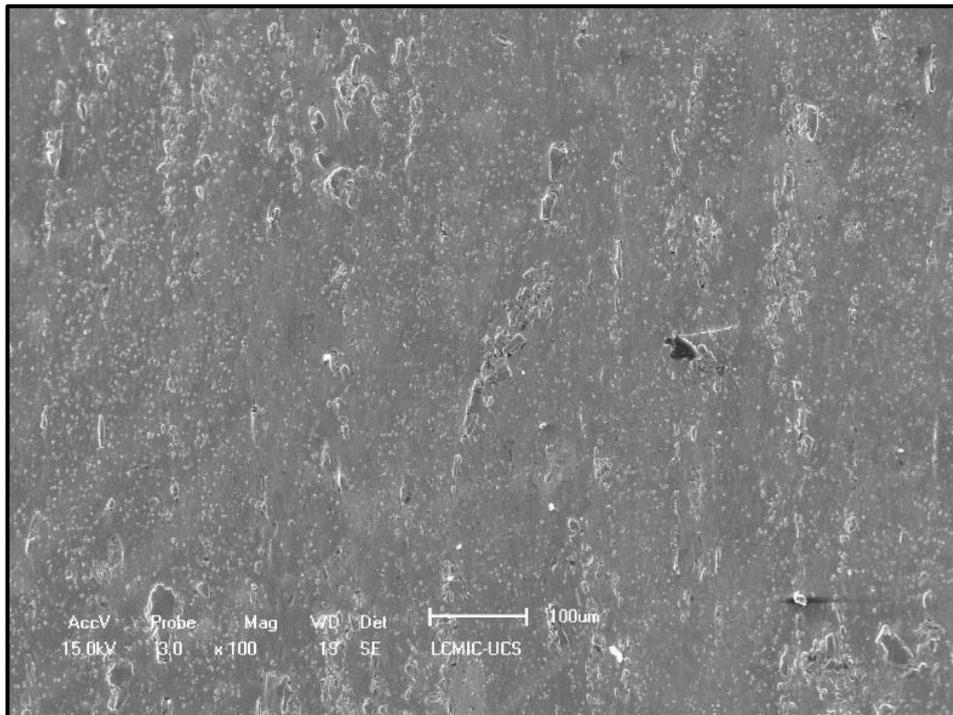
Na amostra 6, a ocorrência de material aderido na superfície foi menor em relação as outras amostras, podem ser notados também pontos de deslocamento de material da superfície, que podem ser partes da camada nitretada que se rompeu durante o processo.

Figura 34 - Amostra 4 (Ampliação 100x)



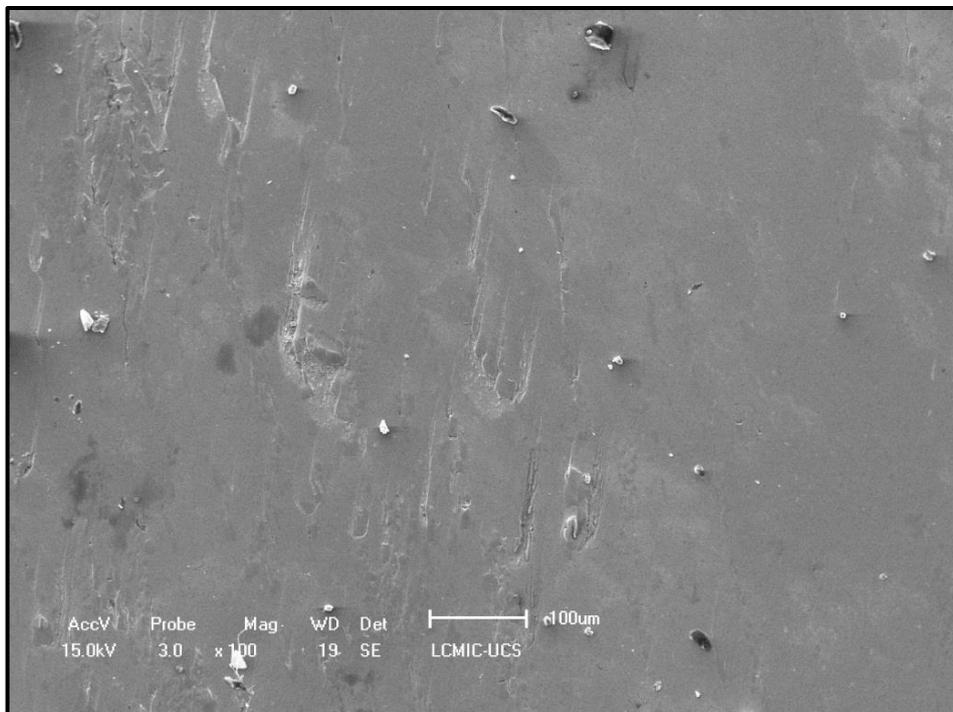
Fonte: O autor (2019).

Figura 35 - Amostra 5 (Ampliação 100x)



Fonte: O autor (2019).

Figura 36 - Amostra 6 (Ampliação 6x)

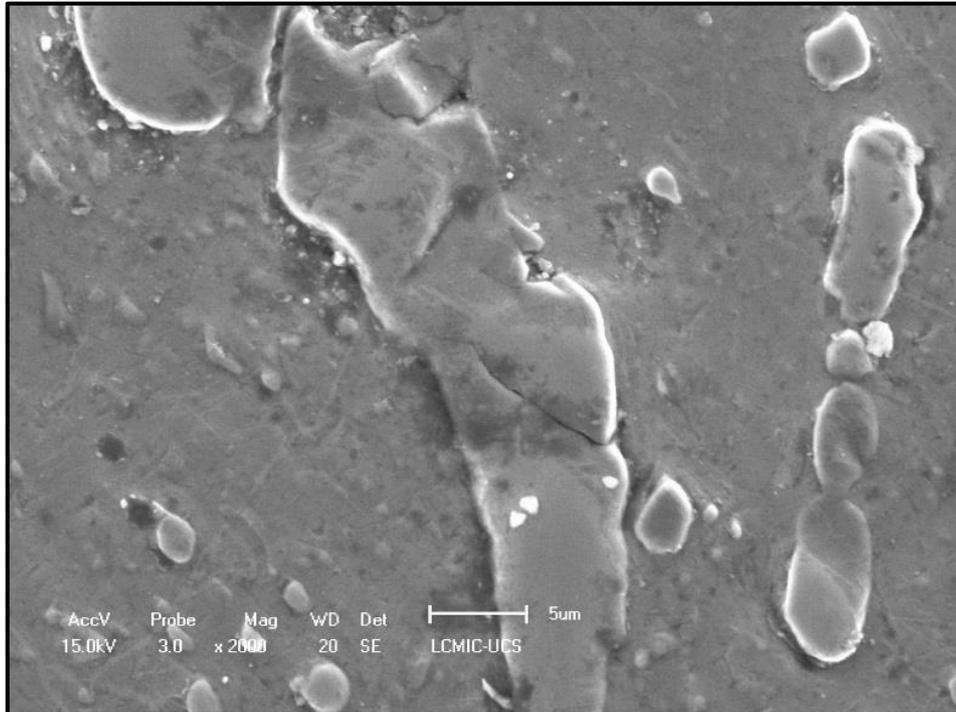


Fonte: O autor (2019).

As figuras 37 e 38 mostram a existência de trincas em pontos do material aderido a superfície, isso ocorreu com maior frequência nas amostras com nitretação. Podendo ser efeito da maior resistência da superfície nitretada à deformação, devido a sua maior dureza superficial,

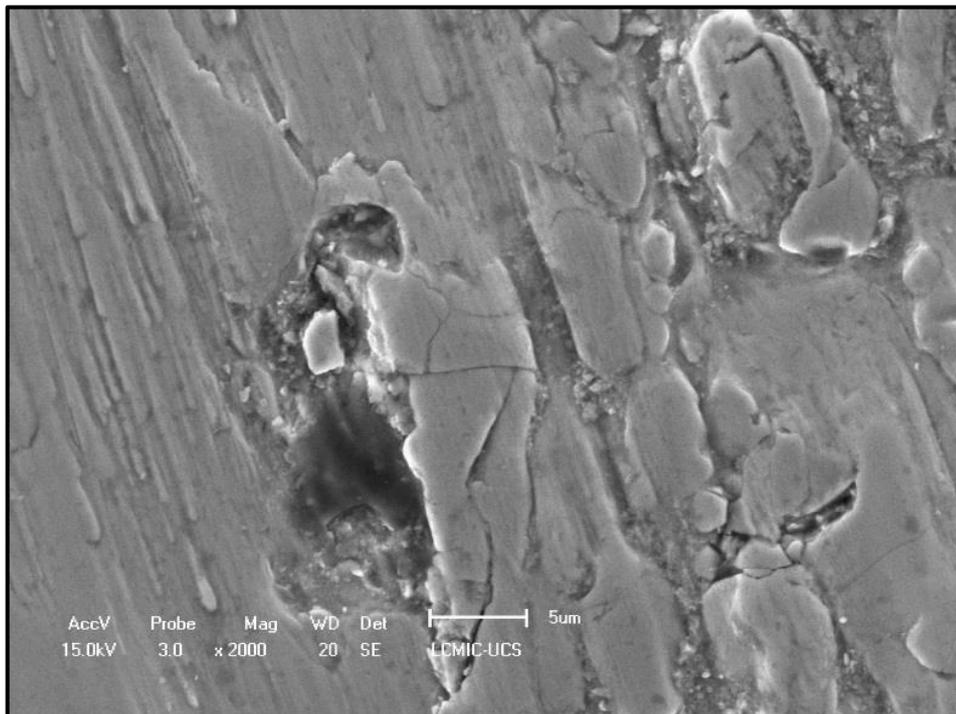
o que ocasionou um maior achatamento das partículas aderidas devidos as altas tensões de compressão nas áreas de contato, e conseqüentemente, a formação das trincas.

Figura 37 - Amostra 4 (Ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

Figura 38 - Amostra 6 (Ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

O aumento da rugosidade e da dureza dos corpos em contato são citados por Stachowiak e Batchelor (2005, p. 553) como uma forma de reduzir o desgaste adesivo. Isso corrobora com os resultados encontrados, permitindo-se supor que um revestimento na ferramenta com menor afinidade química com a superfície do material conformado pode atuar positivamente para reduzir o desgaste adesivo neste par tribológico.

Os apêndices A, B, C, D, E e F mostram as imagens das amostras com ampliação de 100, 500, 1000, 2000 e 5000 vezes.

## 5 CONCLUSÃO

As avaliações dimensionais realizadas nas ferramentas, comprovaram uma menor perda de material da superfície das ferramentas nitretadas em relação as ferramentas sem este tratamento. Com isso observou-se uma melhora na performance das ferramentas nitretadas devido a uma menor alteração dimensional e, conseqüentemente, uma perspectiva de aumento de vida útil a longo prazo destas ferramentas.

As avaliações de rugosidade apontaram que a nitretação exerce influência sobre a qualidade superficial do material nitretado, levando a um aumento da rugosidade superficial. Isso pode ser positivo na diminuição do desgaste adesivo, devido a uma diminuição dos pontos de contato entre as asperezas das superfícies.

As análises superficiais realizadas nas ferramentas mostraram que os mecanismos de desgaste presentes durante o processo de conformação de tubos, não sofreram alteração com a introdução do tratamento de nitretação. O que pôde ser percebido é uma menor suscetibilidade da superfície nitretada a apresentar pontos com desgaste severo e arrancamento de material.

O mecanismo de desgaste mais observado na superfície das ferramentas foi o desgaste adesivo. Foram observadas também marcas de desgaste abrasivo e possíveis trincas no material aderido, que pode se propagar na superfície da ferramenta, diminuindo sua vida útil. Não foram identificados pontos com desgaste por reação triboquímica nas análises realizadas.

A avaliação microestrutural realizada mostrou uma camada nitretada com bastante irregularidades na camada branca, e uma zona de difusão com espessura bastante uniforme.

Com o término do trabalho pode se dizer que a nitretação realizada nas ferramentas apresentou eficiência na diminuição do desgaste causado durante o processo, pois as avaliações realizadas apresentaram resultados favoráveis.

Para trabalhos futuros, pode ser avaliada a aplicação de diferentes recobrimentos sobre o material, utilizando processos como deposição física e/ou química de intermetálicos que diminuam a afinidade química entre a superfície da ferramenta e os detritos gerados no processo. Uma análise de microsonda por dispersão de energia nos detritos aderidos à superfície forneceria informações importantes sobre a fonte destes detritos e a eventual afinidade química destes detritos com o material das ferramentas.

Outro ponto que pode ser estudado futuramente é a implementação de uma avaliação comparativa da vida útil das ferramentas com e sem nitretação, possibilitando uma análise de viabilidade para implantação da nitretação em todas as ferramentas. Nessa análise deve ser levada em consideração o aumento de dureza da superfície da ferramenta nitretada que causa

maior dificuldade na realização das usinagens para correção do perfil, isso pode ser um complicador devido ao aumento de custo da usinagem, além da necessidade de se realizar novamente a nitretação.

A continuação de estudos sobre o tema é essencial para capacitar o setor produtivo na busca de soluções para o fenômeno de desgaste nas ferramentas de conformação de tubos.

## REFERÊNCIAS

- ALÉ, R. M; FARIA, A. V; SILDA, R. F; DEPIZZOL, A. C; REINIG, W. D. Soldagem de tubos de aço patinável de alto Si pelo processo HFIW. **Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 95-102, abr.-jun. 2012.
- ALVES JR., C. **Nitretação a plasma: fundamentos e aplicações**. Natal, RN. EDUFRN, 2001. 109p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7008-3:2012**. Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente Parte 3: Aços estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7008-3:2012**. Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente Parte 2: Aços de qualidade comercial e para estampagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 4 p.
- BIDABADI, B.S; NAEINI, M.H; TEHRANI, M.S; BARGHIKAR, H. Experimental and numerical study of bowing defects in cold roll-formed, U-channel sections. **Journal of Constructional Steel Research**, Tehran, IR, V. 118, 243–253. Mar. 2016.
- BRAGA, F. Vantagens na fabricação e aplicação dos tubos de aço soldados HFIW, **Revista Tubo & Companhia**, São Paulo, p. 11-19, 2004.
- BUDYNAS, R. G; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre. AMGH, 2011. 1084 p.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2003. 272 p.
- COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Catálogo laminados a quente, 2018. Volta Redonda, RJ. 52 p.
- COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Catálogo zincados, 2018. Volta Redonda, RJ. 40 p.
- DALMAS, F. **Estudo da variação dimensional na nitretação de anéis em aço cromo-molibdênio**. 2013. 72 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro. Guanabara Dois, 1998. 653 p.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 50320**. Wear - Systems Analysis of Wear Processes - Classification of The Field of Wear. DIN, 1979. 8p.
- FRANCO Jr. A. R. **Obtenção de revestimentos duplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13**. 2003. 196 p. Tese de Doutorado (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - USP. São Paulo 2003.

FROEHLICH, R.A. **Tratamento superficial duplex com TiN e CrN de aços ferramenta classe AISI H13 para matrizes de injeção de ligas de alumínio**. 2003. 145 p. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - UFRGS, Porto Alegre, 2003.

GATES, J. D. **Wear. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion**. Brisbane, AUS, v.214, n.1, p. 139 -146, June 1998.

GOBBI, V. J. **Influência da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2**. 2009. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

HALMOS, G. T. **Roll Forming Handbook: Manufacturing engineering and materials processing**. Florida, U.S. Taylor & Francis Group 2006. 583 p.

HOKKIRIGAWA, K.; KATO, K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. **Tribology International** Sendai, JP, v. 21, n.1, p. 51-57, feb. 1988.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Oxford, ENG. Elsevier 2017. 388 p.

MANG, T.; BOBZIN, K.; BARTELS, T. **Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication**. Weinheim, GER.: WILEY-VCH, 2011. 672 p.

MODENESI, P. J., e MARQUES, P. V. **Apostila introdução aos processos de soldagem** - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2000. 209 p.

OLIMPIA 80 TUBE MILLS. **Tube mill sizing and straightening sections**. Disponível em: <[http://www.olimpia80.com/?page\\_id=2224&lang=en](http://www.olimpia80.com/?page_id=2224&lang=en)>. Acesso em 26/04/2019.

OLIVEIRA, L.F; LIMA, E.S.; ROCHA, A. da S. **Um estudo sobre a nitretação a plasma com tela ativa do aço AISI M2**. 5º Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, Sapucaia do Sul, RS, p. 693-704, out. 2016.

PINEDO, C. E. **Estudo morfológico e cinético da nitretação por plasma pulsado do aço inoxidável martensítico AISI 420**. 2000. 173 p. Tese de Doutorado (Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, SP. 2000.

PYE, D. **Nitriding Techniques, Ferritic Nitrocarburizing, and Austenitic Nitrocarburizing Techniques and Methods**. Steel Heat Treating: Metallurgy and Technologies. Oregon, U.S.2006. p. 474-538.

RAMOS, F. D. **A Influência das Tensões Sobre a Difusão de Nitrogênio no Processo de Nitretação a Plasma**. 2003, 96 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - UFRGS, Porto Alegre, 2003.

SILVA, A. L.; MEI, P.R. **Aços e Ligas Especiais** 3. ed. São Paulo, SP. Editora Blucher, 2010. 639p.

SILVA, H. R.T; EGERT, P; MAGNANO, R. F; SPELLER, C; DADAM, A. A nitretação a plasma aplicada como processo anticorrosivo em ferragens metálicas utilizadas no sistema elétrico. **Revista gestão e sustentabilidade ambiental**, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 503-521, mar. 2017.

SILVA, P. N. **Desenvolvimento de tubo de aço API 5CT GRAU L80 com 1% cromo soldado por ERW/HFIW**. 2016. 71 p. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

SINATORA, A.; TANAKA, D. K. As leis do atrito: da Vinci, Amontons ou Coulomb? **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 31-34, 2007.

SKONIESKI, A. F. O. **Influência da mistura gasosa nos processos de nitretação e nitrocarbonetação a plasma do aço AISI 4140**. 2008. 95f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - UFRGS, Porto Alegre, 2008.

STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W. **Engineering Tribology**, Tribology Series 24. New York, U.S.: 3. ed. Elsevier 2005. 801 p.

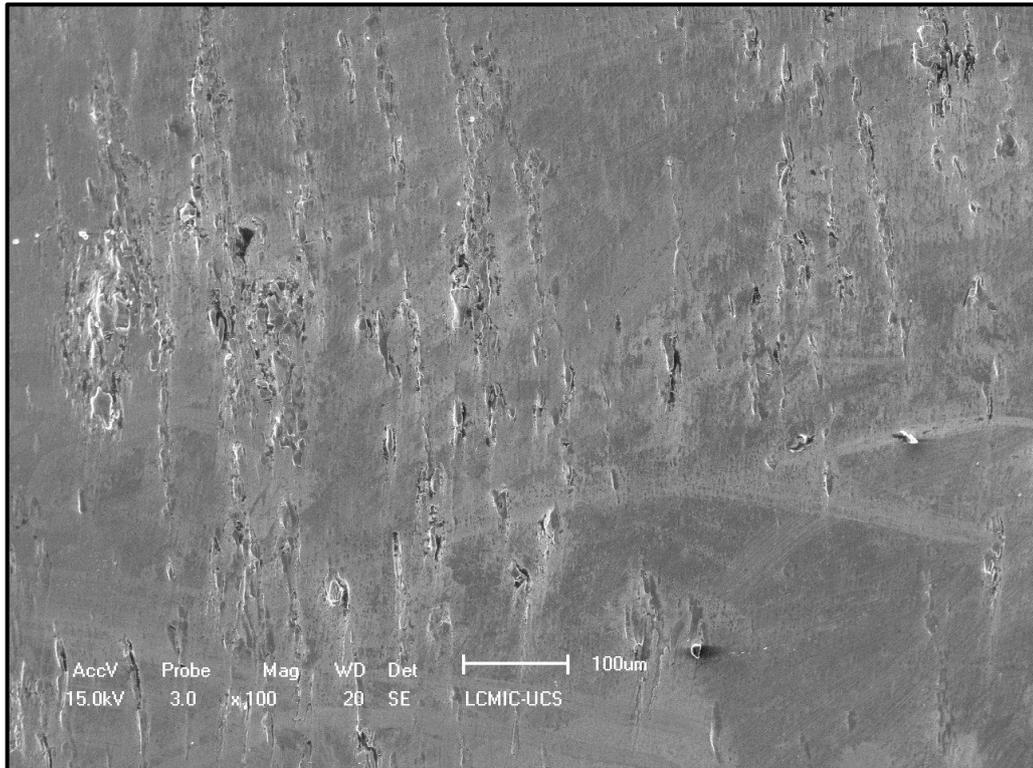
SUSKI, C.A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. 2004. 84 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) - UFSC, Florianópolis. 2004.

VALADÃO, E. M. **Avaliação de desempenho do aço AISI D2 tratado termicamente e nitretado em plasma com gaiola catódica visando aplicação industrial**. 2008. 73p. Dissertação de Mestrado (Ciências e Engenharia de Materiais) - UFRN, Natal, 2008.

ZUM-GAHR, K-H.: **Microstructure and Wear of Materials**: Tribology series, 10. New York, U.S.: Elsevier 1987. 560 p.

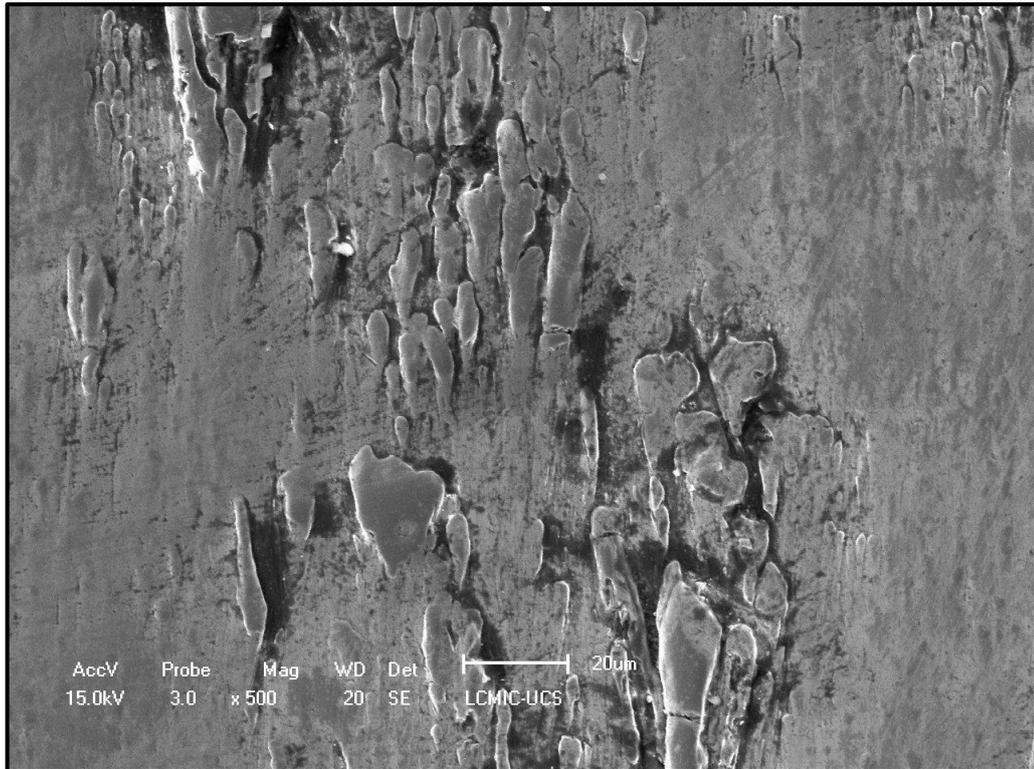
## APÊNDICE A – AMOSTRA 1

Amostra 1 (ampliação 100x)



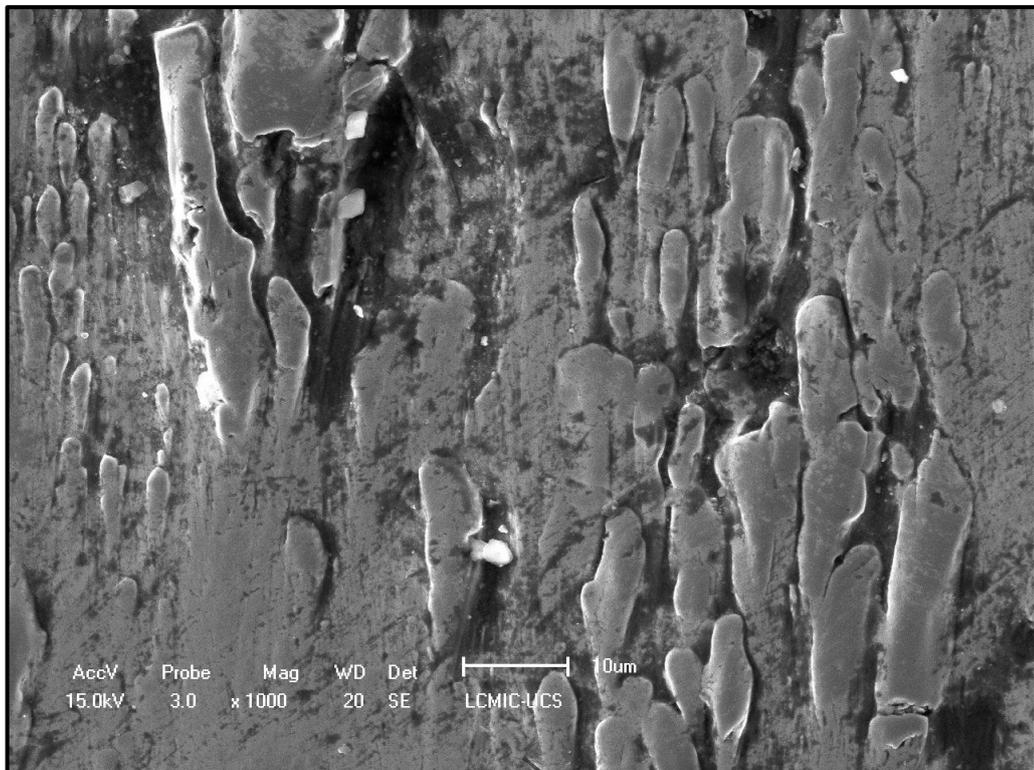
Fonte: O autor (2019).

Amostra 1 (ampliação 500x)



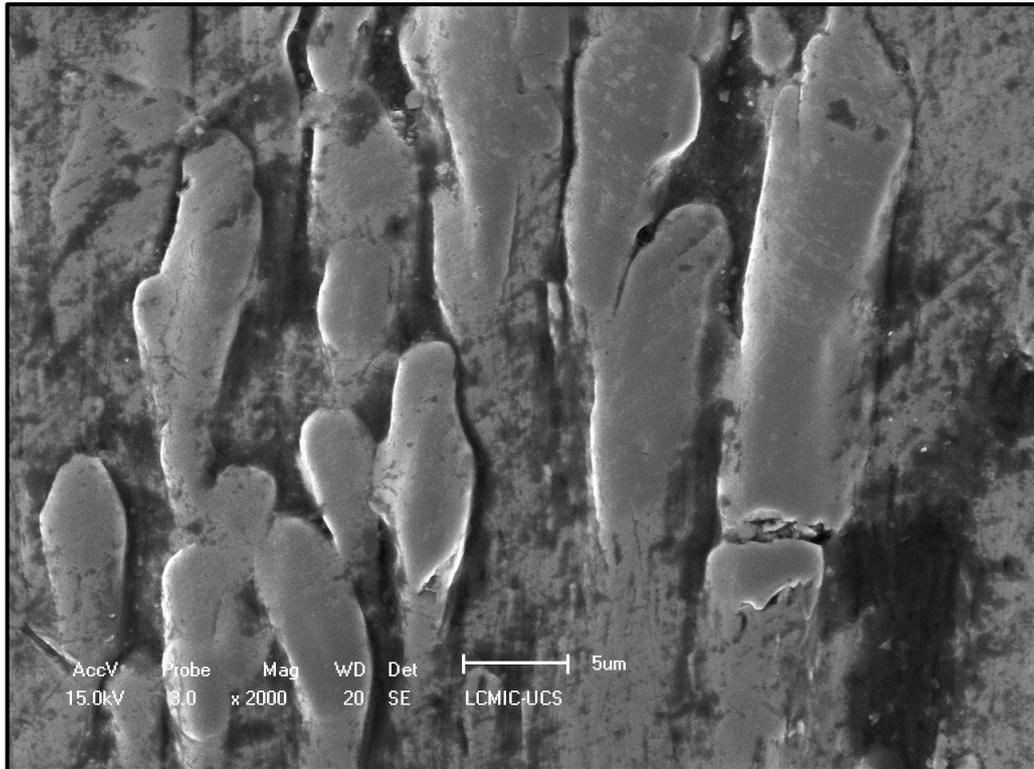
Fonte: O autor (2019).

Amostra 1 (ampliação 1000x)



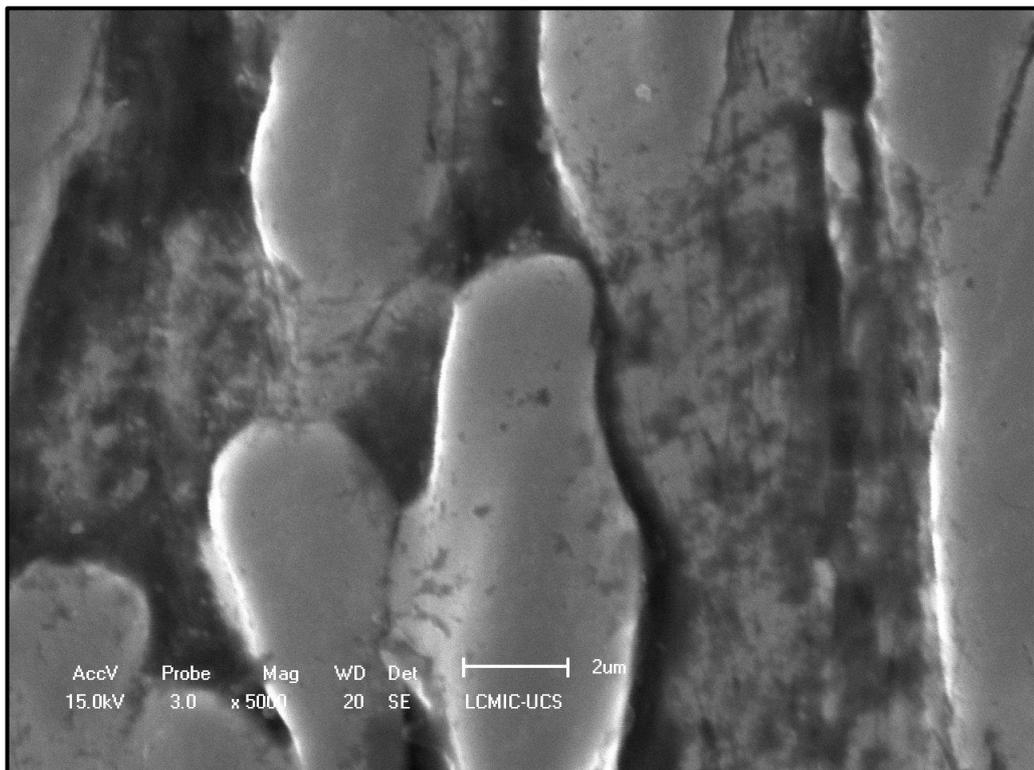
Fonte: O autor (2019).

Amostra 1 (ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

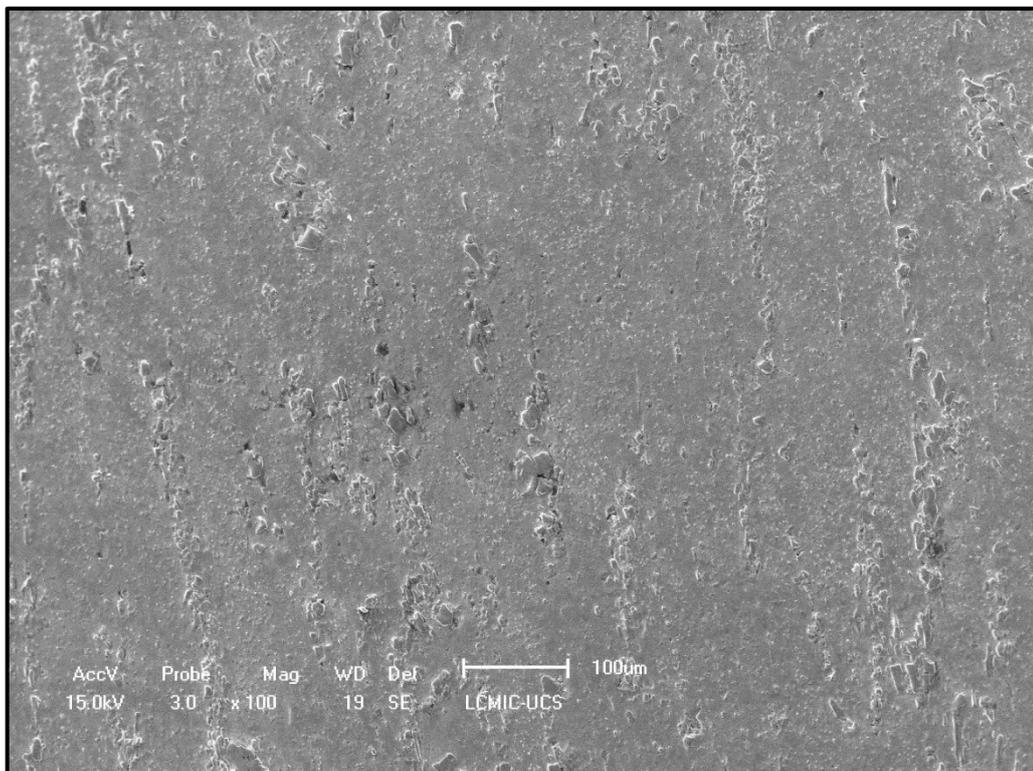
Amostra 1 (ampliação 5000x)



Fonte: O autor (2019).

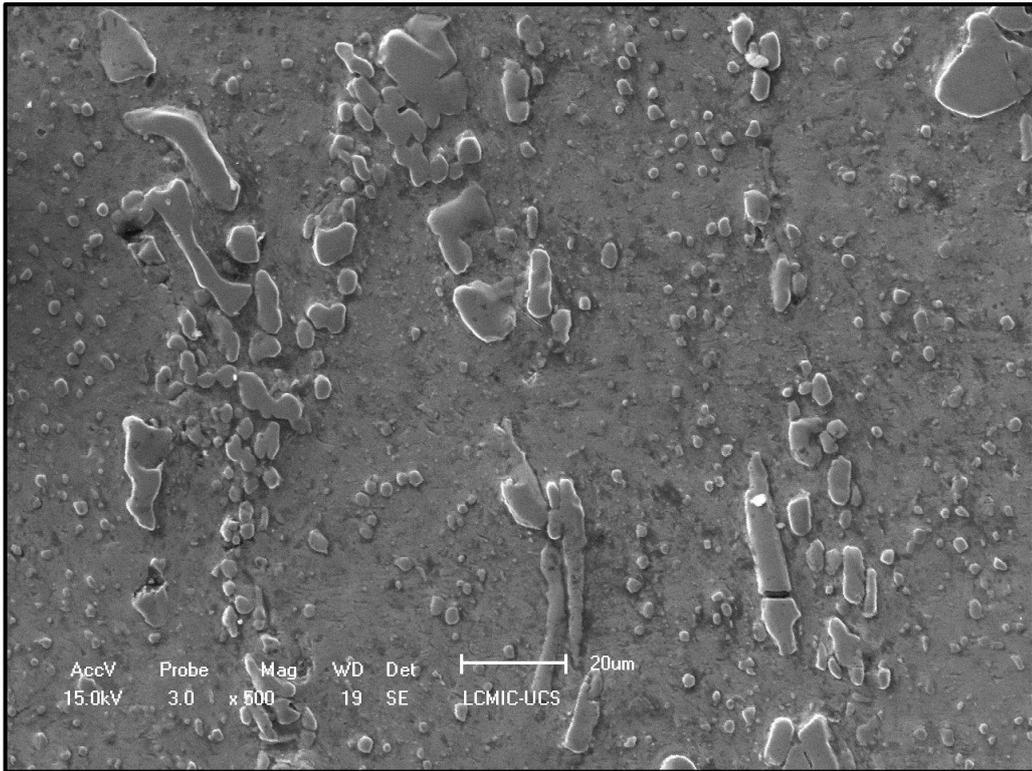
## APÊNDICE B – AMOSTRA 2

Amostra 2 (ampliação 100x)



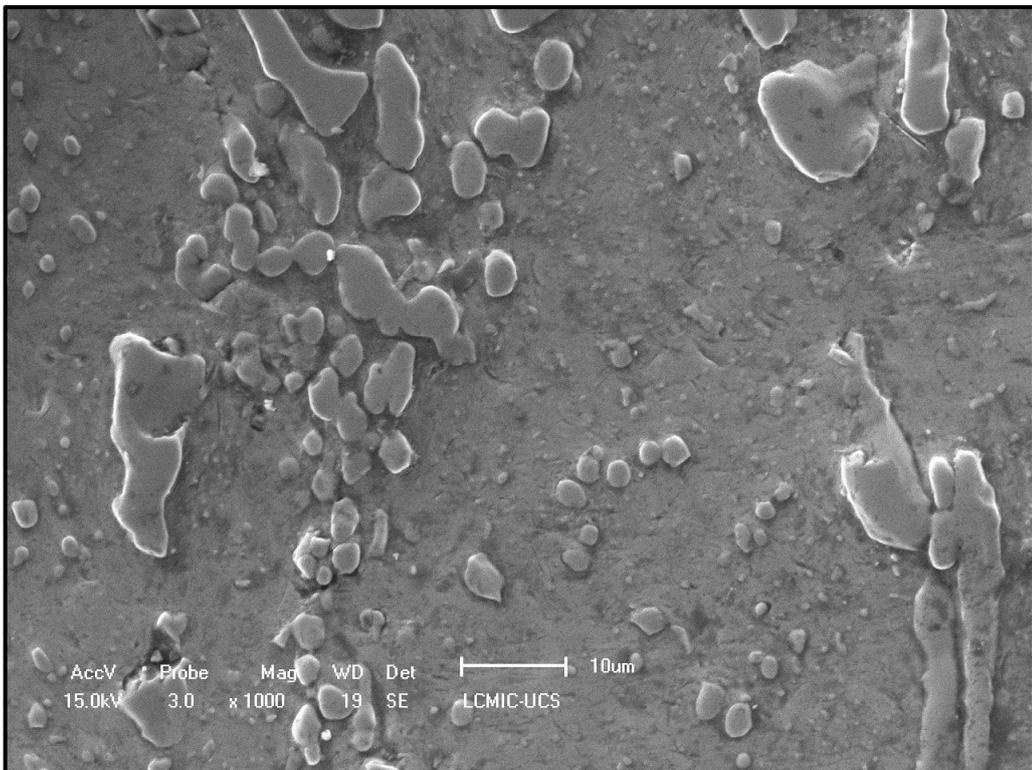
Fonte: O autor (2019).

Amostra 2 (ampliação 500x)



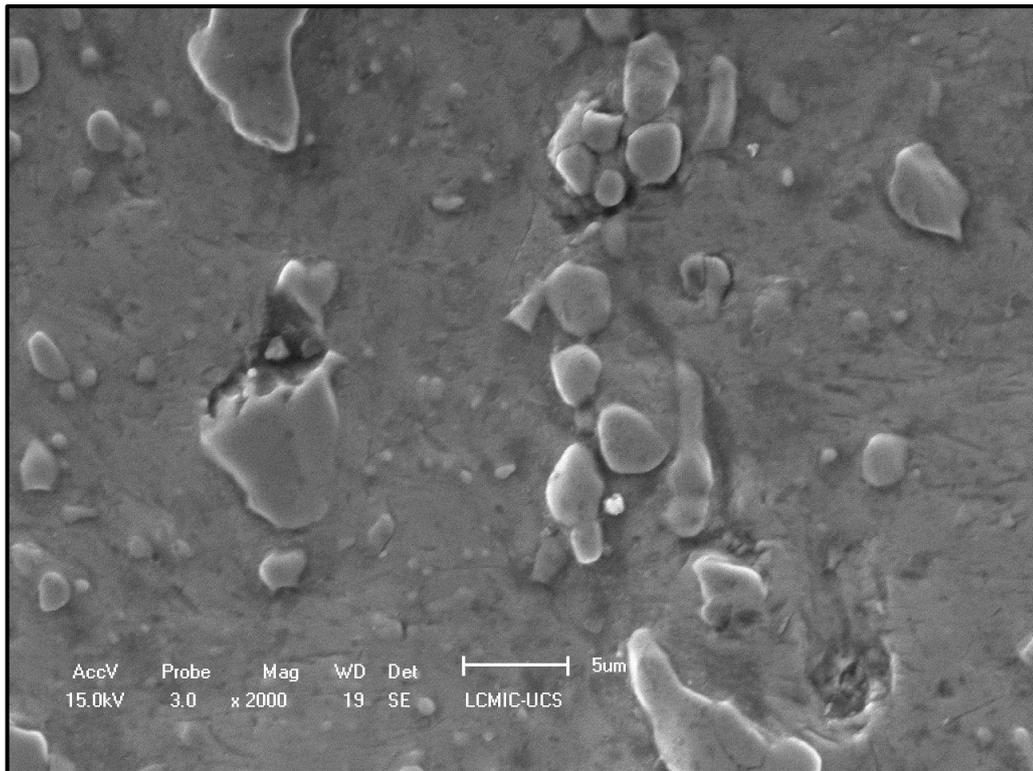
Fonte: O autor (2019).

Amostra 2 (ampliação 1000x)



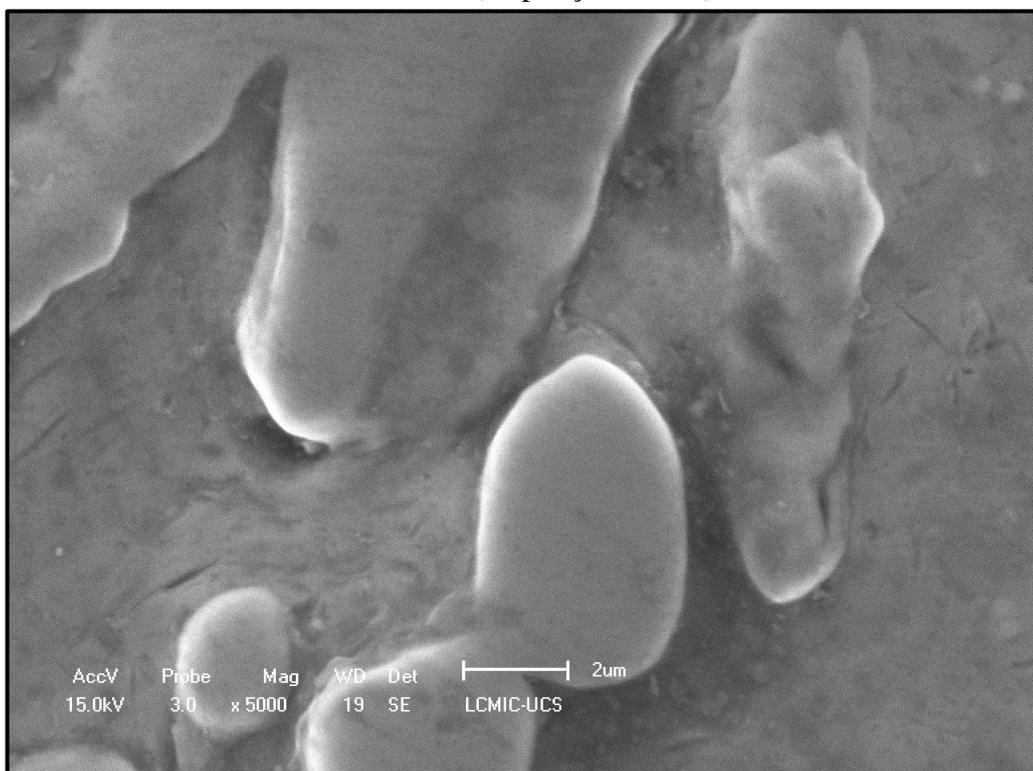
Fonte: O autor (2019).

Amostra 2 (ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

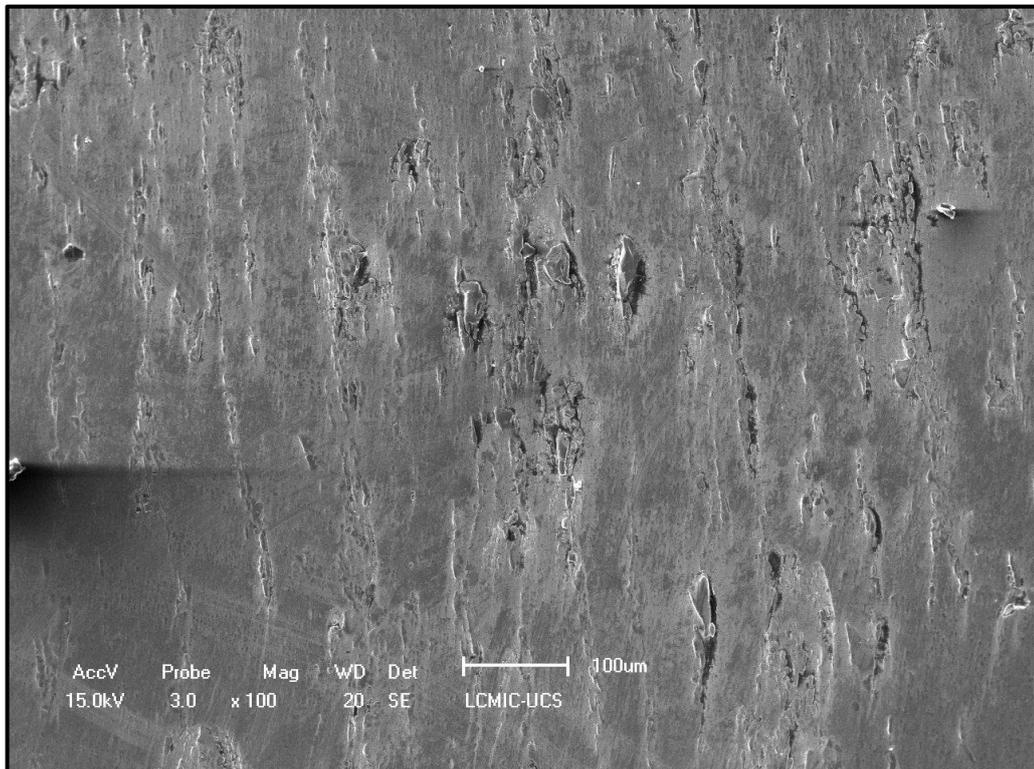
Amostra 2 (ampliação 5000x)



Fonte: O autor (2019).

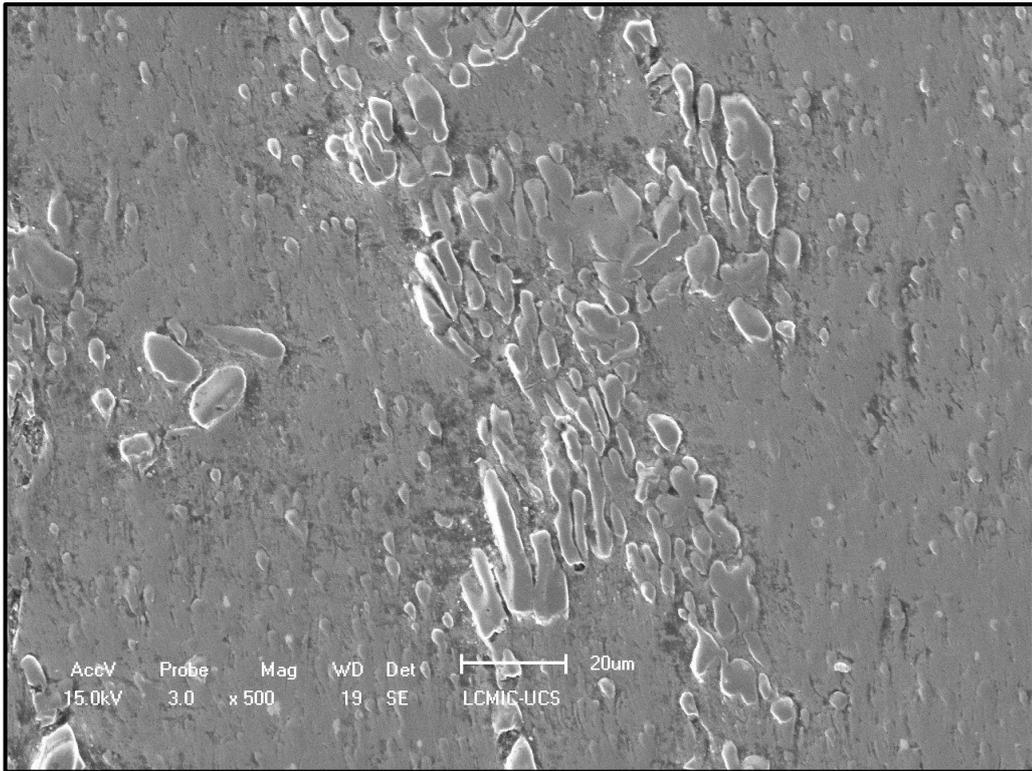
### APÊNDICE C – AMOSTRA 3

Amostra 3 (ampliação 100x)



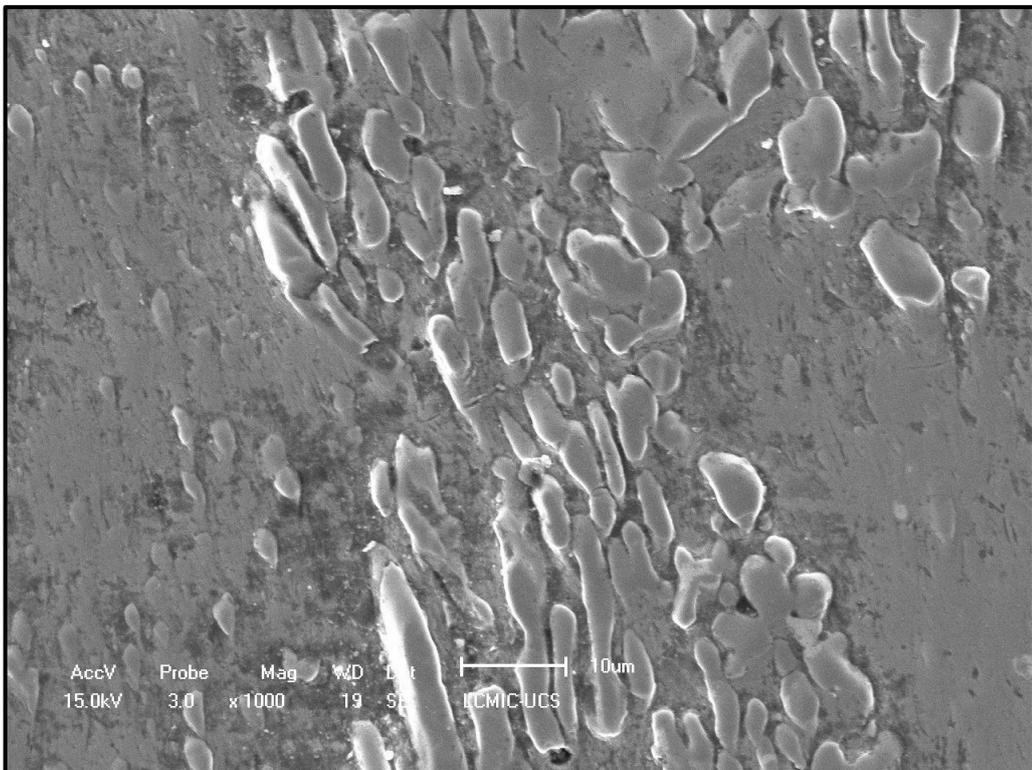
Fonte: O autor (2019).

Amostra 3 (ampliação 500x)



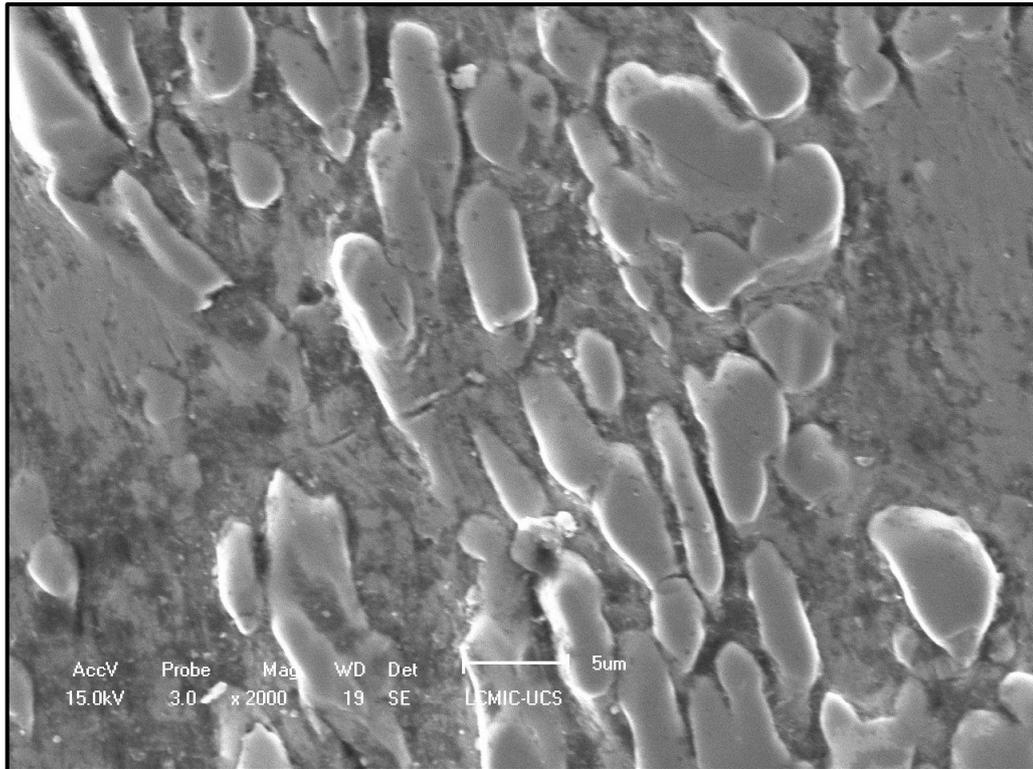
Fonte: O autor (2019).

Amostra 3 (ampliação 1000x)



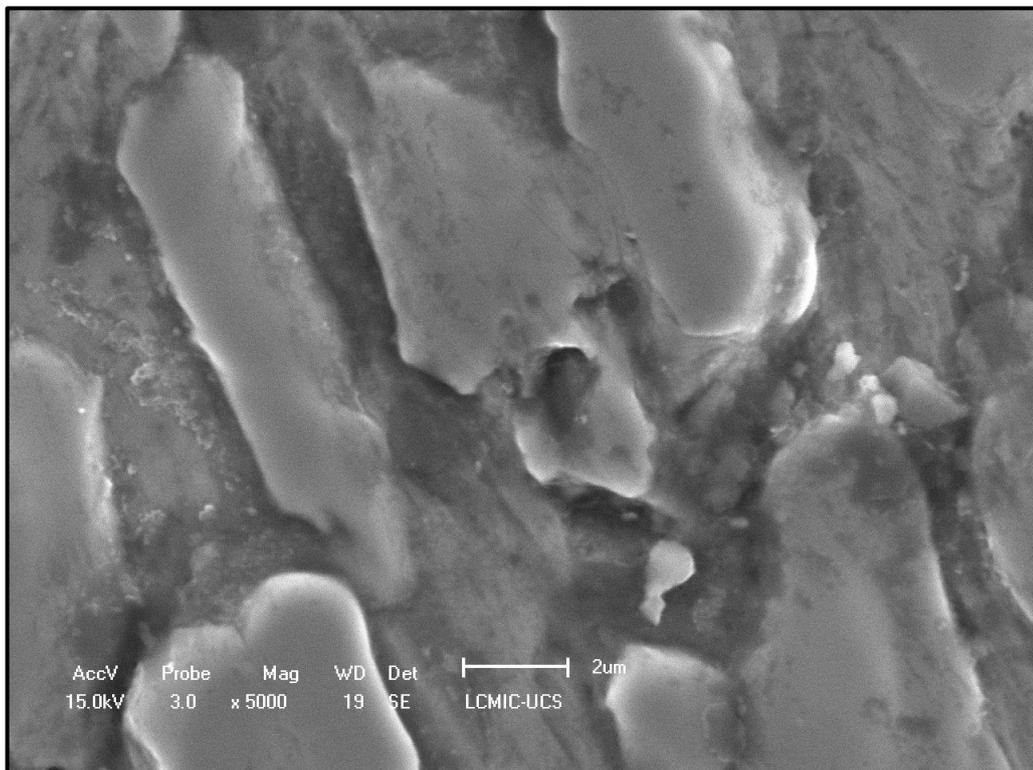
Fonte: O autor (2019).

Amostra 3 (ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

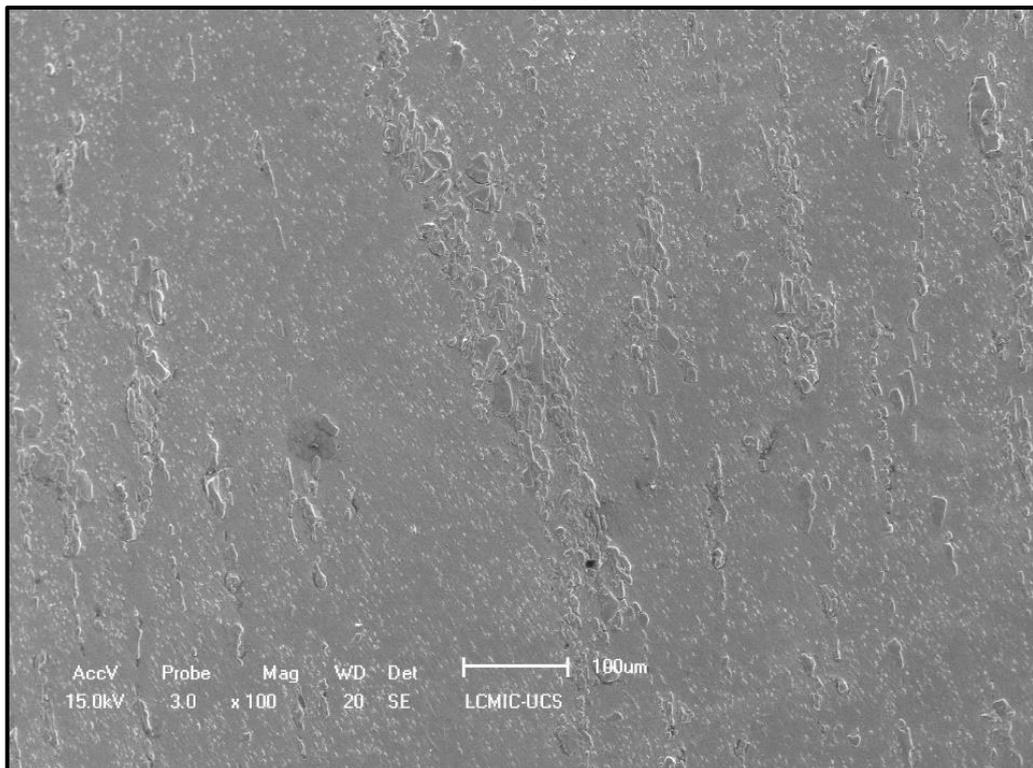
Amostra 3 (ampliação 5000x)



Fonte: O autor (2019).

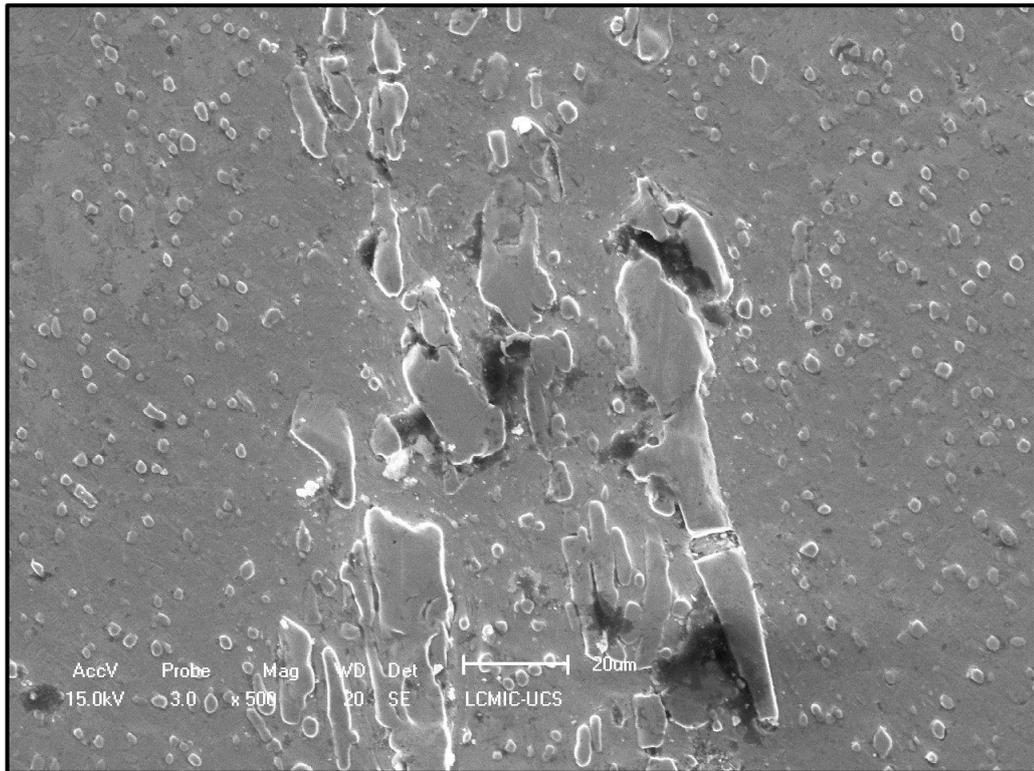
## APÊNDICE D – AMOSTRA 4

Amostra 4 (ampliação 100x)



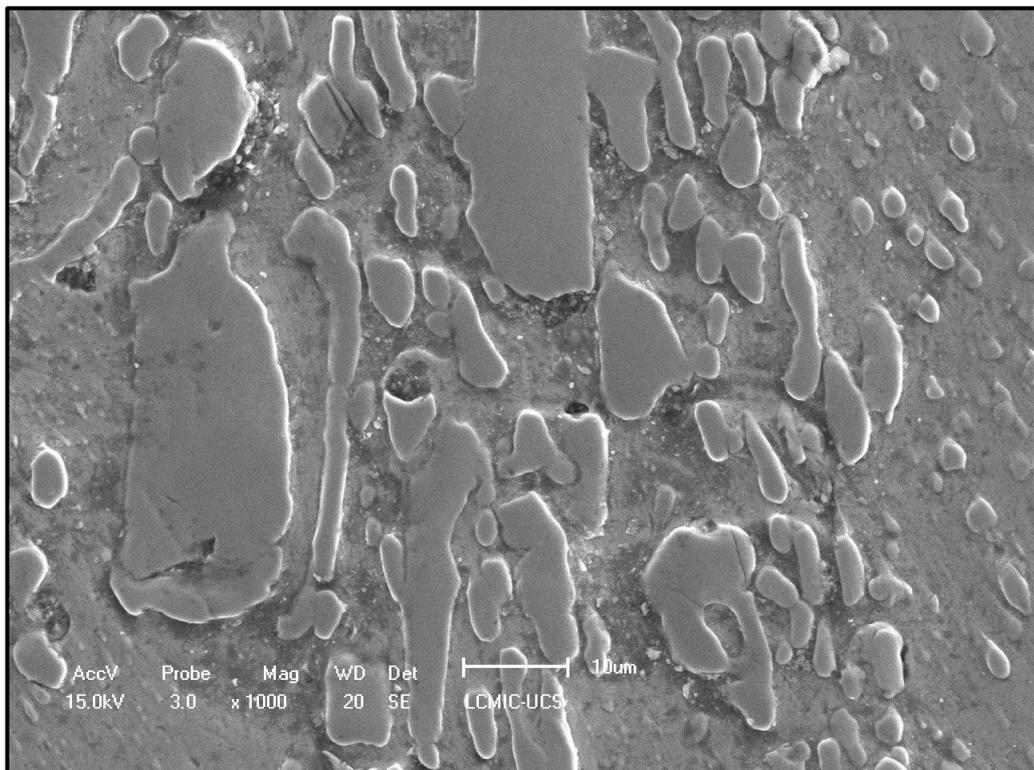
Fonte: O autor (2019).

Amostra 4 (ampliação 500x)



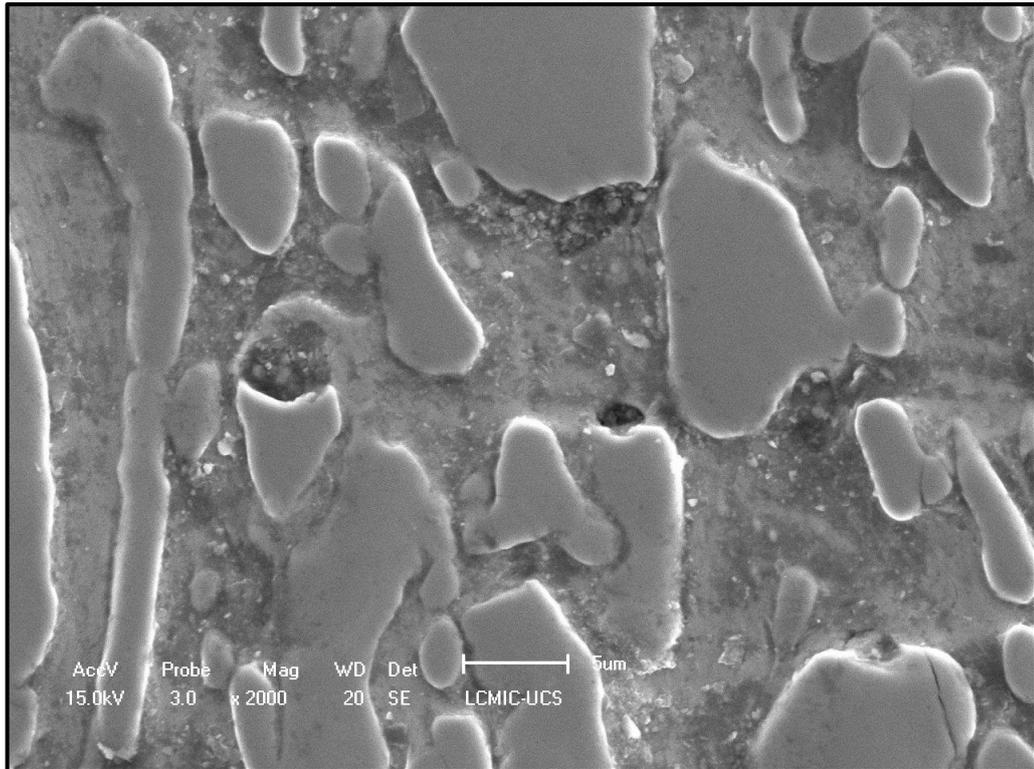
Fonte: O autor (2019).

Amostra 4 (ampliação 1000x)



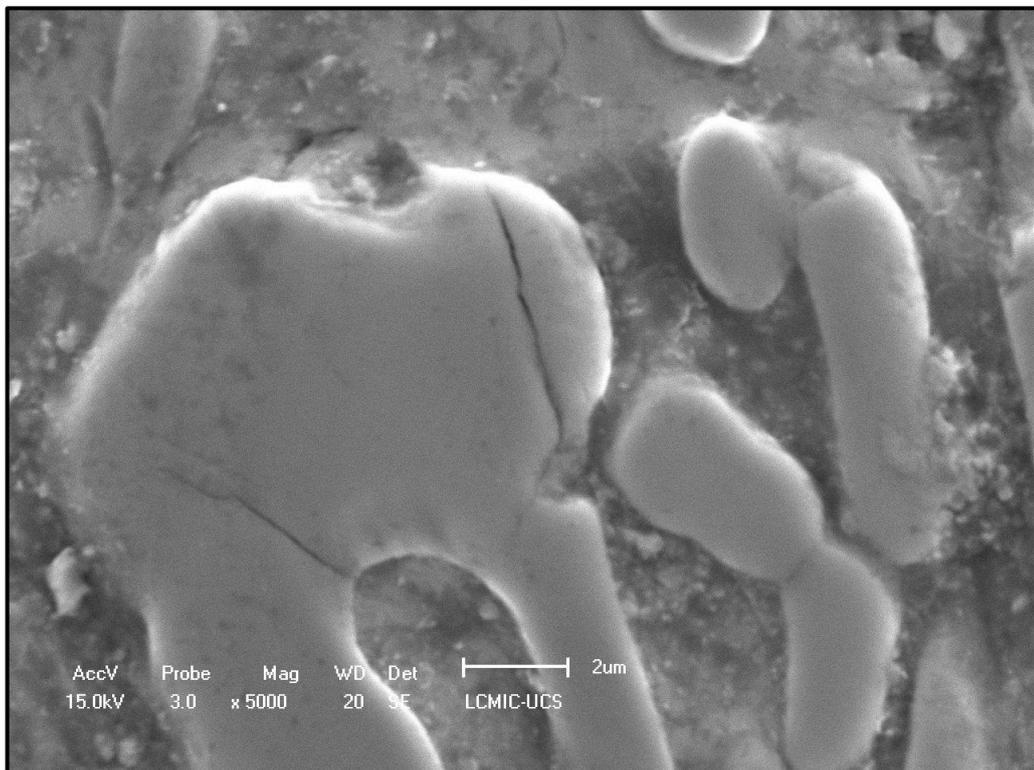
Fonte: O autor (2019).

Amostra 4 (ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

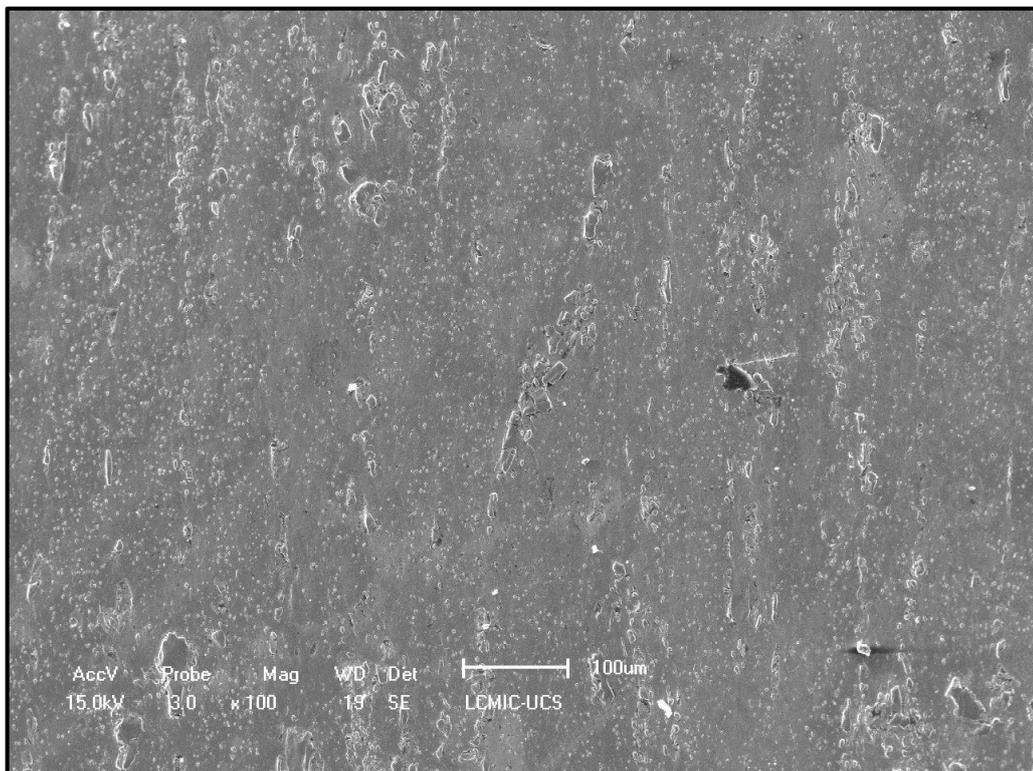
Amostra 4 (ampliação 5000x)



Fonte: O autor (2019).

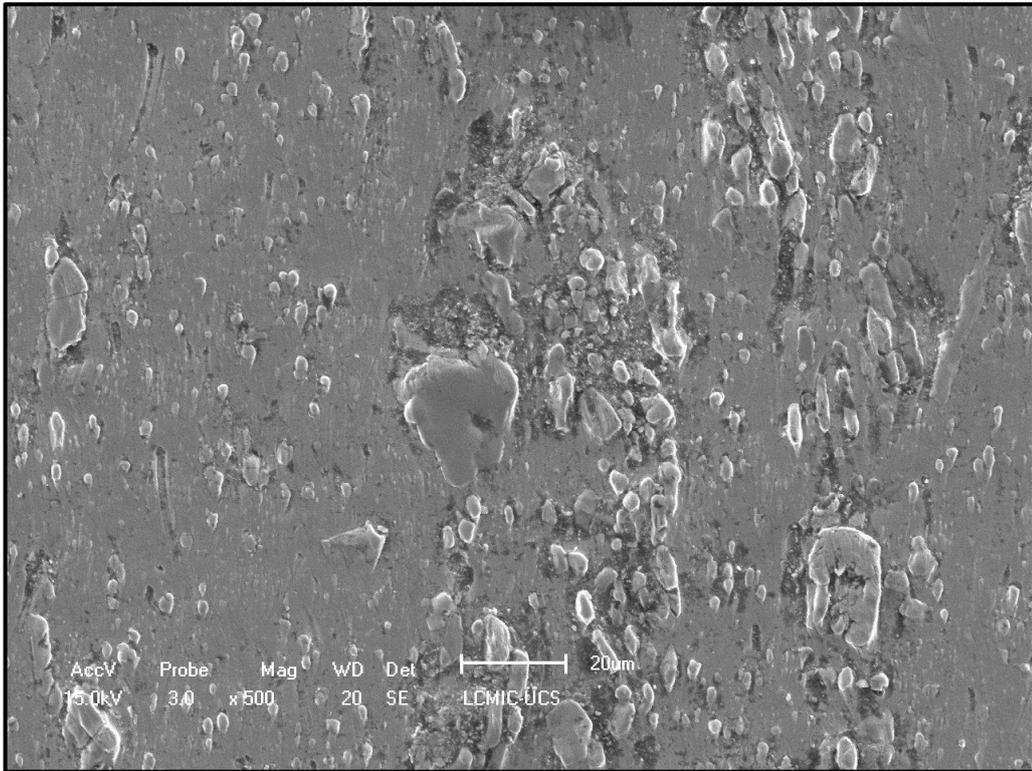
## APÊNDICE E – AMOSTRA 5

Amostra 5 (ampliação 100x)



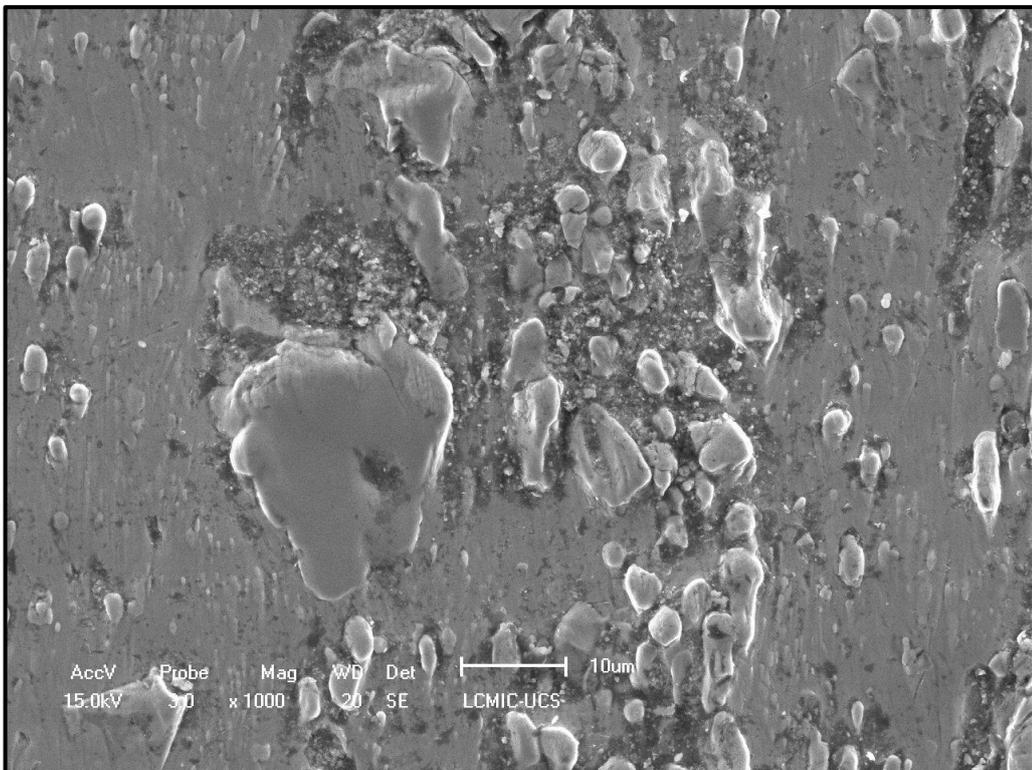
Fonte: O autor (2019).

Amostra 5 (ampliação 500x)



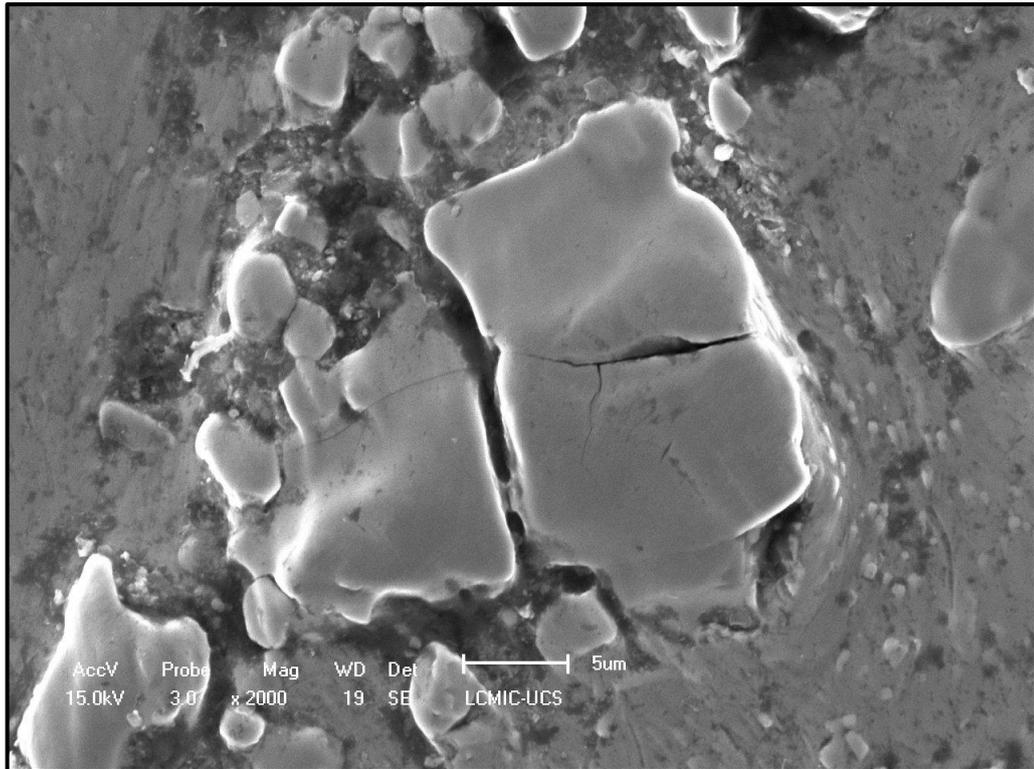
Fonte: O autor (2019).

Amostra 5 (ampliação 1000x)



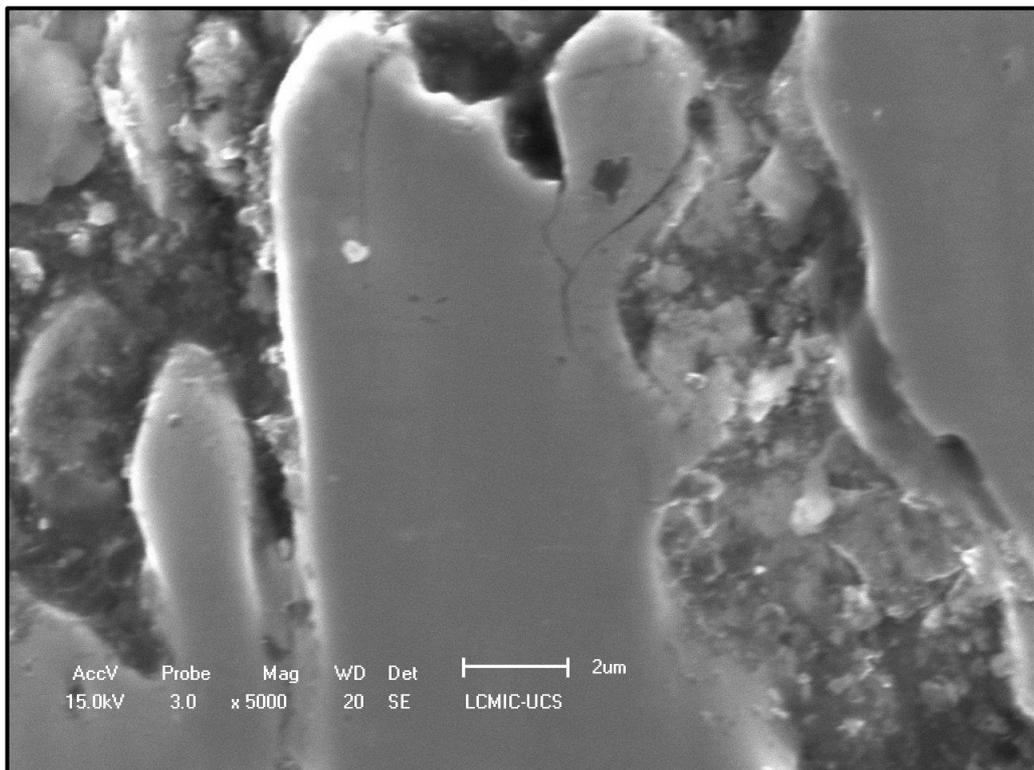
Fonte: O autor (2019).

Amostra 5 (ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

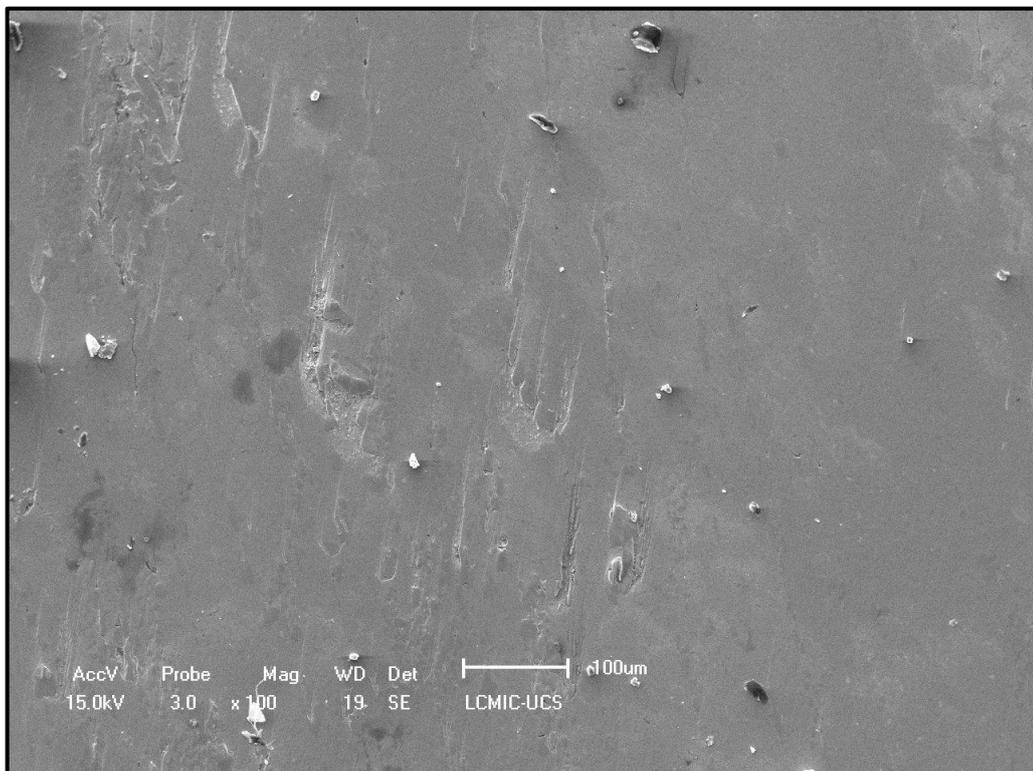
Amostra 5 (ampliação 5000x)



Fonte: O autor (2019).

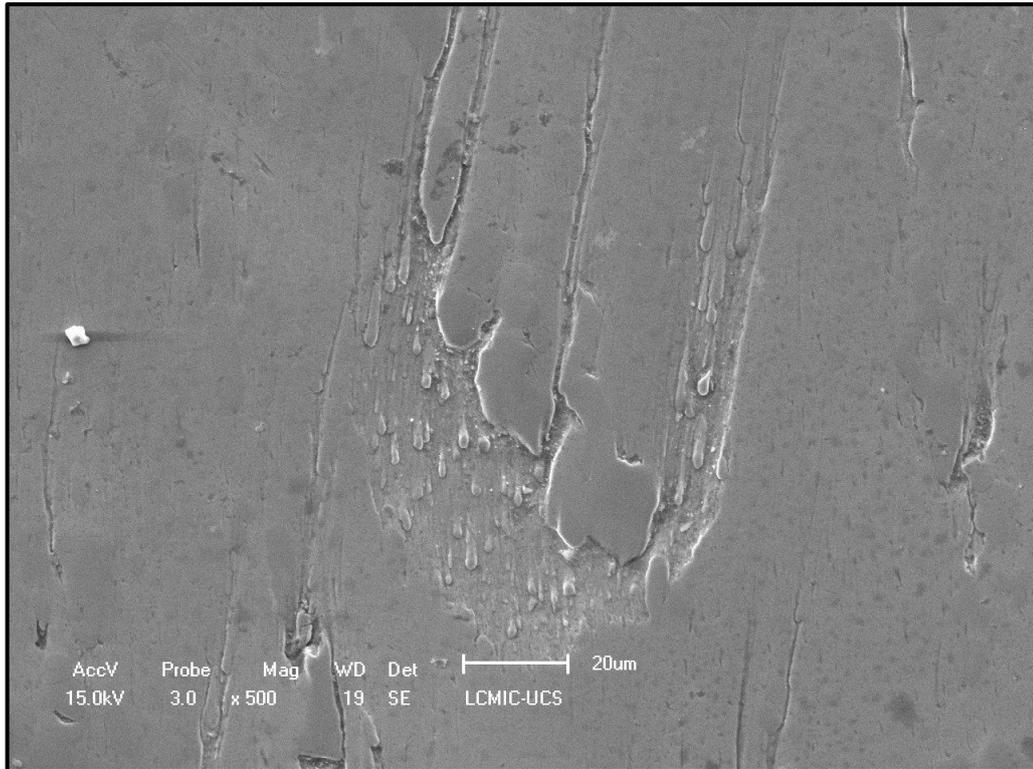
## APÊNDICE F – AMOSTRA 6

Amostra 6 (ampliação 100x)



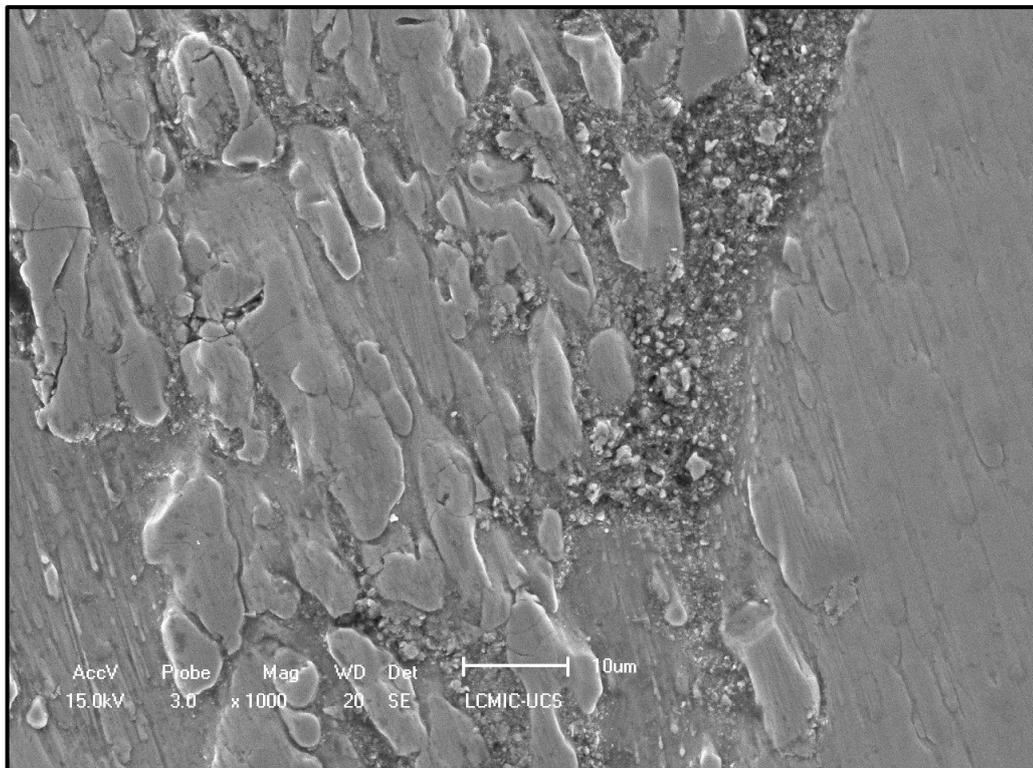
Fonte: O autor (2019).

Amostra 6 (ampliação 500x)



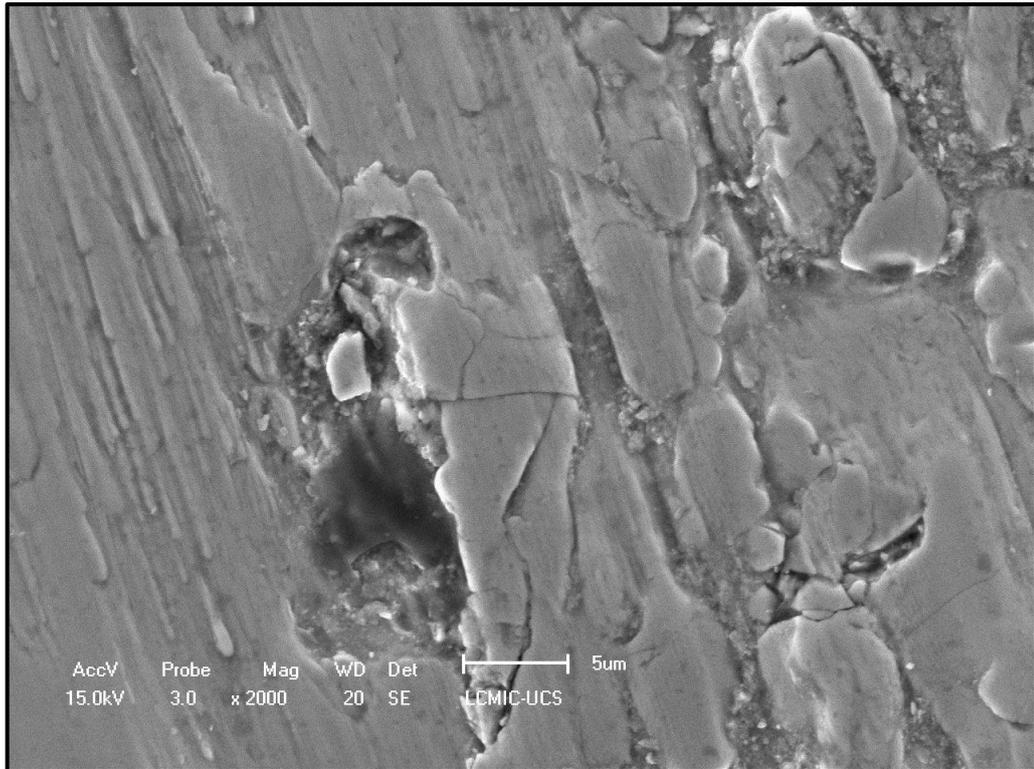
Fonte: O autor (2019).

Amostra 6 (ampliação 1000x)



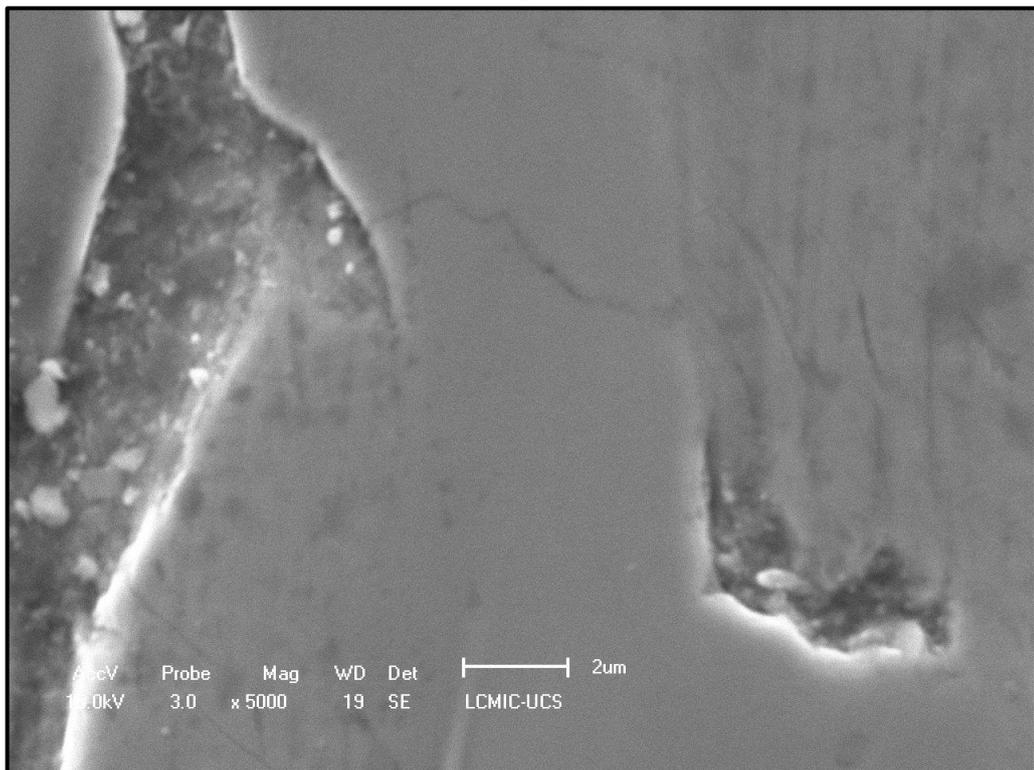
Fonte: O autor (2019).

Amostra 6 (ampliação 2000x)



Fonte: O autor (2019).

Amostra 6 (ampliação 5000x)



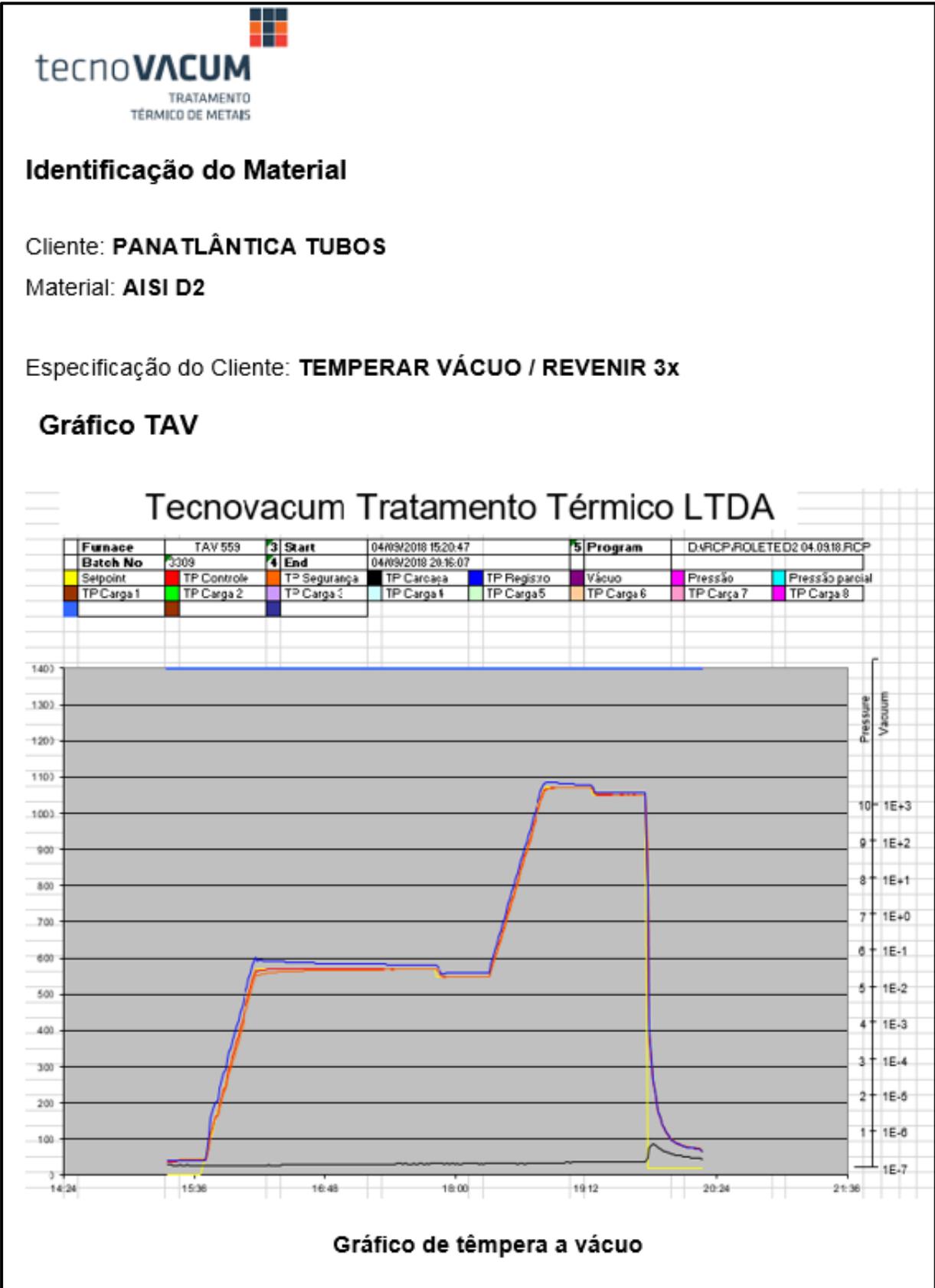
Fonte: O autor (2019).

**ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO MATERIAL**

Certificado Nº / Certificate Nr. 040580 /01		Nota Fiscal Nº / Invoice Nr. 040580 /01		Schmolz + Bickenbach do Brasil Indústria e Comércio de Aços Ltda. Rua José Antônio Valadares, 285 CEP: 04185-020 - Vila Livieiro São Paulo - SP - Brasil Tel.: 55 11 2083-9000 Fax: 55 11 2083-9080						
Data / Date 20/08/18		Nº de Controle de Certificado / Certificate Control Nr.								
Cliente / Customer PANATLANTICA IND. E COMERCIO DE TUBOS SA										
Referência Cliente / Customer's Reference AMOSTRA										
Identificação do Material / Material Identification 23791 - CRYODUR 2379 REDONDO						Acabamento / Workmanship DESCASCADO		Fabricação / Manufacturing LAMINADO		
Medida 1 / Dimension 1 0025.50		Medida 2 / Dimension 2 0000.00		Medida 3 / Dimension 3 0030.00		Peso / Weight (KG) 0,25		OS / Service Order 061609/01		Ficha Nº / Card Nr. 17060122
Composição Química / Chemical Composition										
Corrida Nº / Heat Nr. 201403250		C 1,47000	Mn 0,33000	S 0,00500	Mo 0,83000	Al 0,00000	V 0,85000	Si 0,38000	P 0,02500	Cr 11,75000
Ni 0,00000	W 0,00000	Co 0,00000	Ti 0,00000	Cu 0,09000	Fe BAL	Mq 0,00000	Zn 0,00000	Zr 0,00000	Pb 0,00000	N 0,00000
Usina de Origem / Mill Supplier						Certificado Nº / Certificate Nr.				
Tratamento Térmico / Heat Treatment										
Certificado Nº Item / Certificate Nr. Item				Tipo / Type RECOZIDO			Tamanho Grão / Grain Size			
Dureza / Hardness 205-215 HB				Empresa / Company						
Ensaio Mecânicos / Mechanical Tests										
T R A Ç Ã O	Certificado Nº / Certificate Nr.			L.E. / Y.S.			L.R. / T.S.			
	Alongamento / Elongation			Estricção / R.A.						
I M P A C T O	Certificado Nº / Certificate Nr.		Tipo / Type		Temperatura / Temperature (°C)		CP1 / (Specimen Number)			
	CP2 / (Specimen Number)		CP3 / (Specimen Number)		Média / Average					
Ensaio Não Destrutivos / No-Destructive Tests										
Ensaio / Test			Norma de Referência / Standard			Número do Relatório / Report Number		Resultado / Results		
Observações / Observation 118889/14080135.						Assinatura / Signature Engº Andre Augusto de Araujo V CREA: 5061968567				
<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE / QUALITY CERTIFICATE</b>										
Nós certificamos que a informação neste documento é uma reprodução exata do certificado da usina.										

Fonte: Schmolz + Bickenbach do Brasil (2018).

## ANEXO B – GRÁFICO TÊMPERA



Fonte: Tecnovacum (2018).

### ANEXO C – CERTIFICADO NITRETAÇÃO



**Plasmar**  
tecnologia

**Certificado de Qualidade**

Laudo Técnico nº: 8186  
Data: 13/11/2018

Cliente: PANATLANTICA IND. E COM. DE TUBOS S.A.

Orçamento:

NF. Entrada: 425020 - Pedido: 332.150

NF. Saída: 8186

Produto/Material: SAE D2

Quantidade de Peças: 8

Peso total (kg): 22,5

Tratamento Plasmar: Nitretação a Plasma

Temperatura de tratamento (°C): 480

Dureza medida no corpo de prova (HV 0,2 / HRC): 1000 HV - ( 69 HRC )

Espessura da camada (mm): 0,2



Observações:

\*\*\* Valores em HRC apenas como referência à dureza superficial - não pode ser medido com durômetro convencional.

Eng. Stevan S. Tomiello  
Sócio Diretor

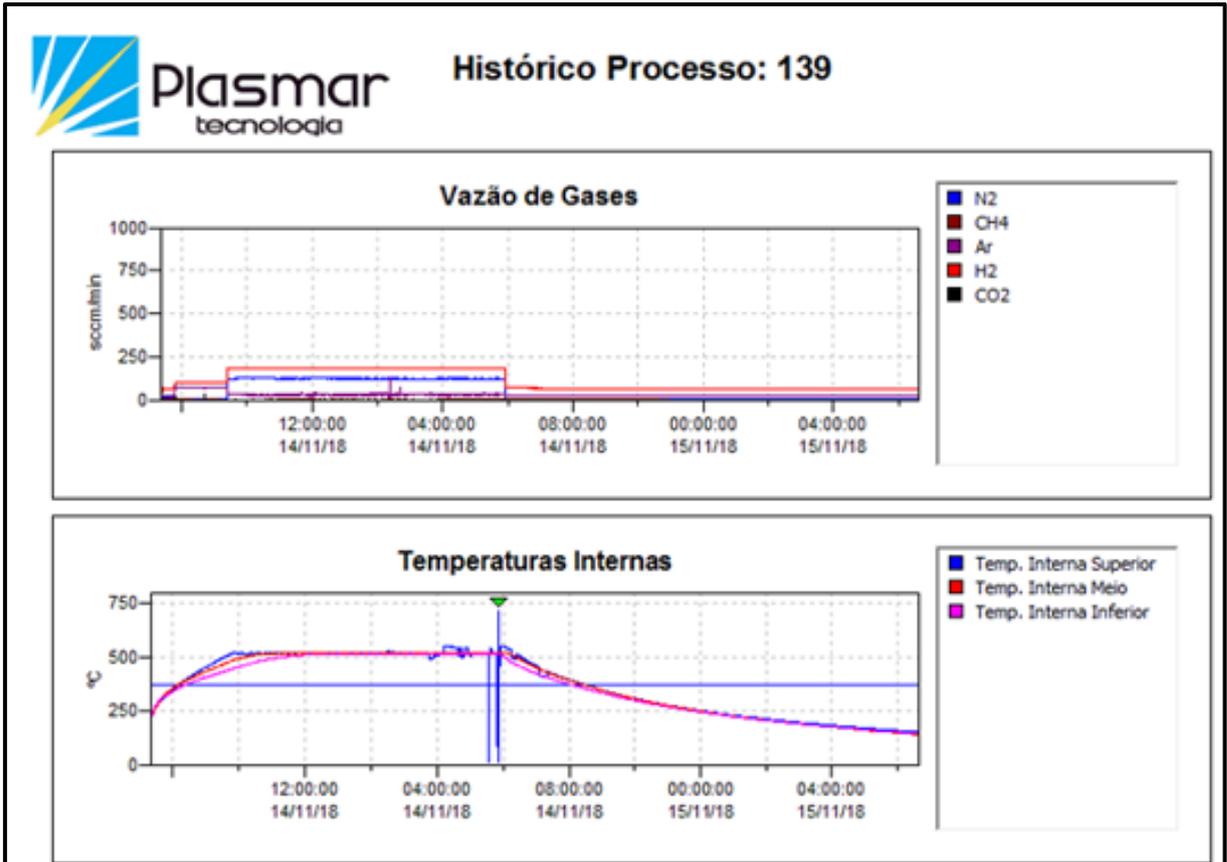
Prof. Dr. Carlos A. Figueroa  
Sócio Diretor

Rua Ercília Sgorla Luza, 180 – Bairro Santa Catarina. Caxias do Sul – RS  
Fone: (54) 3536.0090/(54)3536.0091  
stevan@plasmartecnologia.com.br



Fonte: Plasmar Tecnologia (2018).

**ANEXO D – GRÁFICOS DO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO**



Fonte: Plasmar Tecnologia (2018).