



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**



Dissertação de mestrado

Steferson Ferreira de Oliveira

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DO AÇO SAE 52100  
BENEFICIADO E NITRETADO POR DESCARGAS ELÉTRICAS**

Belo Horizonte

2018



Steferson Ferreira de Oliveira

## **Avaliação das propriedades tribológicas do aço SAE 52100 beneficiado e nitretado por descargas elétricas**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa: Seleção, processamento e caracterização

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Coorientador: Prof.Dr. Marcelo Araújo Câmara

Belo Horizonte

2018

O48a Oliveira, Steferson Ferreira.  
Avaliação das propriedades tribológicas do aço SAE 52100 beneficiado e nitretado por descargas elétricas / Steferson Ferreira de Oliveira. – 2018.  
116 f. : il., fotos, grafs., tabs.  
Orientador: Ernane Rodrigues da Silva  
Coorientador: Marcelo Araújo Câmara

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.  
Bibliografia.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Nitretação iônica. 3. Implantação iônica. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Câmara, Marcelo Araújo. III. Título.

CDD: 671.35



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*  
*“AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DO*  
*AÇO SAE 52100 BENEFICIADO E NITRETADO POR*  
*DESCARGAS ELÉTRICAS”*

Autor: Steferson Ferreira de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (ORIENTADOR)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara (COORIENTADOR)  
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Profª. Drª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Rogério Felício dos Santos  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 20 de Fevereiro de 2018.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Pedro (*in memoriam*) e Maria, sábios, conselheiros, amigos e companheiros inseparáveis.

Ao meu orientador, Professor Ernane Rodrigues da Silva, por toda dedicação, incentivo, conhecimento, paciência e confiança.

Ao Professor Marcelo Araújo Câmara pela coorientação, conhecimento e confiança.

À Professora Elaine Carballo Siqueira Corrêa, por todo conhecimento e incentivo.

Aos Professores Rogério Felício dos Santos, por todo conhecimento e contribuições.

Aos Professores Carlos Eduardo dos Santos e Odilon Soares da Silva pelo conhecimento e disponibilidade.

Ao Professor Augusto Bezerra e toda a coordenação do Mestrado em Engenharia de Materiais.

Ao técnico Geraldo Oliveira por todo o auxílio.

Aos mestrandos Anderson Santos e Douglas d'Auriol por suas respectivas contribuições nos ensaios de perfilometria e Pino sobre disco, respectivamente.

Aos amigos do mestrado, Loudiana, Vinícius, Cintia, Lorena, Douglas, Davi, Pedro e Lucas.

## RESUMO

O aço SAE 52100, em geral fornecido na condição esferoidizada, é bastante utilizado em componentes de rolamentos como pistas internas e externas, esferas, roletes e agulhas. O desenvolvimento da engenharia de superfície e suas novas abordagens de controle de atrito e desgaste permitiram o aumento da vida útil de componentes, no qual destacam-se os tratamentos térmicos e termoquímicos. A máquina convencional de usinagem por descargas elétricas (EDM), geralmente utilizada em processos de eletroerosão, foi adaptada em um novo processo denominado nitretação por descargas elétricas (NDE) que, por meio de uma solução dielétrica de concentração (30g / L) utilizado como fonte de nitrogênio composta de água deionizada e ureia, foi possível enriquecer a superfície do aço SAE 52100 com nitretos de ferro e cromo. Este trabalho investiga a influência do beneficiamento do aço SAE 52100 aliado a nitretação por descargas elétricas para a obtenção de melhores propriedades ao desgaste por deslizamento. Utilizou-se de técnicas de microscopia óptica (OM) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), revelando uma camada uniforme e endurecida, bem como o aumento de dureza em relação ao substrato avaliado pelo ensaio de microdureza Vickers (HV). A formação dos nitretos foi comprovada por meio de difração de Raio-X (DRX) e as propriedades ao desgaste por deslizamento foram medidas por meio de curvas de coeficiente de atrito por distância de deslizamento, realizadas em um tribômetro pino sobre disco. Foram realizados mapeamentos por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) nas trilhas formadas durante o ensaio de desgaste por deslizamento para a identificação do mecanismo de desgaste adesivo. O trabalho confirma que a modificação da superfície aumenta a resistência ao desgaste, pois contribui para a diminuição do atrito, aumento da resistência mecânica e diminuição da taxa de desgaste do aço SAE 52100.

Palavras-chave: Nitretação por descargas elétricas. Caracterização da camada nitretada. Desgaste por deslizamento. SAE 52100.

## ABSTRACT

SAE 52100 steel, usually supplied in the spheroid condition, is widely used in bearing components such as inner and outer raceways, balls, rollers and needles. The development of surface engineering and its new approaches to control friction and wear, allowed the increase of the useful life of components, in which the thermal and thermochemical treatments stand out. The conventional electric discharge machining (EDM) machine, generally used in electro-erosion processes, was adapted in a new process called nitriding by electric discharges (NDE) that by means of a dielectric concentration solution (30g / l) as a source of nitrogen composite of deionized water and urea, it was possible to enrich the SAE 52100 steel surface with iron and chromium nitrides. This work investigates the influence of the SAE 52100 steel alloyed with nitriding by electric discharges to obtain better properties due to wear. Optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) techniques were used, revealing a uniform and hardened layer, as well as the increase of hardness in relation to the substrate evaluated by the Vickers (HV) microhardness test. The formation of nitrides was confirmed by X-ray diffraction (XRD) and slip wear properties were measured by sliding distance friction coefficient curves performed on a pin-on-disc tribometer. Dispersive energy spectroscopy (EDS) mapping was performed on tracks formed during the slip wear test to identify the adhesive wear mechanism. The work confirms that the surface modification increases the wear resistance because it contributed to the decrease of the friction, increase of the mechanical resistance and decrease of the wear rate of SAE 52100 steel.

Key words: Electric Discharge Nitriding. Nitrited layer characterization. Sliding Wear. SAE 52100 steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros de projetos de rolamentos. ....	20
Figura 2 - Diagrama de fases do aço SAE 52100 calculado usando ThermoCalc software (TCFE6) para 1 atm de pressão. ....	21
Figura 3 - Diagrama de transformação isotérmica do aço SAE 52100.....	22
Figura 4 - Faixa de temperabilidade Jominy para o SAE 52100. ....	24
Figura 5 - Curva de temperatura de revenido em função da dureza para o SAE 52100. ....	25
Figura 6 - Resumo dos métodos disponíveis na engenharia de superfície. ....	26
Figura 7 - Visão esquematizada de um tribosistema.....	28
Figura 8 - Visão esquematizada da área de contato aparente e real entre duas superfícies em contato. ....	29
Figura 9 - Processo de transferência de material devido à adesão.....	31
Figura 10 - Coeficiente de adesão médio em função da dureza dos metais. ....	31
Figura 11 - Mecanismos de formação de sulcos em metais ....	33
Figura 12 - Desgaste a dois e a três corpos.....	34
Figura 13 - Coeficiente de abrasão médio em função da dureza dos metais.....	35
Figura 14 - Interações físicas entre partículas abrasivas e superfície dos materiais. ....	36
Figura 15 - Trincas subsuperficiais em fadiga de contato no rolamento. ....	38
Figura 16 - Mecanismo de pitting em fadiga de contato no rolamento. ....	38
Figura 17- Modelos de interação entre um agente corrosivo e uma superfície desgastada.....	39
Figura 18 - Esquema de funcionamento de um tribômetro do tipo pino sobre disco. ....	40
Figura 19 - Curva típica de tempo ou distância de deslizamento em metais.....	41
Figura 20 - Detalhamento da curva de força de atrito por tempo. ....	43
Figura 21 - Representação da ionização no processo usinagem por descargas elétricas. ....	45
Figura 22 - Fase ignição com o início da descarga. ....	46
Figura 23 - Formação do canal de plasma devido a colisão dos elétrons em alta velocidade. ....	47
Figura 24- As fases de fusão e de sublimação dos materiais. ....	48
Figura 25 - Limpeza dos resíduos após interrupção do canal de plasma. ....	48
Figura 26- Formação da zona ressolidificada.....	49

Figura 27- Diagrama de fase Fe – N.....	49
Figura 28 - Amostra de Ti6Al4V nitretada por EDM. ....	51
Figura 29 - Fluxograma do procedimento experimental realizado no trabalho.....	52
Figura 30 - Formato dos eletrodos peças e ferramentas.....	53
Figura 31- Máquina de eletroerosão por penetração (modelo Servspark Eletroplus EDM-540).....	55
Figura 32 - Detalhe interno da cuba auxiliar e fixação do eletrodo ferramenta. ....	55
Figura 33 - Indicação dos parâmetros ajustados no painel da máquina. ....	56
Figura 34 – Microscopia Óptica da microestrutura esferoidizada (MO).....	63
Figura 35 - Microestrutura beneficiada (MO).....	64
Figura 36 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça esferoidizado com a utilização do eletrodo ferramenta de cobre – ataque com reagente Nital 3%. ....	65
Figura 37 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça beneficiado com a utilização de eletrodo ferramenta de cobre – ataque com reagente Nital 3%. ....	65
Figura 38 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça esferoidizado com utilização do eletrodo ferramenta de grafita – ataque com reagente Nital 3%. ....	66
Figura 39 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça beneficiado com a utilização de eletrodo ferramenta de grafita – ataque com reagente Nital 3%. ....	66
Figura 40 – Comparação das espessuras das camadas no aço SAE 52100.....	68
Figura 41 - Boxplot dos valores de Microdureza vickers (HV) da zona refundida (ZR). ....	69
Figura 42 - Boxplot dos valores de Microdureza Vickers (HV) da zona afetada pelo calor (ZAC).....	70
Figura 43 - Boxplot dos valores de Microdureza Vickers (HV) para a Matriz. ....	71
Figura 44 – Difratomogramas do Beneficiamento do aço SAE 52100. ....	72
Figura 45 – Difratomogramas de Nitretação por descargas elétricas do aço SAE 52100. ....	73
Figura 46 – Trilha de desgaste do material esferoidizado.....	75
Figura 47 – Debris na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado. ....	76
Figura 48 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado. ....	76
Figura 49 – Detalhe da superfície com trincas do material esferoidizado ....	77
Figura 50 – Trilha de desgaste do material beneficiado.....	77
Figura 51 – Debris na superfície da trilha de desgaste do material beneficiado. ....	78
Figura 52 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material beneficiado. ....	78

Figura 53 – Detalhe da superfície com trincas do material beneficiado. ....	79
Figura 54 – Trilha de desgaste esferoidizado / cobre.....	79
Figura 55 – Debris na superfície do material esferoidizado / cobre.....	80
Figura 56 – Trincas na superfície do material esferoidizado / cobre. ....	80
Figura 57 – Detalhe da superfície com trincas do material esferoidizado / cobre. ...	81
Figura 58 – Trilha de desgaste esferoidizado / grafita.....	81
Figura 59 – Debris na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado / grafita. ....	82
Figura 60 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado / grafita. ....	82
Figura 61 – Detalhe da superfície com trincas do material esferoidizado / grafita. ..	83
Figura 62 – Trilha de desgaste do material beneficiado / cobre.....	83
Figura 63 – Debris na superfície da trilha do material beneficiado / cobre.....	84
Figura 64 – Trincas na superfície da trilha do material beneficiado / cobre. ....	84
Figura 65 – Detalhe da superfície com trincas do material beneficiado / cobre. ....	85
Figura 66 – Trilha de desgaste beneficiado / grafita.....	85
Figura 67 – Debris na superfície da trilha do material beneficiado / grafita.....	86
Figura 68 – Trincas na superfície da trilha do material beneficiado / grafita. ....	86
Figura 69 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material beneficiado / grafita. ....	87
Figura 70 – Mapeamento EDS do eletrodo peça esferoidizado sem NDE.....	88
Figura 71 - Mapeamento EDS do eletrodo peça beneficiado sem NDE.....	88
Figura 72 - Mapeamento EDS do eletrodo esferoidizado / cobre.....	88
Figura 73 - Mapeamento EDS do eletrodo esferoidizado / grafita.....	89
Figura 74 - Mapeamento EDS do eletrodo beneficiado / cobre.....	90
Figura 75 - Mapeamento EDS do eletrodo beneficiado / grafita.....	90
Figura 76 – Perfil 3D da trilha do ensaio pino sobre disco. ....	91
Figura 77 – Perfil 2D da superfície da trilha desgastada.....	92
Figura 78 – Comparação da profundidade das trilhas.....	92
Figura 79 – Comparação da profundidade das trilhas com a camada nitretada. ....	93
Figura 80 - Gráfico da taxa de desgaste das amostras.....	94
Figura 81 - Gráfico da taxa de desgaste das esferas.....	95
Figura 82 – Curva de comparação entre esferoidizado e beneficiado .....	96
Figura 83 – Curva do eletrodo esferoidizado e beneficiado. ....	97

Figura 84 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo esferoidizado.....	98
Figura 85 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo Beneficiado. ....	98
Figura 86 – Efeito da nitretação com eletrodo ferramenta de cobre.....	100
Figura 87 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo esferoidizado.....	101
Figura 88 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo beneficiado. ....	101
Figura 89 – Curva parcial do eletrodo esferoidizado e nitretado com cobre. ....	103
Figura 90 – Curva parcial do eletrodo beneficiado e nitretado com cobre. ....	103
Figura 91 – Efeito da nitretação com eletrodo ferramenta de grafita.....	104
Figura 92 - Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo esferoidizado. ....	105
Figura 93 - Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo beneficiado. ....	106
Figura 94 – Curva parcial do eletrodo beneficiado e nitretado com cobre. ....	107
Figura 95 – Curva parcial do eletrodo beneficiado e nitretado com cobre. ....	107
Figura 96 – Comparação entre os eletrodos ferramentas de matriz esferoidizada. ....	108
Figura 97 - Comparação entre os eletrodos ferramentas de matriz beneficiada. ....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média em peso (%) do aço SAE 52100. ....	20
Tabela 2 - Composição química média do aço SAE 52100 ( % massa) . ....	53
Tabela 3 - Especificações das dimensões dos eletrodos e material utilizado. ....	54
Tabela 4 - Parâmetros ajustados na máquina para realização do processo NDE. ....	56
Tabela 5 - Parâmetros utilizados na difração de raio x para os eletrodos peças. ....	59
Tabela 6 - Parâmetros utilizados no ensaio pino sob disco. ....	60
Tabela 7 - Parâmetros utilizados na perfilometria. ....	62
Tabela 8 - Espessura da camada nitretada pelo processo NDE. ....	67
Tabela 9 - Microdureza vickers (HV) realizada com carga de 490,3 mN (50 gf) e tempo de indentação de 20 s. ....	69
Tabela 10 - Valores de condutividade dielétrica medidos no processo NDE. ....	73
Tabela 11 - Desempenho no processo NDE para o aço SAE 52100 esferoidizado. ....	74
Tabela 12 - Desempenho no processo NDE para o aço SAE 52100 beneficiado. ....	74
Tabela 13 - Valores coletados da análise da perfilometria. ....	92

## LISTA DE SIGLAS

**ASTM:** Sociedade Americana de Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials*)

**CNC:** Controle Numérico Computadorizado

**Dp:** Desvio padrão

**DRX:** Difração de Raio X.

**DVR:** Desgaste Volumétrico Relativo [%]

**EDM:** Usinagem por Descargas Elétricas (*Electrical Discharge Machining*)

**Fe:** Ferro

**NDE:** Nitretação por Descargas Elétricas

**MEV:** Microscopia Eletrônica de Varredura

**mf:** massa final da peça e/ou ferramenta [g]

**mi:** massa inicial da peça e/ou ferramenta [g]

**TD:** Taxa de Desgaste [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]

**te:** duração da descarga [ $\mu\text{s}$ ]

**Toff:** tempo de intervalo do pulso [ $\mu\text{s}$ ]

**Ton:** tempo de duração do pulso [ $\mu\text{s}$ ]

**TiN:** nitreto de titânio

**Ti6Al4V:** Liga de titânio

**TRM:** Taxas de Remoção de Material [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]

**TS:** Valor de corrente elétrica induzida no processo (*Transistor Standard*)

**ZR:** Zona refundida

**ZAC:** Zona afetada pelo calor

## LISTA DE SÍMBOLOS

### ALFABETO LATINO

**A:** Unidade de corrente (Ampere)

**° c:** grau centígrado

**Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>:** Carboneto de cromo

**Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>:** Carboneto de cromo

**CrN:** Nitreto de cromo

**Cr<sub>2</sub>N:** Nitreto de cromo

**Fe- $\alpha$ :** estrutura cristalina do ferro (cúbica de corpo centrado)

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:** óxido de ferro

**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:** óxido de ferro

**FeN:** nitreto de ferro

**Fe<sub>2-3</sub>N:** nitreto de ferro tipo  $\epsilon$

**Fe<sub>4</sub>N:** nitreto de ferro tipo  $\gamma'$

**gf:** grama força

**g/l:** grama por litro

**HV:** dureza Vickers [kgf/mm<sup>2</sup>]

**s:** segundo

**t:** tempo [min]

**V:** volt

**W:** watt

### ALFABETO GREGO

**$\Delta m$ :** variação de massa da peça e/ou ferramenta [g]

**$\epsilon$ :** nitreto tipo Fe<sub>2-3</sub>N

**$\theta$ :** ângulo de difração do raio-x

**$\gamma'$ :** nitreto tipo Fe<sub>4</sub>N

**$\mu S/cm$ :** condutividade elétrica (micro Siemens por centímetro) ( $S = 1/\Omega$ )

**$\mu s$ :** microssegundo

**$\mu m$ :** micrometro

**$\delta$ :** peso específico do material da ferramenta [g/mm<sup>3</sup>]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	18
1.2	OBJETIVOS .....	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	TRATAMENTO TÉRMICO DE ESFEROIDIZAÇÃO DO AÇO SAE 52100 22	
2.2	TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA DO AÇO SAE 52100 .....	23
2.3	TRATAMENTO TÉRMICO DE REVENIMENTO DO AÇO SAE 52100 ....	25
2.4	ENGENHARIA DE SUPERFÍCIE.....	26
2.4.1	<i>Tribologia.....</i>	27
2.4.2	<i>Área real de contato entre duas superfícies sólidas.....</i>	28
2.5	MECANISMOS DE DESGASTE .....	30
2.5.1	<i>Desgaste adesivo.....</i>	30
2.5.2	<i>Desgaste abrasivo.....</i>	32
2.5.3	<i>Desgaste por fadiga superficial .....</i>	37
2.5.4	<i>Desgaste triboquímico.....</i>	38
2.5.5	<i>Ensaio de desgaste - Pino sobre disco .....</i>	40
2.5.5.1	Transições na curva típica de coeficiente de atrito por distância ou tempo de deslizamento .....	41
2.5.5.2	Análise da curva típica e caracterização do período Running-in. .	42
2.6	PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS – EDM...	44
2.6.1	<i>Nitretação por descargas elétricas- NDE .....</i>	49
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>52</b>
3.1	PREPARAÇÃO DOS ELETRODOS PEÇAS E FERRAMENTAS .....	53
3.1.1	<i>Processamento térmico do aço SAE 52100.....</i>	53
3.1.2	<i>Equipamento de EDM por penetração .....</i>	54
3.1.3	<i>Fluido dielétrico .....</i>	57
3.2	DESEMPENHO DA USINAGEM POR NDE.....	57
3.3	CARACTERIZAÇÕES DOS ELETRODOS PEÇAS E FERRAMENTAS..	58
3.3.1	<i>Microscopia óptica da camada nitretada .....</i>	58

3.3.2	<i>Difração de Raios X (DRX)</i> .....	59
3.3.3	<i>Microdureza Vickers</i> .....	60
3.4	ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO (PINO SOBRE DISCO) 60	
3.4.1	<i>Microscopia eletrônica de varredura do ensaio de desgaste</i> .....	61
3.4.2	<i>Perfilometria</i> .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>63</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ELETRODOS PEÇAS .....	63
4.1.1	<i>Microestrutura</i> .....	63
4.1.2	<i>Caracterização das Camadas</i> .....	64
4.2	MICRODUREZA.....	68
4.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS X .....	71
4.4	DESEMPENHO DO PROCESSO NDE .....	74
4.5	DESGASTE POR DESLIZAMENTO.....	75
4.5.1	<i>Mecanismos de desgaste</i> .....	75
4.5.2	<i>Perfilometria</i> .....	91
4.5.3	<i>Taxa de desgaste</i> .....	94
4.5.4	<i>Curva de coeficiente de atrito x Distância de deslizamento</i> .....	96
4.5.4.1	Efeito do tratamento térmico.....	96
4.5.4.2	Efeito do Eletrodo ferramenta de cobre .....	100
4.5.4.3	Efeito do eletrodo ferramenta de grafita .....	104
4.5.4.4	Comparação entre os eletrodos ferramentas de cobre e grafita.	108
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>110</b>
	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>112</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>117</b>
7.1	ANEXO A.....	117

## 1 INTRODUÇÃO

As inovações tecnológicas destacam-se por promover alterações nas funcionalidades dos produtos, infraestrutura e padrões de consumo, o que implica em grande reestruturação de processos de fabricação. Na indústria automobilística, resultados mostram que as baixas emissões de CO<sub>2</sub> dos veículos devem-se às inovações tecnológicas limpas (STEFANO; MONTES-SANCHO; BUSCH, 2016).

A indústria automobilística possui grande demanda anual de rolamentos que não são só utilizados para suportarem cargas radiais devido ao peso do automóvel, mas também para as cargas de impulso que surgem quando o movimento do veículo não é estritamente linear (BHADESHIA, 2012).

O aço SAE 52100 é comumente utilizado na fabricação de rolamentos devido ao baixo custo, às suas excelentes propriedades mecânicas e resistência ao desgaste quando comparado a outros aços da mesma categoria. Em aplicações em que se exigem melhor desempenho e durabilidade, é comum a associação de métodos de modificação superficial como a nitretação a gás, líquida e cromagem, contudo tais técnicas são evitadas devido à poluição ambiental. Outra alternativa, então, seria a utilização do processo de nitretação à plasma que, além das propriedades mecânicas, químicas e ao desgaste obtidos pelos processos anteriormente citados, é também tecnologicamente ecológico (KUMAR et al, 2011; KUFFNER et al., 2017).

O processo de nitretação aumenta a dureza da superfície e, indiretamente, o componente aumenta a resistência ao desgaste por deslizamento. O desgaste, fadiga e a corrosão são os três problemas industriais mais comumente encontrados e que levam à substituição de componentes na engenharia. Devido ao desgaste, os componentes podem precisar de substituição após uma quantidade relativamente pequena do material ter sido removido ou se a superfície estiver indevidamente rugosa (Santos 2013; EYRE, 1976).

Como afirma Shackelford (2008), “A falha por desgaste é um termo que abrange uma grande faixa de fenômenos complexos de danos relacionados à superfície”. Existem vários campos onde o aumento da resistência ao desgaste é essencial para garantir maior vida útil ao componente, como, por exemplo, aplicações referentes a ferramentas de corte, moldes para injeção de plásticos e componentes que precisam de alta resistência ao desgaste.

O controle do atrito e desgaste teve como consequência o desenvolvimento da engenharia de superfície que permitiu a aplicação de novos métodos como revestimentos e tratamentos superficiais para atingir as melhores propriedades e desempenhos possíveis. O controle do atrito e desgaste pode beneficiar a indústria por motivos que vão desde estender a vida útil das peças e máquinas e o aumento de eficiência de equipamentos, até a economia de energia (ZUM GAHR ,1987).

A EDM contribui de forma importante na fabricação de peças de automóveis, formas de peças intrincadas, matrizes e moldes em forma complexa e outros usos industriais. No entanto, a precisão e versatilidade do processo aliado a usinagem econômica com previsão de medidas de desempenho são as principais preocupações para engenheiros de ferramentas e pesquisadores até agora (MOHANTY; MAHAPATRA; SINGH, 2017). O processo de nitretação por descargas elétricas (NDE), utiliza-se do conhecimento e da tecnologia do processo EDM para promover a nitretação na superfície do componente por meio da adição de ureia no fluido dielétrico (RASLAN, 2012).

No contexto da pesquisa, o estudo e conhecimento das condições de estrutura, processamento e propriedade do aço SAE 52100 nas condições de beneficiado e nitretado são importantes para a melhoria do desempenho em aplicações que envolvem desgaste de componentes. Portanto, no presente trabalho, investigou-se sobre a influência da nitretação por descargas elétricas nas propriedades tribológicas correlacionando-os com os resultados de resistência ao desgaste por deslizamento no ensaio pino sobre disco.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O SAE 52100 é um aço de elevado teor de carbono ligado ao cromo, que comumente é utilizado para a fabricação de componentes para rolamentos, como pistas internas e externas, esferas, roletes e agulhas. A combinação de excelentes propriedades mecânicas aliadas ao tratamento térmico adequado pode contribuir para melhorar outras propriedades, como: tenacidade, resistência ao desgaste e fadiga.

Uma das alternativas para proteger a superfície é aumentar a resistência por meio do seu endurecimento. Para isso, técnicas como a nitretação por descargas elétricas (NDE) são empregadas para aumentar a vida útil e resistência ao desgaste

do componente. A nitretação pelo processo NDE, pode ser aplicada na superfície de metais que possuem afinidade química e, com isso, aumentar o desempenho de componentes, como: ferramentas de cortes, moldes para injeção de plásticos e componentes que precisam de alta resistência mecânica e ao desgaste.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi estudar as propriedades tribológicas de amostras de aço SAE 52100 nas condições de esferoidizado, beneficiado e nitretado pelo processo de nitretação por descargas elétricas (NDE). Posteriormente, correlacionar os efeitos dos processamentos nas propriedades mecânicas e ao desgaste por deslizamento.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a microestrutura do aço esferoidizado e beneficiado;
- Avaliar a espessura da camada nitretada por meio de microscopia óptica;
- Avaliar a microdureza Vickers (HV) da camada nitretada;
- Avaliar a formação de nitretos por meio de difração de raios x;
- Avaliar o desempenho no processo NDE;
- Avaliar os mecanismos de desgaste, profundidade da trilha no ensaio pino sobre disco e taxa de desgaste;
- Avaliar as curvas de coeficiente de atrito por distância de deslizamento e descrever a influência dos eletrodos e mecanismos de desgaste no seu formato.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O mercado de rolamentos é historicamente dominado por aços com concentrações de carbono na faixa de 0,8 - 1,1% e o teor total de soluto substitucional inferior a 3% em peso, que antes eram usados na fabricação de ferramentas para usinagem. É comum que rolamentos pequenos sejam tratados termicamente para se tornarem totalmente martensíticos, enquanto que nos rolamentos grandes, aumentam-se as concentrações de elementos de liga para obter maiores durezas (ZARETSKY, 2012).

O aço SAE 52100, que é equivalente ao DIN 100 Cr6, é indicado em operações que necessitam alta resistência ao desgaste e à fadiga por rolamento. A tabela 1 apresenta a composição química média do aço SAE 52100 na qual observa-se que esse é um aço hipereutetóide e está ligado ao cromo.

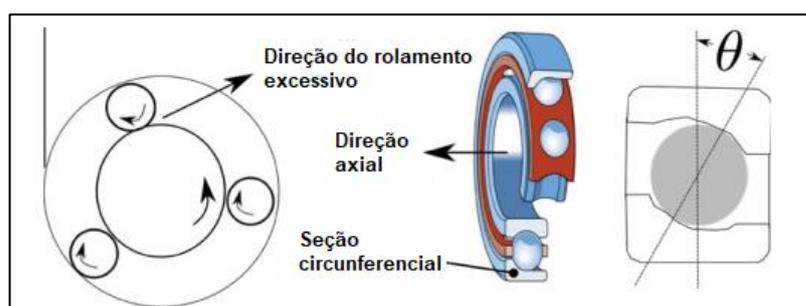
Tabela 1 - Composição química média em peso (%) do aço SAE 52100.

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>
0,98 - 1,10	0,15 - 0,35	0,25 - 0,45	1,30 - 1,60

Fonte: GGD Metals, 2017.

Outras aplicações típicas do aço SAE 52100 são: ferramentas para trabalho a frio, como brocas, alargadores, machos, ferramentas para repuxo em tornos, estampos, punções, ferramentas para extrusão a frio, ferramentas para madeira, facas para papel, roletes guia de laminação e rolos desempenadores de barras (VILLARES METALS, GGD METALS, 2017). A figura 1 ilustra um rolamento de esferas no qual a maioria dos componentes são feitos de aço 100Cr6/SAE 52100.

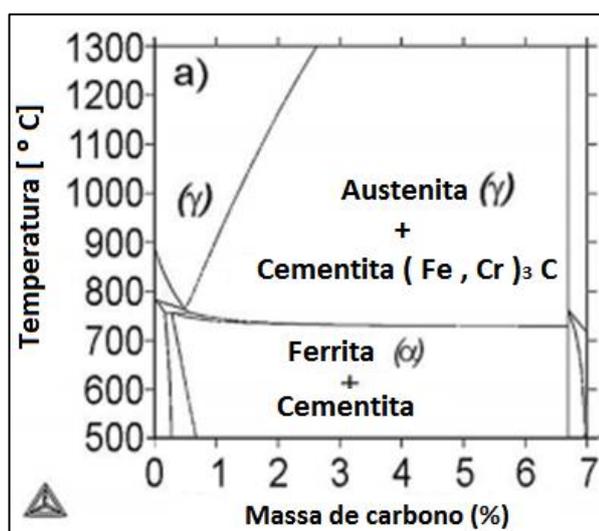
Figura 1 - Parâmetros de projetos de rolamentos.



Fonte: Bhadeshia, 2012.

O diagrama de fases em equilíbrio é um mapa que pode ser usado para traçar a sequência apropriada de operações para tratamentos termomecânicos e térmicos de um dado aço, contudo tem o uso limitado devido ao fato de que vários tratamentos se aproximam ou estão fora do equilíbrio (CHIAVERINI,2005). A adição de elementos de liga ou a presença de impurezas podem ser favoráveis à formação de novas fases ou ser incorporado na estrutura cristalina, aumentando o campo de estabilidade das fases. Entretanto, se o limite de solubilidade é excedido, carbonetos como  $M_7C_3$  ou  $M_{23}C_6$  podem ser favoráveis termodinamicamente em casos de ligas com adição do elemento cromo (KRAUSS,2005). A figura 2 apresenta o diagrama de equilíbrio do aço SAE 52100 calculado por Hosseni et al. (2014) usando o software (TCFE6) do programa ThermoCalc para 1 atm:

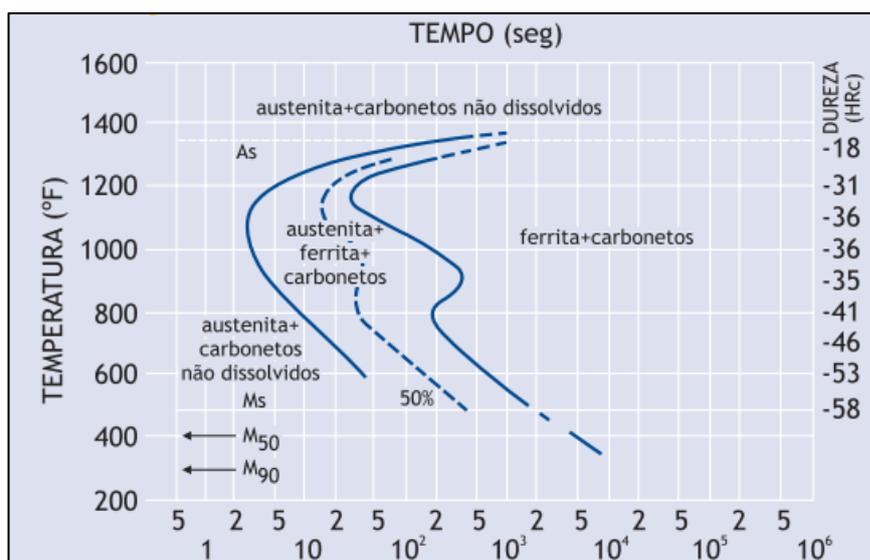
Figura 2 - Diagrama de fases do aço SAE 52100 calculado usando ThermoCalc software (TCFE6) para 1 atm de pressão.



Fonte: Hosseni et al.,2014.

Por meio do diagrama de transformação isotérmica ou diagrama de transformação-tempo-temperatura (TTT), é possível compreender os fenômenos que ocorrem quando o aço é resfriado em diferentes velocidades para o estudo da decomposição da austenita em função da temperatura e do tempo. A figura 3 mostra o diagrama TTT de transformação isotérmica completo para o aço SAE 52100 de composição hipereutetóide; na abscissa tem-se o logaritmo do tempo e na ordenada a temperatura em Fahrenheit (F) (TOTTEN, 2006; TAN et al., 2015; GERDAU,2017).

Figura 3 - Diagrama de transformação isotérmica do aço SAE 52100.



A primeira curva contínua representa o tempo necessário a cada temperatura para o início da transformação e a segunda curva contínua a conclusão dessa transformação; a curva tracejada corresponde a um estado de 50% de transformação. Estão representadas, ainda, a temperatura eutetóide (727 °C), Ms (início da transformação martensítica), M50 (50 % de transformação) e M90 (90% de transformação) (TOTTEN, 2006; TAN et al., 2015; GERDAU,2017).

## 2.1 TRATAMENTO TÉRMICO DE ESFEROIDIZAÇÃO DO AÇO SAE 52100

O tratamento térmico de esferoidização ou recozimento de esferoidização é indicado para aços com teor médio de carbono quando precisam ser deformados a frio e para aços de alto teor de carbono quando se deseja melhorar a usinabilidade. A microestrutura de um aço esferoidizado é muito estável e está relacionada com uma matriz ferrítica dúctil e carbonetos grosseiros dispersos que oferecem pouca resistência à deformação (KRAUSS,2005; BOUACHA et al., 2010).

De acordo com Krauss (2005), a força motriz termodinâmica para a esferoidização é a redução da energia interfacial de ferrita / carboneto associada ao carboneto. As partículas esféricas têm proporções mínimas de superfície para volume em relação a outras formas de partículas, ou seja, quanto mais grossas e menos

partículas, menor será a energia interfacial associada a uma microestrutura esferoidizada.

Trabalhos recentes demonstram que uma maior concentração de carbono promove a esferoidização devido ao aumento de número de sítios de nucleação, e o cromo tem influência na redução do espaçamento interlamelar da perlita que, muitas das vezes, é a estrutura inicial do recozimento. Existem dois métodos essenciais para o recozimento do aço SAE 52100, o primeiro envolve esferoidização contínua durante o resfriamento da condição previamente austenítica e o outro utilizando recozimento isotérmico a uma temperatura inferior àquela em que a austenita começa a se formar (BESWICK, 1987; BHADESHIA, 2012).

Conforme Chiaverini (2005), os aços podem ser esferoidizados controlando-se o aquecimento e resfriamento pelos seguintes procedimentos:

- a) aquecimento a uma temperatura logo acima da linha inferior de transformação e resfriamento lento;
- b) aquecimento por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior da zona crítica. Este tratamento é chamado de “recozimento subcrítico”;
- c) aquecimento e resfriamento alternados entre temperaturas que estão logo acima e logo abaixo da linha de transformação inferior.

No caso específico do aço SAE 52100, é recomendado realizar o recozimento de esferoidização em torno de 750°C, entre 15 e 20 horas, e depois resfriar lentamente ao forno (GGD METALS, 2017).

## 2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA DO AÇO SAE 52100

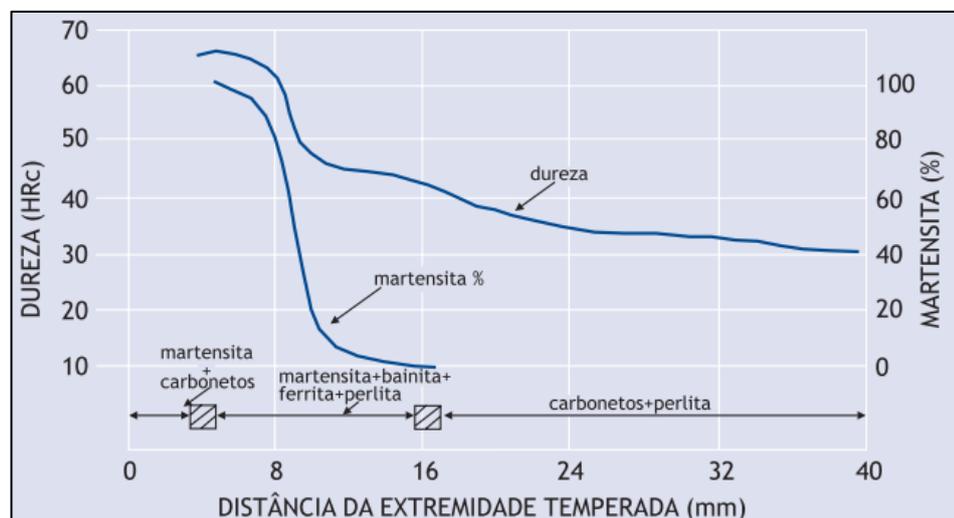
A têmpera consiste no resfriamento rápido do aço em temperaturas acima da linha A1 em meios como óleo, salmoura ou mesmo o ar. Com isso, a decomposição da austenita em fases do equilíbrio, que é prevista no diagrama de fases, é suprimida. A concentração de carbono da martensita é similar à da austenita e sua transformação ocorre por mecanismo displacivo, no qual não há difusão (CHIAVERINI, 2005; TOTTEN, 2006)

A têmpera no aço SAE 52100 tem como consequência uma microestrutura composta de martensita, onde aproximadamente 6% em volume de austenita é/fica retida. Foi observado também de 3-4% de partículas de cementita uniformemente

distribuídas e com tamanho que varia entre 0.4-0.6  $\mu\text{m}$ , devido à dissolução parcial na austenitização (BHADESHIA ,2012).

Como previsto no diagrama de transformação isotérmica da figura 3, a transformação da martensita começa a partir da temperatura ( $M_s$ ), localizada a esquerda do cotovelo da curva em C, evitando a transformação da austenita. A temperatura no qual a martensita é formada, depende do teor de carbono no aço. Com isso, o objetivo da têmpera é aumentar o limite de resistência à tração e dureza, mas é limitado conforme afasta da extremidade, como pode ser visto na figura 4 que demonstra o ensaio de temperabilidade Jominy para o aço SAE 52100.

Figura 4 - Faixa de temperabilidade Jominy para o SAE 52100.



Fonte: Gerdau ,2017.

Analisando o gráfico da figura 4, referente ao ensaio de temperabilidade Jominy, há diferença de resfriamento no sentido da superfície para o centro que favorece diferenças microestruturais. A diferença de resfriamento é acompanhada de grandes tensões internas e térmicas, o que implica em diferentes mudanças volumétricas não uniformes. Quando as tensões internas ultrapassam o limite de escoamento do material ocorrerá a deformação plástica e quando ultrapassam o limite de resistência ocorrerão fissuras (CHIAVERINI,2005; TOTTEN, 2006).

Recomenda-se que a têmpera para o aço SAE 52100 seja realizada com temperatura de austenitização entre 840 – 870  $^{\circ}\text{C}$ , com tempo de encharque de 30 minutos para cada 25 milímetros de espessura do componente e com resfriamento

em óleo até aproximadamente 70 °C (VILLARES METALS,2017; GERDAU 2017; GGD METALS, 2017).

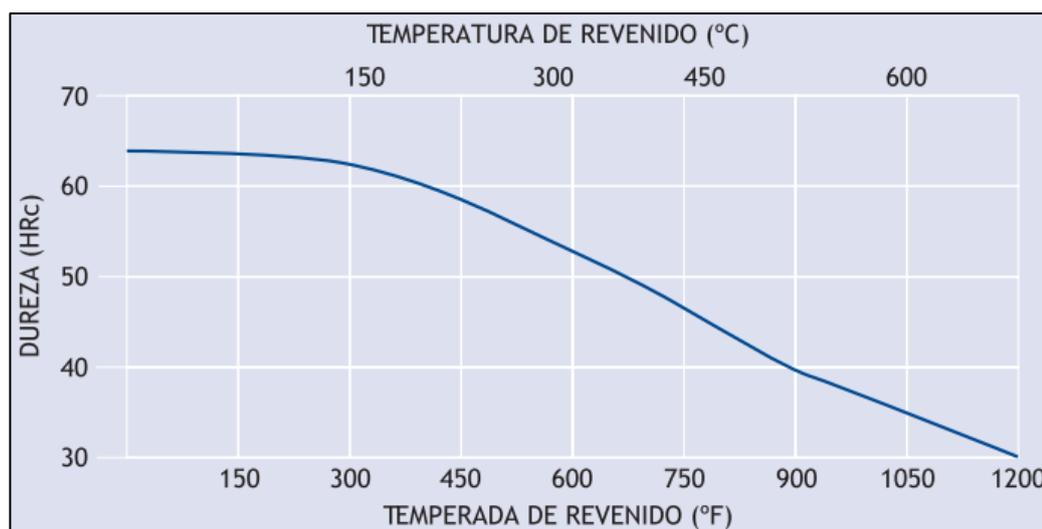
### 2.3 TRATAMENTO TÉRMICO DE REVENIMENTO DO AÇO SAE 52100

O aquecimento da martensita permite a reversão do reticulado instável ao reticulado estável cúbico centrado, produz reajustamentos internos que aliviam as tensões e, além disso, precipitação de carbonetos que crescem e se aglomeram, de acordo com a temperatura e tempo (CHIAVERINI,2005; TOTTEN, 2006).

O revenido é aconselhado logo após o tratamento térmico de têmpera, pois, além de aliviar ou remover tensões internas, corrige a dureza excessiva e fragilidade do material, aumentando a ductilidade e a resistência ao choque (CHIAVERINI,2005; TOTTEN ,2006).

No aço SAE 52100, o revenimento é realizado entre as temperaturas de 120-200 ° C. A temperatura de 150 °C é a mais usual e, de acordo com a figura 5, o aço tratado apresentará dureza de aproximadamente 62 HRC (VILLARES METALS,2017; GERDAU 2017; GGD METALS, 2017).

Figura 5 - Curva de temperatura de revenido em função da dureza para o SAE 52100.



Fonte: Gerdau,2017.

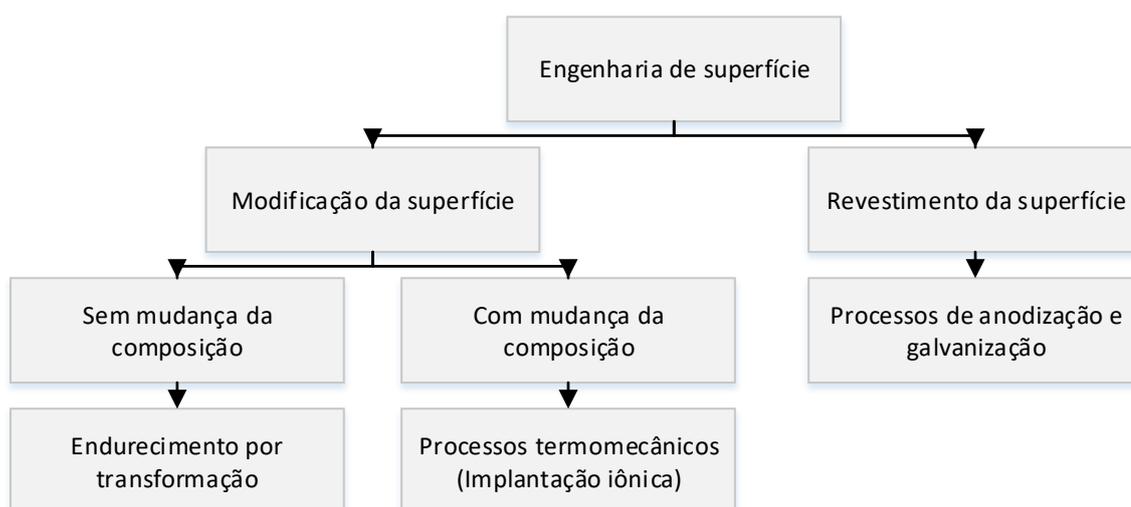
## 2.4 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIE

O manual da Sociedade Americana de Metais (ASM Handbook) define engenharia de superfície como o “estudo de tratamentos superficiais ou nas regiões próximas à superfície de um material, que permita à superfície executar funções distintas das exigidas do material de base” (DAVIS,2001).

A engenharia de superfícies reúne conhecimentos de várias áreas, essa destina-se a melhorar as propriedades da superfície de componentes. Muitas propriedades podem ser melhoradas e ajustadas metalurgicamente, mecanicamente, quimicamente ou com aplicação de revestimentos. Essas propriedades podem interferir na resistência mecânica, à corrosão, ao desgaste e economia de energia com a diminuição do coeficiente de atrito (DAVIS, 2001).

De acordo com Hutchings (1995), dentre os objetivos comuns em usar engenharia de superfície para aplicações tribológicas estão o aumento da resistência ao desgaste da superfície do material e/ou modificar o comportamento ao atrito do componente. O resumo simples dos métodos disponíveis que podem ser utilizados está descrito a seguir na figura 6.

Figura 6 - Resumo dos métodos disponíveis na engenharia de superfície.



Fonte: Adaptado de HUTCHINGS,1992.

### 2.4.1 Tribologia

Zum Gahr (1987) e Hutchings (2016) citam que Leonardo da Vinci (1452-1519) contribuiu para a compreensão e relação de atrito, lubrificação e desgaste. Atribui-se a ele a concepção de duas leis fundamentais de atrito que foram anunciadas por Guillaume Amontons (1699) cerca de duzentos anos depois. As leis que são largamente aplicadas dizem que a força de atrito que atua entre duas superfícies deslizantes é proporcional à força normal que mantém as duas superfícies juntas, e a força de atrito independe da área aparente de contato entre as duas superfícies. Posteriormente, Charles-Augustin Coulomb, físico francês do século XVIII, acrescentou a terceira lei de atrito, na qual diz que a força de atrito independe da velocidade (UPADHYAY; KUMARASWAMIDHAS, 2014).

Conforme Holmberg e Matthews (2008), “tribologia é o campo da ciência e da tecnologia que lida com superfícies em contato com movimento relativo, o que significa que trata de fenômenos relacionados ao atrito, desgaste e lubrificação. ”

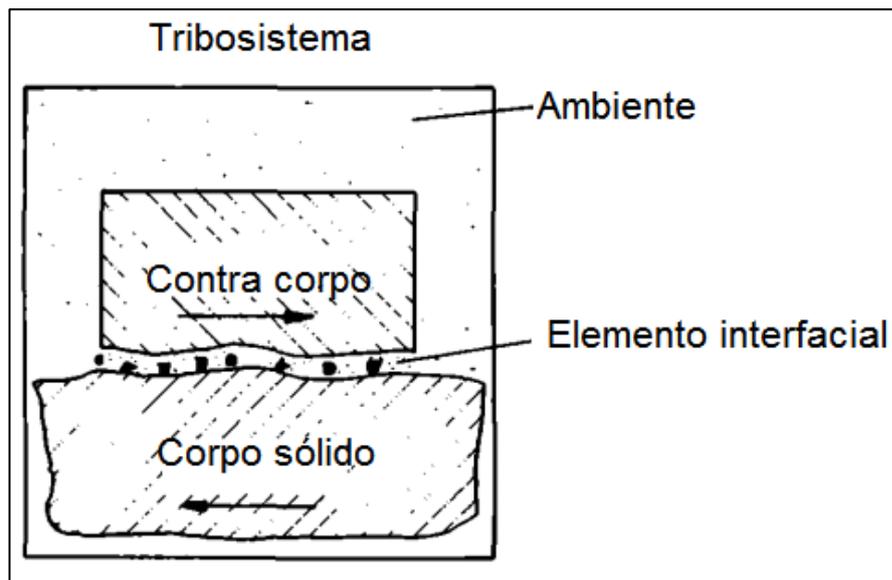
Segundo Sinatora (2005), a tribologia possui destaque na redução do desgaste, do atrito e usa a lubrificação como meio para diminuir os dois fenômenos anteriores. Desde os tempos antigos, a redução do atrito ao utilizar lubrificação de componentes teve como consequência o prolongamento da vida útil de máquinas, economia de energia, melhoria na segurança e desenvolvimento de novos maquinários.

Trabalhos desenvolvidos por tribologistas permitiram o desenvolvimento da engenharia de superfície e sua aplicação em novos métodos, como tratamentos de superfície e revestimentos, que melhoram as propriedades e o desempenho ao controlar o atrito e desgaste. Devido à alta exigência de resistência e desempenho, é interessante combinar o substrato que possui alta resistência mecânica e revestimentos que possuem alta resistência ao desgaste, à temperatura e à corrosão para obter propriedades específicas e localizadas (ZUM GAHR,1987; HOLMBERG, MATTHEWS, 2008).

Segundo Zum Gahr (1987), o desgaste pode ocorrer em diversos componentes, tais como: rolamentos, anéis de pistão, engrenagens e até nas articulações nos seres humanos. Para que o problema seja solucionado, faz-se uso da análise dos sistemas tribológicos, que possuem vários parâmetros e determinarão quais mecanismos de desgaste podem ocorrer.

Para Zum Gahr (1987) “Os mecanismos de desgaste descrevem as interações energéticas e materiais entre os elementos de um tribosistema”. Os tribosistemas são utilizados para a identificação da natureza dos problemas tribológicos. Por meio da ação do atrito e desgaste, o tribosistema é alterado com o tempo. De acordo com a norma DIN 50320 (1979), um tribosistema é basicamente determinado por quatro elementos, propriedades e interações entre eles, conforme aparece na figura 7.

Figura 7 - Visão esquematizada de um tribosistema.



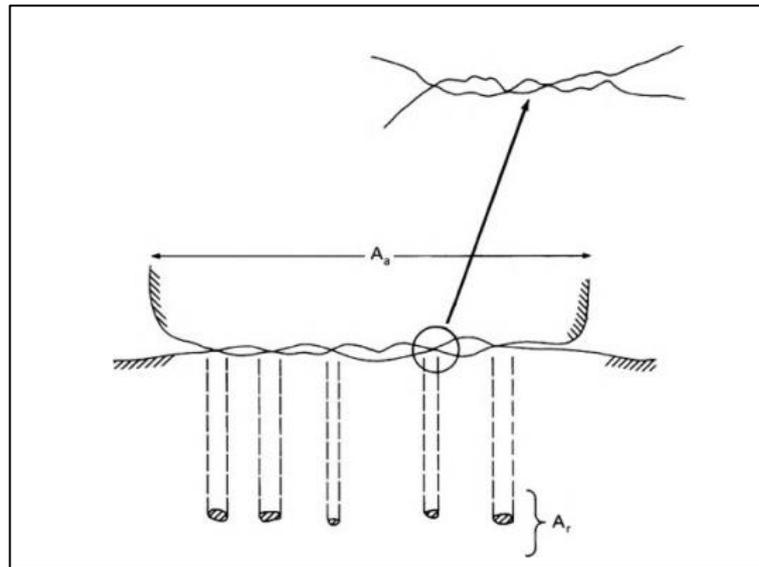
Fonte: Adaptado de Zum gahr,1987.

O tribosistema varia de forma muito ampla e depende de parâmetros, como: movimento relativo, processo de desgaste, cinemática do sistema, estado físico do contra-corpo e elementos interfaciais que podem ser secos ou lubrificados.

#### 2.4.2 Área real de contato entre duas superfícies sólidas.

Quando duas superfícies aparentemente planas são colocadas em contato, apenas pontos específicos realmente estarão em contato devido às asperezas da superfície. A soma das áreas de todos os pontos de contatos constitui a área real de contato ( $A_r$ ), que corresponde a uma fração da área aparente ou nominal de contato ( $A_a$ ), como demonstrado na figura 8 (RABINOWICZ,1995; BHUSHAN,1998).

Figura 8 - Visão esquematizada da área de contato aparente e real entre duas superfícies em contato.



Fonte: Rabinowicz ,1995 adaptado por Bhusan,1998.

Segundo Rabinowicz (1995) e Bhushan (1998), o atrito e o desgaste se relacionam com a área real de contato, sendo função da rugosidade da superfície, propriedades do material e condições de carregamento. Na interface entre as superfícies, onde as asperezas estão em contato, surgem interações interatômicas superficiais propiciando contatos adesivos. Quando as superfícies estão em movimento relativo, a força de atrito é influenciada pela aderência dessas asperezas e por outras fontes de interações superficiais e subsuperficiais desenvolvidas na interface, o que favorece a formação de partículas e podem levar o componente à falha.

Quando a carga normal é aumentada, as superfícies que antes estavam em contato em apenas alguns pontos, se aproximam e os contatos crescem para suportar a carga crescente. Nos pontos de contato, as tensões locais são muito maiores do que as tensões nominais, e devido à alta tensão algumas asperezas acabam deformadas plasticamente, embora a tensão nominal já seja o suficiente para proporcionar deformações elásticas, mas tais deformações dependerão do valor nominal da tensão normal, tensões de cisalhamento, rugosidade e propriedade do material (RABINOWICZ,1995; BHUSHAN,1998; UPADHYAY, KUMARASWAMIDHAS, 2014).

No contato de duas superfícies rugosas, um grande número de asperezas de formas e tamanhos diferentes são pressionados uma contra o outra. As pontas de

asperezas superficiais em corpos sólidos são, algumas vezes, consideradas esféricas, de modo que o contato de dois corpos macroscopicamente planos pode ser reduzidos ao estudo de uma série de contatos esféricos que se deformam em suas pontas (RABINOWICZ, 1995; BHUSHAN, 1998, UPADHYAY; KUMARASWAMIDHAS, 2014).

## 2.5 MECANISMOS DE DESGASTE

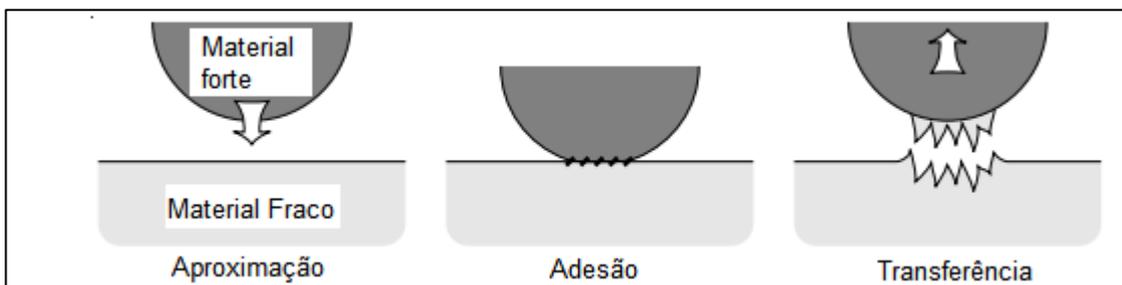
Os mecanismos de desgaste encontrados em situações industriais podem ser divididos em mecanismos simplificados, embora haja a possibilidade de dois ou mais mecanismos atuarem juntos. A norma DIN 50320 (1979), os mecanismos de desgastes são classificados em quatro mecanismos principais: adesão, abrasão, fadiga superficial e triboquímico.

### 2.5.1 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo ocorre quando há movimento relativo entre as superfícies em contato. Devido à alta tensão localizada entre as asperezas, ocorre deformação plástica, adesão e formação de junções locais que se romperão, conforme o aumento da tensão, velocidade e temperatura dos pares de deslizamento. A ruptura das junções e a transferência de material de uma superfície para a outra podem resultar em arranhões que se caracterizam como scuffing, modificando o coeficiente de atrito e desgaste (BHUSHAN, 2002; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

A tendência para formar junções na adesão depende das propriedades físicas e químicas dos materiais em contato, o modo e o valor de carregamento e das propriedades das superfícies, como: contaminação ou rugosidade. A forte aderência observada entre os metais pode ser explicada pela transferência de elétrons entre as superfícies de contato e, desde que a distância entre os dois corpos seja muito pequena, essa transferência é suficiente para ligar dois sólidos, ainda que possuam diferentes estruturas atômicas. A figura 9 ilustra o processo de transferência de material devido à adesão (ARCHARD, 1953; HU et al., 2014).

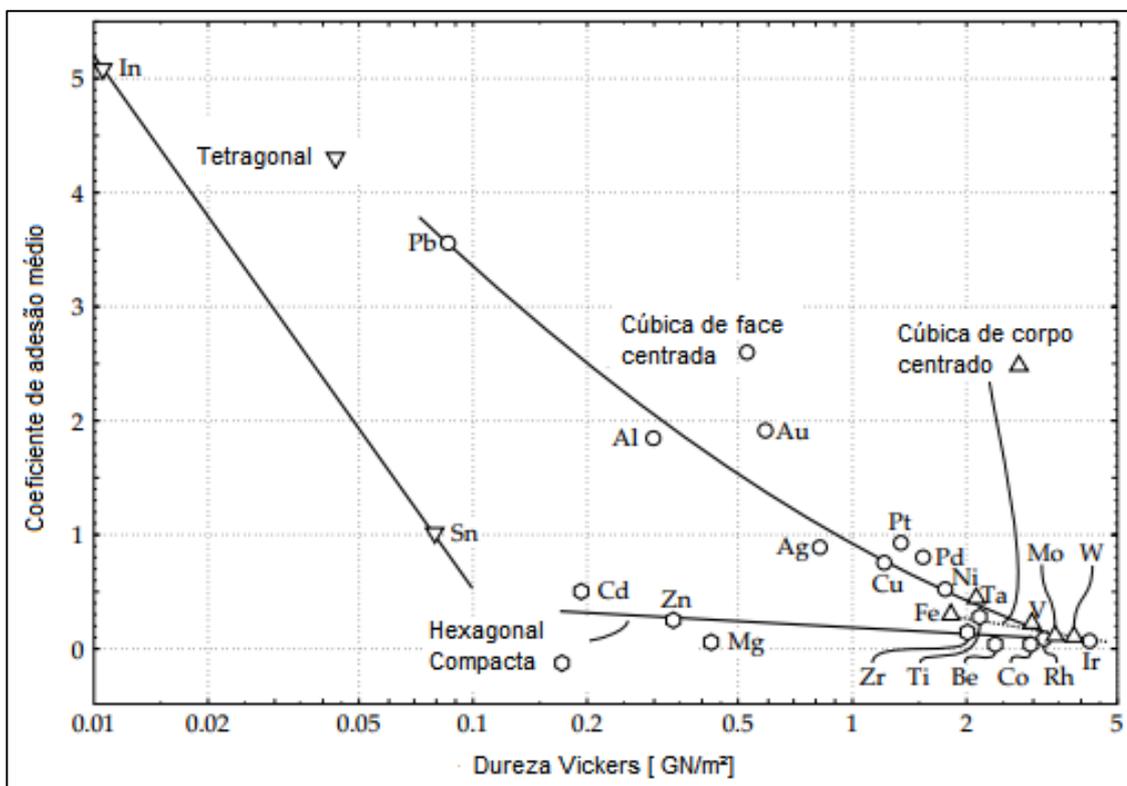
Figura 9 - Processo de transferência de material devido à adesão.



Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor, 2014.

Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), os metais com estrutura hexagonal compacta mostram muito menos aderência do que outras estruturas de cristalinas, pois possuem menos sistemas de escorregamento que as estruturas CCC e CFC. Além disso, a alta dureza, os grandes módulos de elasticidade e a energia de superfície do metal também suprimem a adesão. Na figura 10, é mostrado o gráfico de coeficiente de adesão que é a relação entre a força de ruptura e a força de contato versus a dureza para metais puros.

Figura 10 - Coeficiente de adesão médio em função da dureza dos metais.



Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor, 2014.

Para metais que possuem durezas próximas a diferença na adesão está relacionado ao grau de deformação plástica entre as asperezas antes que um contato verdadeiro possa ser estabelecido. Os metais com estruturas hexagonais compactas possuem menos sistemas de escorregamento e são menos dúcteis que os metais cúbicos de corpo centrado, o que resulta em menor adesão (ZUM GAHR,1987; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

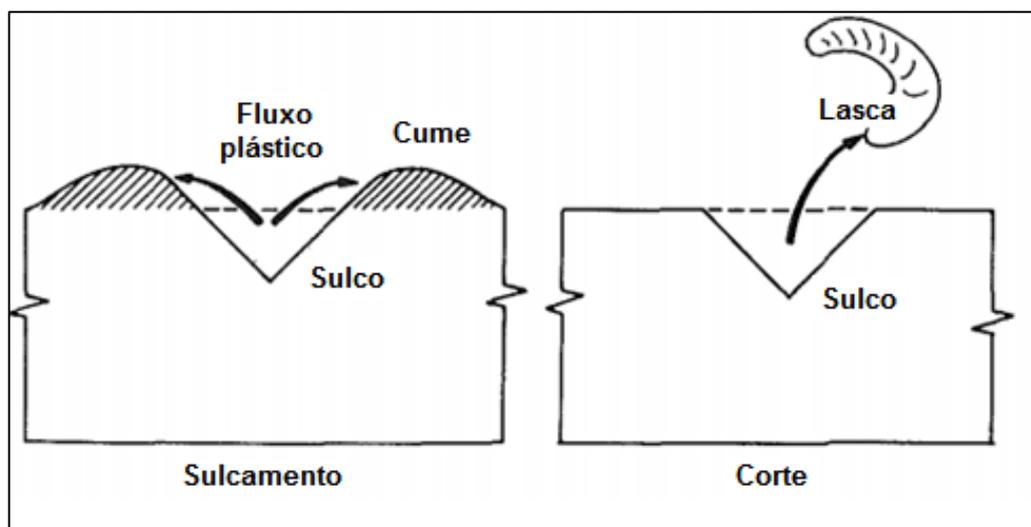
### **2.5.2 Desgaste abrasivo**

O desgaste abrasivo de uma superfície caracteriza-se pela remoção de material devido ao contato deslizante com partículas abrasivas ou com uma superfície áspera, devido à presença de partículas duras ou protuberâncias que podem estar entre ou embutidas em uma ou em ambas as superfícies em movimento relativo. A superfície, anteriormente lisa, torna-se rugosa com sulcos bastante regulares, com ou sem detritos metálicos ligeiramente fixados. Partículas duras que são produtos de processamentos ou fragmentos de desgaste entram no tribosistema como elementos interfaciais (EYRE,1976; ZUM GAHR,1987; HUTCHINGS,1992; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

Na prática, o desgaste abrasivo ocorre sob as condições de abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. No desgaste abrasivo a dois corpos as partículas ou protuberâncias estão fixas no corpo, enquanto que a três corpos as partículas abrasivas estão livres para rolar entre as duas superfícies, sendo que uma pequena proporção dessas partículas abrasivas causa desgaste devido a variações no ângulo de ataque (MOORE,1974; EYRE,1976).

Segundo Murray, Mutton e Watson (1982), o processo de desgaste abrasivo a dois corpos possui dois casos extremos que podem levar à remoção de material. A figura 11 ilustra os mecanismos de formação de sulcos em metais, no primeiro caso é uma ranhura no qual o material é deslocado continuamente e lateralmente para formar cumes adjacentes à ranhura de desenvolvimento. Para um caso ideal, não haveria despreendimento de metal da superfície e, portanto, nenhuma perda de volume global. Em situações reais, esse mecanismo aconteceria através da delaminação.

Figura 11 - Mecanismos de formação de sulcos em metais



Fonte: Adaptado de Murray, Mutton e Watson (1982).

No segundo caso, o mecanismo é o de corte em que situações extremas o metal é totalmente separado e o volume do sulco é igual ao volume de metal retirado no cavaco, e não há cumes nas laterais do sulco. A dureza de um material é claramente uma propriedade importante na determinação do desgaste por abrasão, pois controla a penetração das partículas abrasivas (RABINOWICZ, MUTIS, 1965; MURRAY, MUTTON, WATSON, 1982).

Segundo Rabinowicz (1965) e Mutis (1965), experimentos laboratoriais cuidadosos sugerem que à medida que o tamanho do abrasivo é aumentado, começando a partir de um valor muito pequeno, há um aumento inicial na taxa de desgaste até um determinado valor característico do tamanho abrasivo ser atingido; acima desse valor, a taxa de desgaste é independente do tamanho abrasivo, esse fenômeno é conhecido como o efeito de tamanho crítico.

O desgaste abrasivo a três corpos é frequentemente associado a partículas abrasivas soltas entre duas superfícies, mas em muitas situações práticas, apenas uma superfície entra em contato com as partículas abrasivas. Há casos em que as duas superfícies podem estar tão afastadas que as propriedades mecânicas de uma superfície não têm influência no desgaste da outra superfície (MISRA, FINNIE, 1980).

O desgaste abrasivo a três corpos pode ser definido como desgaste abrasivo de três corpos fechado e aberto. No desgaste abrasivo a três corpos fechado, ocorre quando partículas abrasivas soltas são aprisionadas entre duas superfícies deslizantes ou rolantes que estão próximas uma da outra, que entalam e sedimentam-

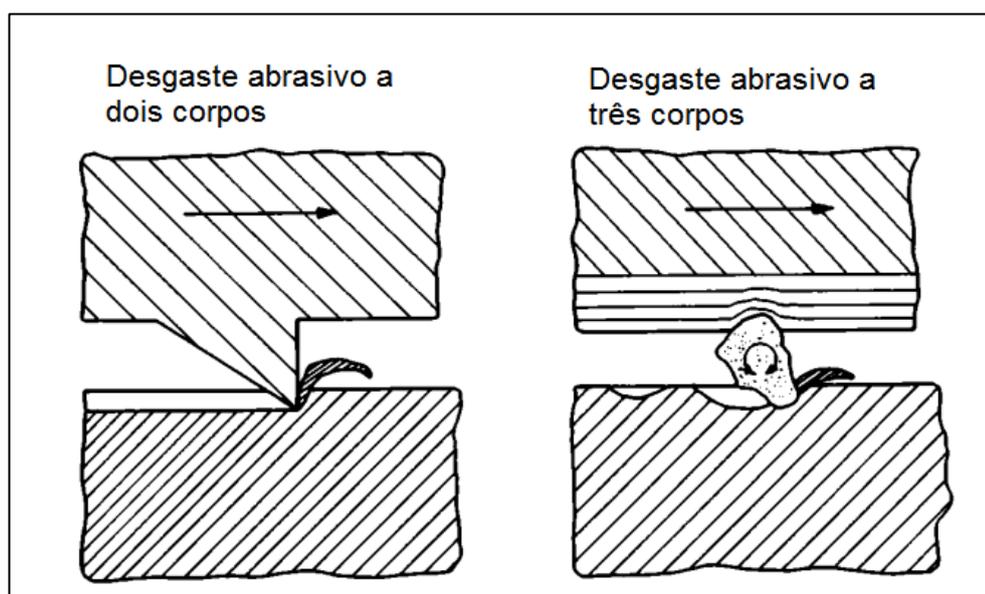
se na superfície mais macia com subsequente desgaste abrasivo da outra superfície, que se assemelha à situação de dois corpos (RABINOWICZ, DUNN, RUSSELL, 1961; MISRA, FINNIE, 1980).

O desgaste abrasivo a três corpos aberto ocorre quando as duas superfícies estão distantes ou quando apenas uma superfície está envolvida no processo de desgaste. Classificam-se em três grupos devido à variedade de situações em “*Gouging*”, alta tensão e baixa tensão.

Segundo Rabinowicz, Dunn e Russell (1961) e Misra, Finnie (1980), *Gouging* ocorre quando rochas ou outras partículas abrasivas grosseiras cortadas em uma superfície para remover quantidades relativamente grandes de material. Já no desgaste à alta tensão as partículas são esmagadas como na moagem do moinho de esferas. Em contraste, se as partículas abrasivas não se quebram durante o processo de desgaste usa-se o termo baixa tensão.

Segundo Zum Gahr (1987), “O desgaste é cerca de uma a duas ordens de magnitude menor na abrasão de três corpos do que na abrasão de dois corpos”. A figura 12 ilustra as duas classificações:

Figura 12 - Desgaste a dois e a três corpos

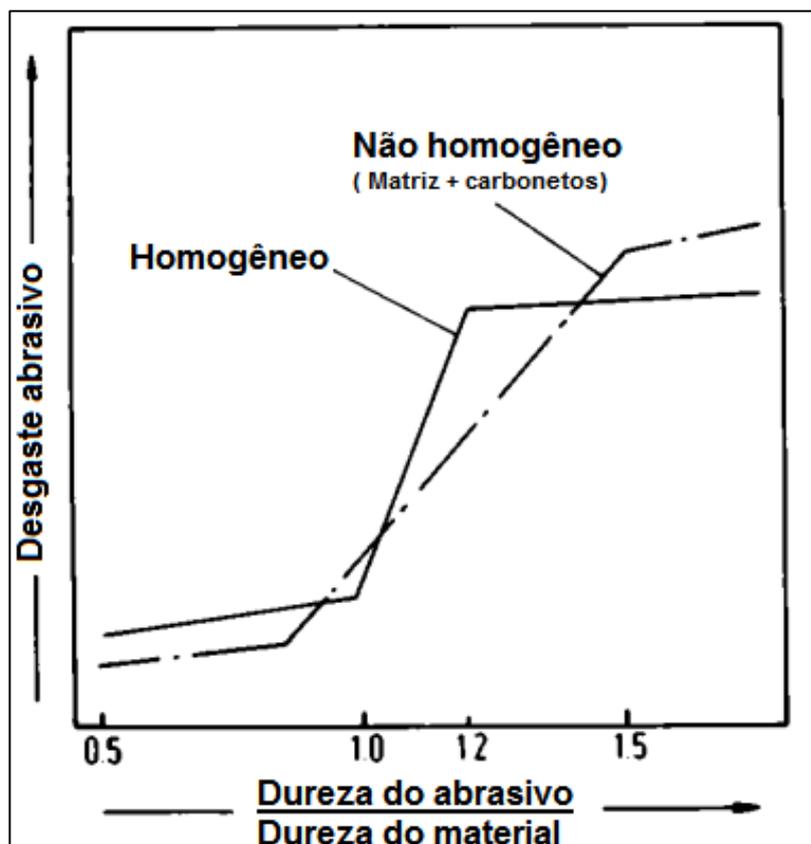


Fonte: Adaptado de Brankovic, 1998.

Segundo Zum Gahr (1987), o desgaste abrasivo pode ocorrer de um nível baixo até um elevado nível de intensidade que depende da razão entre as durezas do abrasivo e a dureza da superfície. Na figura 13 é mostrado que para materiais

homogêneos e não homogêneos para a mesma dureza a transição do inferior ao maior nível de desgaste.

Figura 13 - Coeficiente de abrasão médio em função da dureza dos metais.

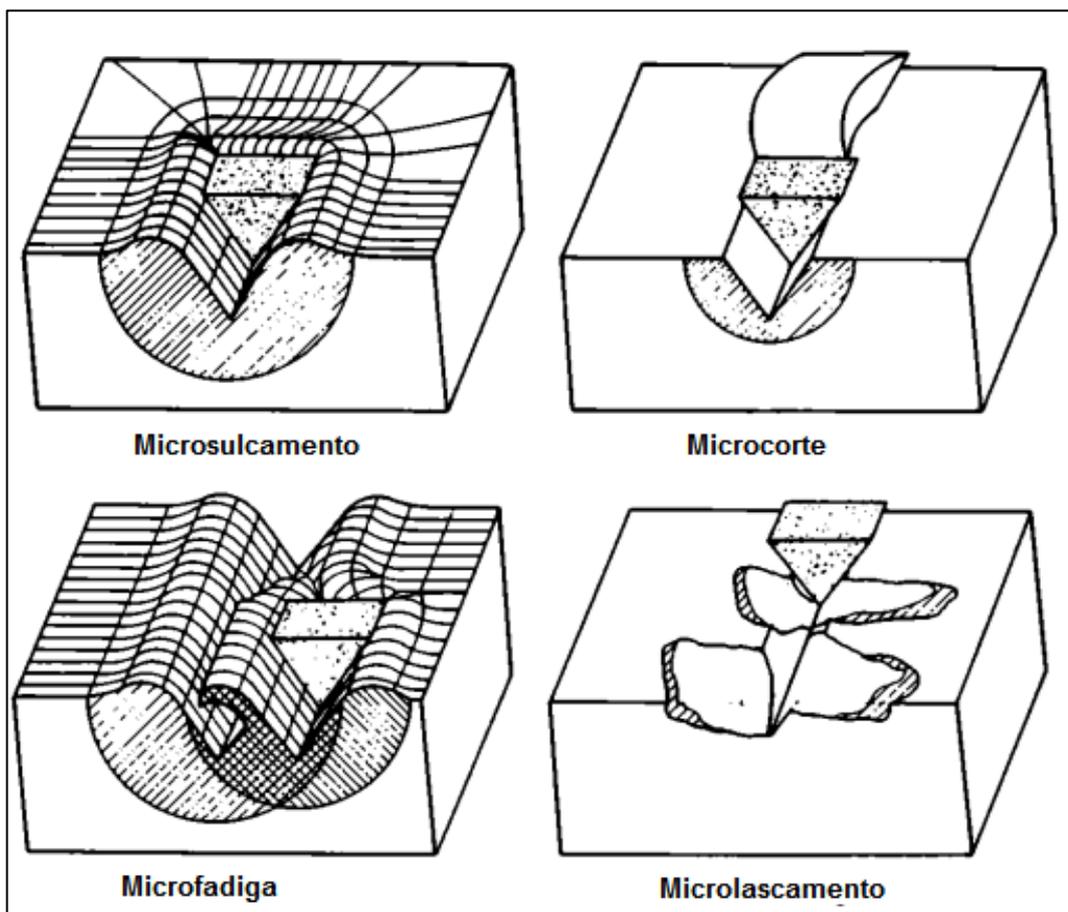


Fonte: Adaptado de Zum gahr,1987.

Os materiais não homogêneos são aços nos quais a matriz possui carbonetos duros e, considerando dureza semelhante, a matriz desses materiais são mais dúcteis que as de materiais homogêneos. O desgaste é interrompido quando a dureza da matriz e carbonetos superam a dureza do abrasivo. Considera-se um abrasivo duro aquele que possui dureza maior do que a superfície desgastada e quando a dureza é menor ou igual é tido como macio (ZUM GAHR,1987).

De acordo com Zum Gahr (1987), estudos realizados com auxílio de microscopia eletrônica revelam que o desgaste abrasivo possui outros mecanismos relacionados. A figura 14 exemplifica os mecanismos de microsulcamento, microcorte, microfadiga e microlascamento.

Figura 14 - Interações físicas entre partículas abrasivas e superfície dos materiais.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1979.

No microsulcamento ideal não há desprendimento de material da superfície, o material é deslocado para as laterais formando sulcos adjacentes a ranhura produzida. No caso não ideal há perda de material devido a ação de muitas partículas abrasivas podendo ser quebradas por baixo por fadiga de baixo ciclo. Enquanto o microcorte puro resulta em perda de material igual ao volume do sulco de desgaste produzido. O ângulo de ataque é que determina se o material desprenderá da superfície, para o ângulo de ataque das partículas duras maiores que um ângulo crítico, haverá desprendimento de material da superfície (ZUM GAHR,1987).

### 2.5.3 Desgaste por fadiga superficial

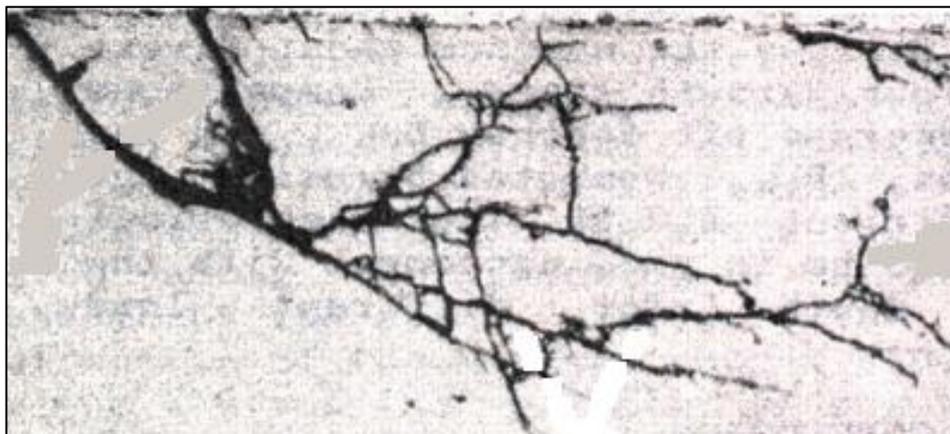
Segundo Meyers e Schawla (2009), fadiga é definida como uma degradação das propriedades mecânicas que leva à falha de um material ou componente sob carga cíclica. Fadiga é um problema que afeta qualquer componente estrutural ou parte que se move, estima-se que 90% das falhas de serviço de componentes metálicos que sofrem movimento de uma forma ou outra pode ser atribuída a fadiga.

Para o desgaste devido à fadiga superficial há formação de fissuras e descamação do material causado pelo carregamento alternado e cíclico em superfícies sólidas, sendo a causa das principais falhas de rolamento, dentes de engrenagem, contatos de roda-trilho, guias de rolos em máquinas de produção, seguidores de rolos de came em motores de combustão interna e rolos de laminadores (BLAU,1992).

Tunna, Sinclair e Perez (2007) estudaram o desgaste por fadiga de contato por rolamento em trilhos e descrevem o mecanismo em uma sequência de eventos considerando o contato tipicamente Hertziano. Primeiramente, iniciam-se fissuras na superfície, logo abaixo da superfície ou no caso de ser profundamente abaixo da superfície requer a presença de um concentrador de tensão como vazios ou inclusões. Logo após, há o crescimento precoce da trinca que se converte em um crescimento prolongado, trincas primárias podem se conectar com trincas secundárias que culmina na separação de um pedaço de material da superfície e formação de uma cavidade.

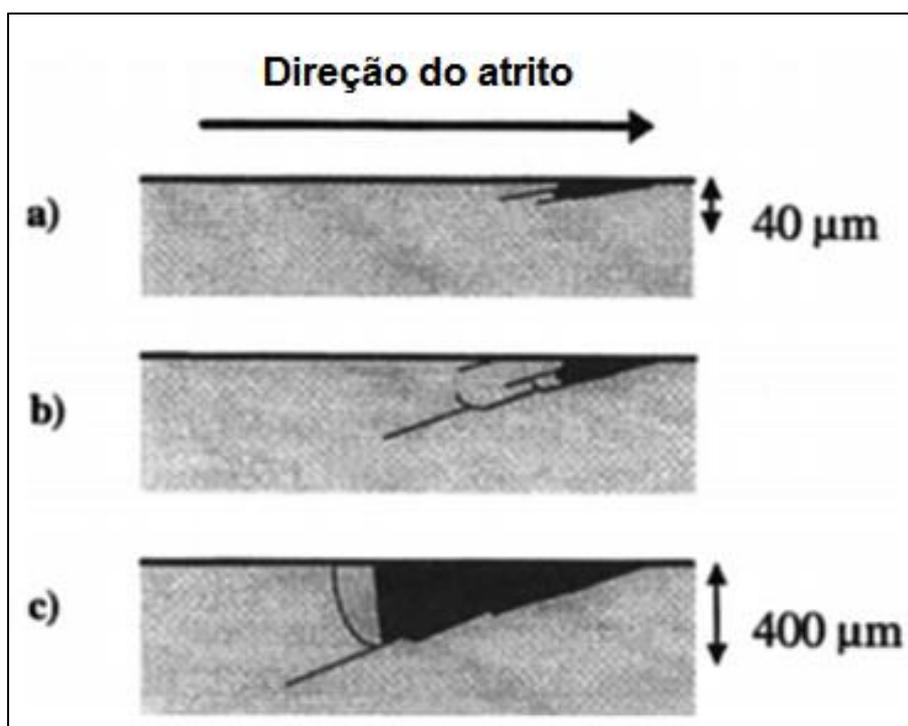
Segundo Sadeghi et al (2009), na fadiga de contato por rolamento dois mecanismos são dominantes, que são o Spalling, originado na subsuperfície, ilustrado na figura 15, e o de pitting na superfície, ilustrado na figura 16. No mecanismo de Spalling, as trincas são nucleadas frequentemente em região de tensão de cisalhamento máxima abaixo da superfície, enquanto o pitting ocorre com a presença de irregularidades na superfície, que atuam como concentradores de tensão, depois propagam segundo um ângulo de 15-30° em relação a superfície até atingir um comprimento crítico, ramifica-se e remove um pedaço do material formando um pit.

Figura 15 - Trincas subsuperficiais em fadiga de contato no rolamento.



Fonte: Lou, B., Han, 1990 apud Sadeghi et al., 2009.

Figura 16 - Mecanismo de pitting em fadiga de contato no rolamento.



Fonte: Nelias et al., 1999 apud Sadeghi et al., 2009.

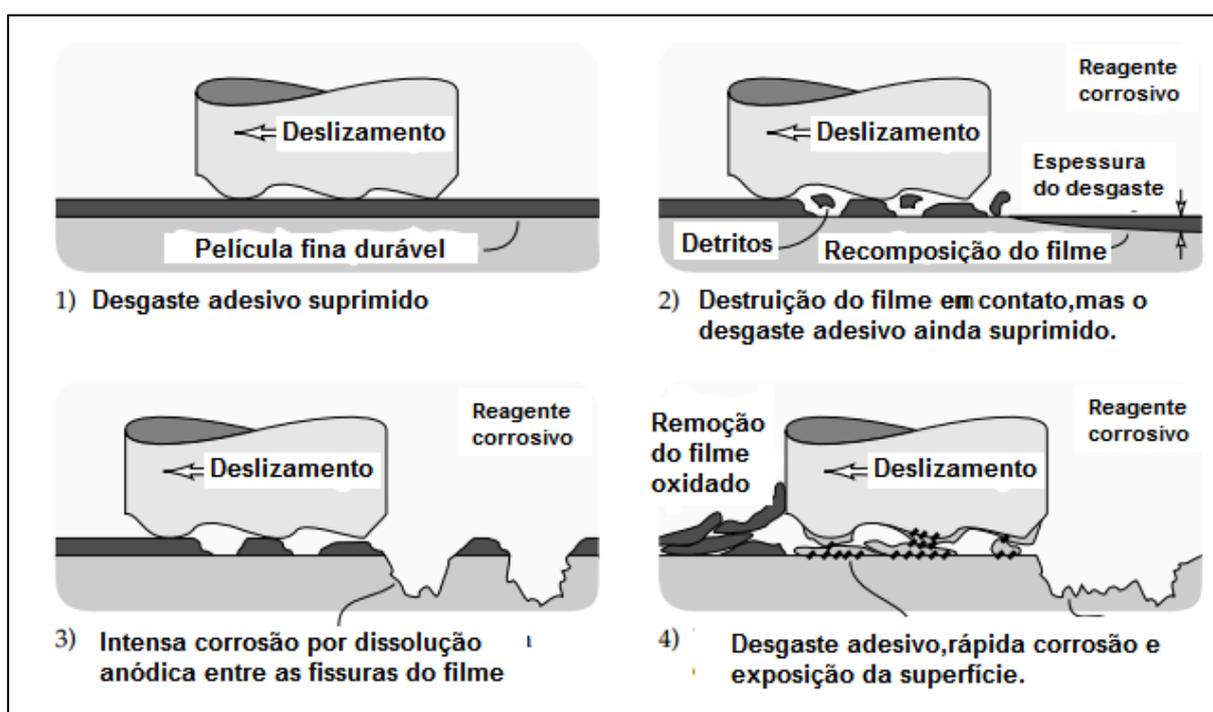
#### 2.5.4 Desgaste triboquímico

O desgaste corrosivo é definido como a degradação de materiais nos quais estão envolvidos mecanismos de corrosão e desgaste. Os efeitos combinados de desgaste e corrosão podem resultar em perdas de material total que são muito

maiores do que os efeitos aditivos de cada processo tomado sozinho, o que indica sinergismo entre os dois processos (MADSEN,1992; WATSON et al., 1995)

Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), o desgaste corrosivo é um termo geral relativo a qualquer forma de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivo, enquanto o desgaste oxidativo refere-se ao desgaste causado pelo oxigênio atmosférico (QUINN; WINER, 1985; WANG et al., 2008). Na superfície são onde as reações químicas ocorrem, e os seguintes processos podem ser observados na figura 17, Figura 17 para o caso de metais sujeitos a contatos deslizantes:

Figura 17- Modelos de interação entre um agente corrosivo e uma superfície desgastada.



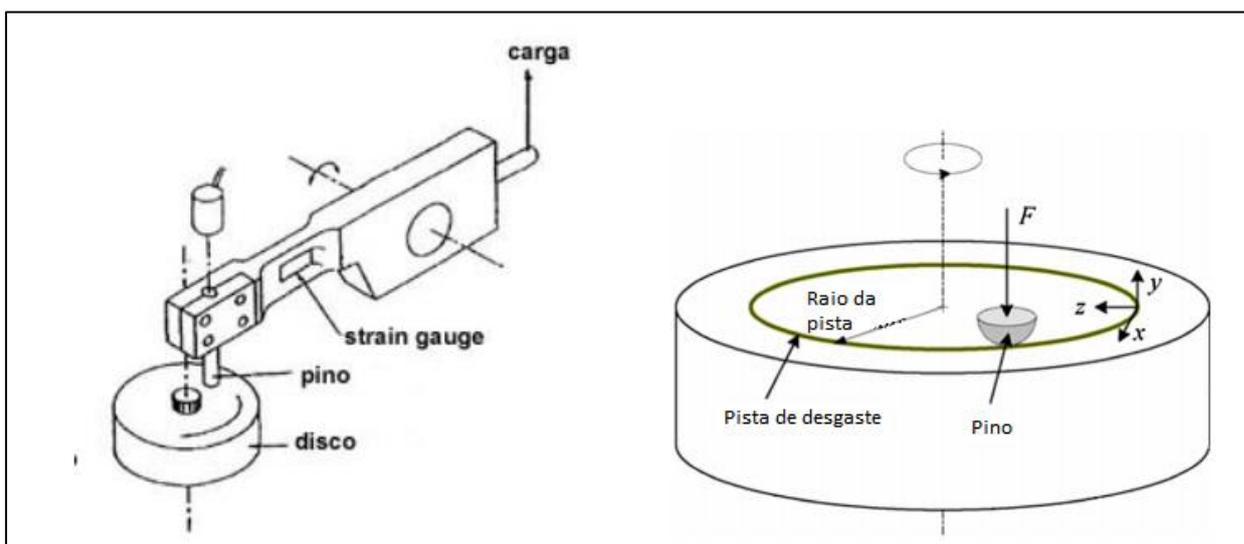
Fonte: Adaptado de Stachowiak; Batchelor, 2014.

Durante o deslizamento, o calor de atrito e a alta temperatura ambiente podem acelerar a formação de tribo-óxidos (óxidos formados durante o desgaste). Sabe-se que a formação de óxidos em superfícies metálicas em movimento relativo normalmente resulta em desgaste reduzido e atrito. Por isso, esse tipo de desgaste é denominado desgaste leve ou desgaste oxidativo, presente em muitas aplicações práticas (STRAFFELINI; TRABUCCO; MOLINARI, 2001, BARRAU et al., 2003; WEI et al., 2011).

### 2.5.5 Ensaio de desgaste - Pino sobre disco

O funcionamento típico de um tribômetro do tipo pino sobre disco consiste no movimento relativo entre o pino e o disco. Comumente o sistema funciona com um pino estacionário sendo forçado normal ao disco em movimento rotativo com o auxílio de um braço ou alavanca e pesos ligados, mas também é possível o pino girando sobre o centro do disco estacionário (ASTM G99-5,2010). No esquema representado na figura 18 é possível observar que o braço possui um transdutor de tensão do tipo *strain gage*, que é responsável por medir desvios causados pela força de atrito.

Figura 18 - Esquema de funcionamento de um tribômetro do tipo pino sobre disco.



Fonte: adaptado de Tedesco,2010.

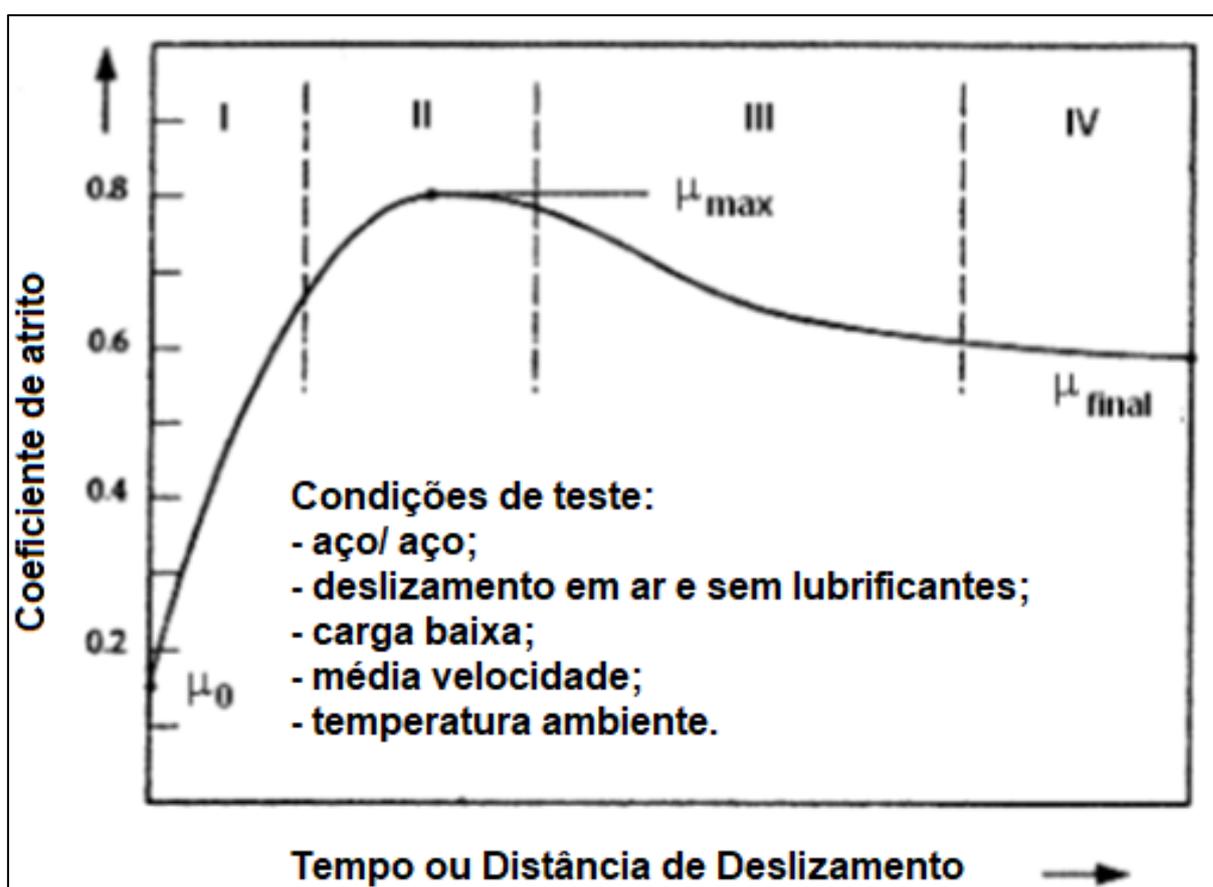
Com o auxílio de um software adequado, o sinal proveniente do desalinhamento do eixo é convertido em coeficiente de atrito, além disso, o software é usado para ajustar os parâmetros do ensaio, como velocidade e distância de deslizamento (TEDESCO ,2010).

Segundo a Norma ASTM G99-5 (2010), vários fatores do sistema podem influenciar a quantidade de desgaste, como carga aplicada, características da máquina, velocidade de deslizamento, distância de deslizamento, o ambiente e as propriedades do material. O teste não reproduzirá todas as condições as quais o material em serviço estará sujeito, portanto não é seguro relacionar taxas de desgastes de um determinado material em condições diferentes das do teste.

### 2.5.5.1 Transições na curva típica de coeficiente de atrito por distância ou tempo de deslizamento

Na figura 19 é apresentada uma curva típica de coeficiente de atrito para o deslizamento metal/metal sem ação de lubrificante em função da distância ou tempo. Observa-se que os estágios do deslizamento das superfícies em contato podem influenciar o comportamento do atrito (CZICHOS, 1992).

Figura 19 - Curva típica de tempo ou distância de deslizamento em metais.



Fonte: Adaptado de Czichos, 1992.

#### Estágio I:

Este estágio possui inicialmente coeficiente de atrito baixo, valores próximos de 0,1. É um estágio que devido a baixas cargas normais aplicadas e resistência ao cisalhamento de contaminantes na superfície, faz com haja remoção da camada superficial e um aumento da adesão devido ao acréscimo na limpeza das áreas interfaciais. Com isso, haverá aumento nas interações entre as asperezas e as

partículas desgastadas, e como consequência elevação do valor do coeficiente de atrito.

### **Estágio II:**

Neste estágio o valor do coeficiente de atrito oscila entre os valores aproximados de 0,3 até 1 para a maioria dos metais. Isto acontece devido adesão entre superfícies, a deformação das asperezas faz com que o número de partículas residuais e a taxa de desgaste aumentem.

### **Estágio III:**

O decréscimo do coeficiente de atrito pode ser atribuído a uma possível camada triboquímica que protege a superfície ou a diminuição na deformação de asperezas.

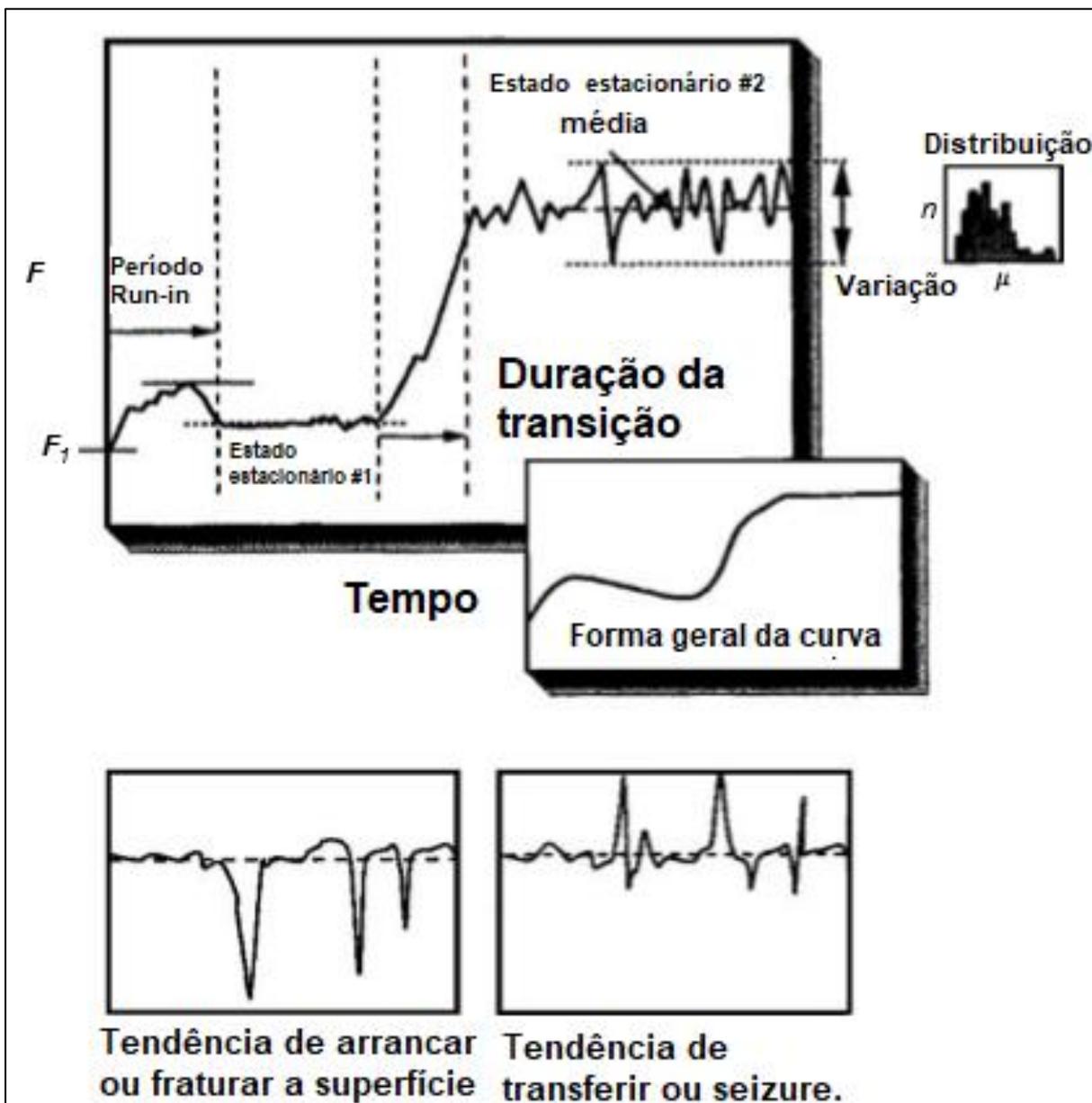
### **Estágio IV:**

A medida que a superfície se torna polida o coeficiente de atrito oscila entre valores quase constantes, considera-se nessa região um estado estacionário.

#### 2.5.5.2 Análise da curva típica e caracterização do período Running-in.

Segundo Blau (2009), a análise da curva de atrito requer o registro detalhado da força de atrito, observações do comportamento do sistema e estudos das superfícies de contato para que cada estágio na evolução da superfície possa ser correlacionado com o atrito naquele momento. Atentar-se para a forma da curva geral, a duração de certas características da curva e a magnitude das flutuações na força de atrito em momentos diferentes, trará informações como velocidade para atingir o estado estacionário, estabilidade dos eventos em micro e nano escala que contribuem para o comportamento geral, como ilustrado na figura 20.

Figura 20 - Detalhamento da curva de força de atrito por tempo.



Fonte: Blau, 2009.

Running-in é definido como alterações no coeficiente de atrito ou na taxa de desgaste devido a alterações na geometria das superfícies deslizantes e nas propriedades físico-mecânicas das camadas superficiais do material durante o período de deslizamento inicial, que geralmente se manifesta, assumindo condições externas constantes, em uma diminuição no trabalho de atrito, a temperatura e a taxa de desgaste. O estacionário corresponde ao período em que, o coeficiente de atrito cinético médio, taxa de desgaste e outros parâmetros especificados atingiram e mantiveram um nível relativamente constante, outros parâmetros como temperatura,

concentração de partículas de detritos em um lubrificante e rugosidade superficial podem ser usados (BLAU,2009).

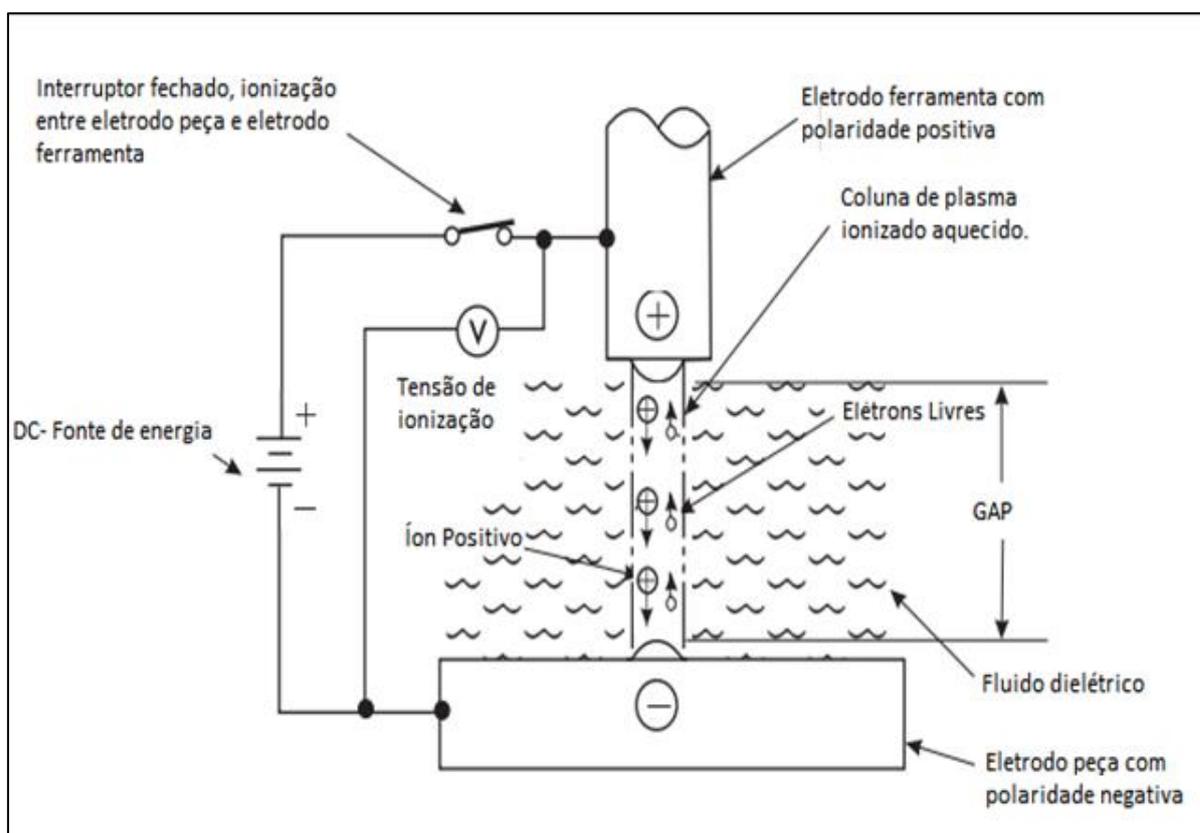
## 2.6 PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS – EDM

Em 1770, ano que se tem notícia do surgimento do processo de descargas elétricas (EDM), o cientista inglês Joseph Priestly descobriu o efeito erosivo das descargas elétricas. No entanto, foi apenas por volta de 1950 que o circuito de relaxamento RC (resistência-capacitância) foi introduzido e permitiu o controle confiável dos tempos de pulso e também um simples circuito de servo-controle para encontrar e manter automaticamente um espaço entre o eletrodo (ferramenta) e a peça de trabalho. Logo após, em 1980, com o advento do *Computer Numerical Control* (CNC) na EDM, foi observado um grande avanço na eficiência da operação de usinagem permitindo a usinagem de qualquer material que seja eletricamente condutor, independentemente da dureza, forma ou força (KUMAR et al., 2009; BABU et al., 2016).

A usinagem por descargas elétricas é um processo erosivo que utiliza da conversão da energia elétrica em térmica através de descargas elétricas entre o eletrodo ferramenta e a peça imersos em um fluido dielétrico. A energia térmica contribui para a formação de um canal de plasma entre o cátodo e o ânodo onde a temperatura na região varia de 80000 – 120000 °C, o suficiente para aquecer e fundir a superfície em cada polo (MCGEOUGH,1988; HO; NEWMAN, 2003; BABU et al., 2016).

Na figura 21 é demonstrada a ionização que ocorre entre os eletrodos peça e ferramenta. Quando uma tensão na fonte DC é estabelecida, ocorre o aquecimento ao se formar o plasma, o número de elétrons livres é aproximadamente igual ao número de íons positivos, sendo assim, os elétrons livres são atraídos para o eletrodo ferramenta e os íons positivos são atraídos para o eletrodo peça carregado negativamente (JAMESON, 2001).

Figura 21 - Representação da ionização no processo usinagem por descargas elétricas.



Fonte: Jameson, 2001.

. No processo EDM, a remoção do material ocorre devido a uma série de descargas de faísca através de uma enorme quantidade de geração de calor entre os eletrodos. O calor gerado é suficiente para vaporizar e derreter material de ambos os eletrodos. O material fundido é lavado por fluido dielétrico da cavidade da cratera a partir de sujeira e detritos e a réplica da ferramenta é transferida para a superfície de trabalho (MOHANTY; MAHAPATRA; SINGH, 2017).

Segundo Ho e Newman (2003), quando a corrente é desligada ocorre interrupção do canal de plasma fazendo com que haja redução brusca de temperatura. O fluido dielétrico retira e transporta o material fundido da superfície em forma de partículas microscópicas e como eletrodo define a área onde a erosão irá ocorrer faz com que o processo seja bastante preciso.

Em EDM, cobre e latão são materiais de eletrodo usados com frequência. No entanto, a grafita pode ser utilizada como material de eletrodo potencial devido à sua alta temperatura de ponto de fusão e boa condutividade elétrica. A propriedade de

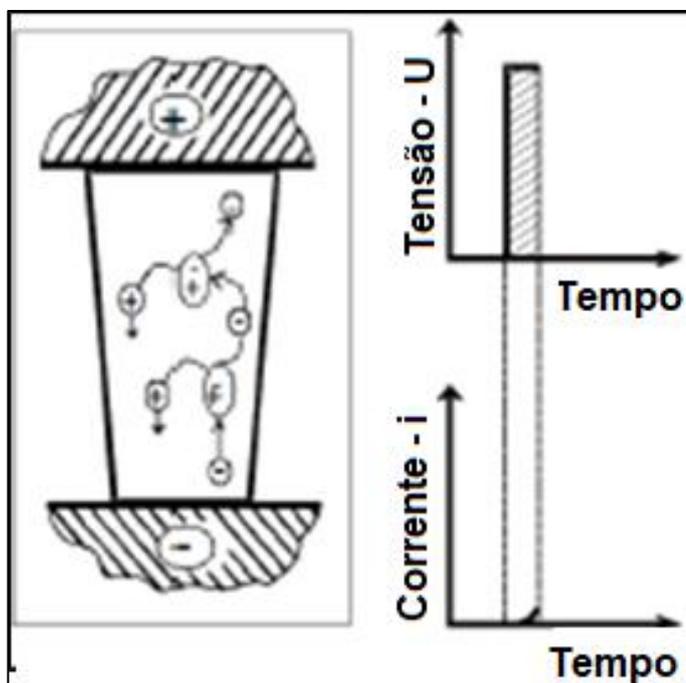
resistência à temperatura torna a grafita um material de eletrodo adequado (KUPPAN; NARAYANAN; RAJADURAI, 2011; MOHANTY; MAHAPATRA; SINGH, 2017).

De acordo com Amorim (2002), Santos (2013) e Santos (2015) a teoria termoelétrica é suficiente para explicar o efeito de retirada de material durante as descargas elétricas. Pode-se representar o ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos em contato com um fluido dielétrico na seguinte etapas:

### Fase de ignição

O eletrodo ferramenta se aproxima da peça até uma distância denominada fenda de trabalho, abre-se uma tensão, mas há apenas formação de um campo elétrico (gap), onde o gradiente de tensão é máximo devido à resistência dielétrica do fluido, contudo elétrons são emitidos pelo cátodo em direção ao anodo, como mostrado na figura 22 (KÖNIG; KLOCKE, 1996; STEVENS, 1998).

Figura 22 - Fase ignição com o início da descarga.

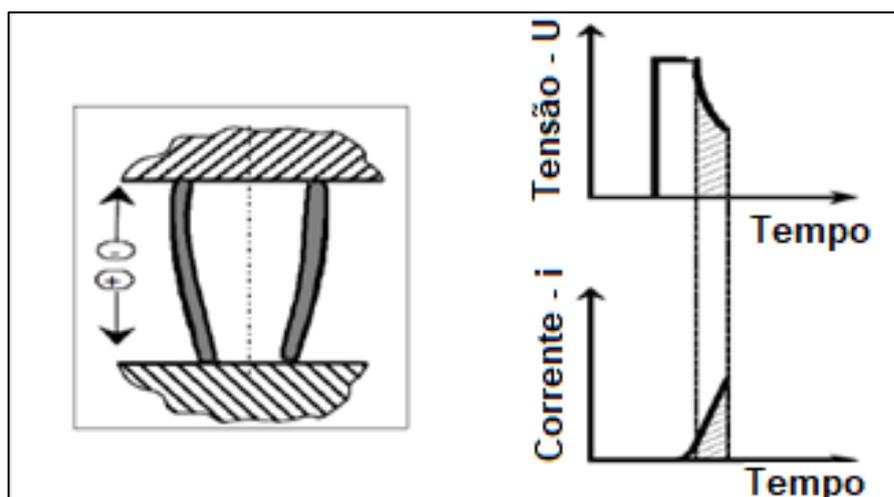


Fonte: KÖNIG; KLOCKE, 1996.

### Formação do canal de plasma

De acordo com Santos (2013) “a teoria de ionização por impacto explica que os elétrons liberados no catodo se aceleram e colidem com as moléculas do dielétrico, favorecendo a liberação de mais elétrons e íons positivos, iniciando uma reação de alta energia”. Com isso, há geração de superaquecimento e evaporação de parte do fluido dielétrico que faz com que ocorra um aumento da corrente elétrica e um decréscimo da resistência do dielétrico. Em seguida, há formação do canal de plasma que é mantido por um período de duração conforme regulagem do operador e funde por condução térmica certa quantidade de material do eletrodo ferramenta e peça, como demonstrado na figura 23 (STEVENS, 1998).

Figura 23 - Formação do canal de plasma devido a colisão dos elétrons em alta velocidade.



Fonte: KÖNIG; KLOCKE, 1996

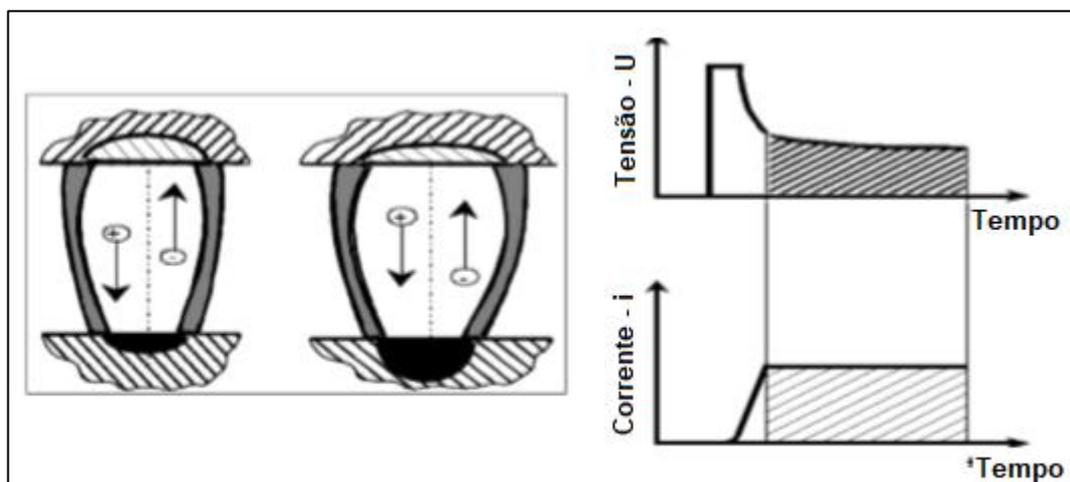
### Fusão e evaporação do material nos eletrodos

Nessa etapa, pouca quantidade de material líquido é evaporada devido à alta pressão do plasma, isso ocorre porque a densidade de corrente decresce bruscamente com o aumento da profundidade da cavidade da superfície do eletrodo e da peça (SANTOS,2013).

Um pequeno volume de dielétrico líquido na região do canal devido a irradiação da energia do plasma vaporiza, a dissocia e ioniza resultando em um aumento da massa e do diâmetro do canal de plasma e gases, diminuição da temperatura e pressão. Na figura 24, percebe-se que o anodo inicia um processo de solidificação em

consequência da expansão e da diminuição do fluxo de energia e o catodo, a cavidade fica mais profunda (STEVENS, 1998).

Figura 24- As fases de fusão e de sublimação dos materiais.

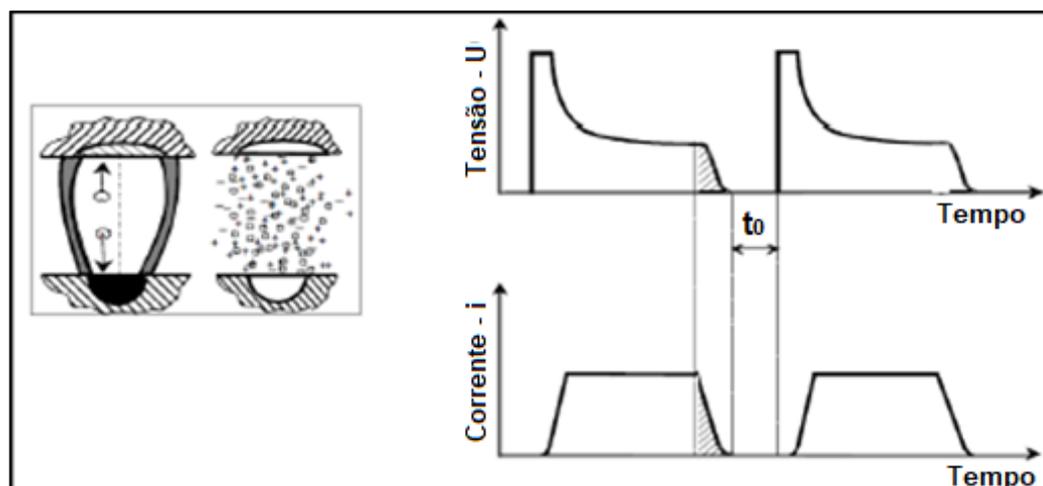


Fonte: KÖNIG; KLOCKE, 1996

### Ejeção do material fundido

Devido à alta pressão que o plasma exerce sobre as cavidades, pouco material se evapora e, com a suspensão da descarga, uma pequena cratera é formada nas superfícies da peça e do eletrodo (figura 25). Com a suspensão da carga, o material é removido junto as bolhas devido à queda de pressão e uma parte do material fundido fica solidificada na cratera (STEVENS, 1998).

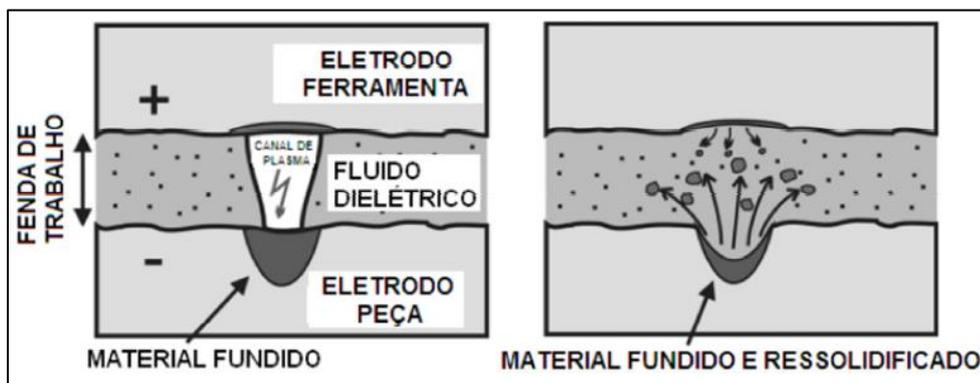
Figura 25 - Limpeza dos resíduos após interrupção do canal de plasma.



Fonte: KÖNIG; KLOCKE, 1996.

Segundo Bleys et al (2006) abaixo da superfície as características térmicas da EDM induzem uma zona fundida e uma zona ressolidificada afetada pelo calor como na figura 26.

Figura 26- Formação da zona ressolidificada.

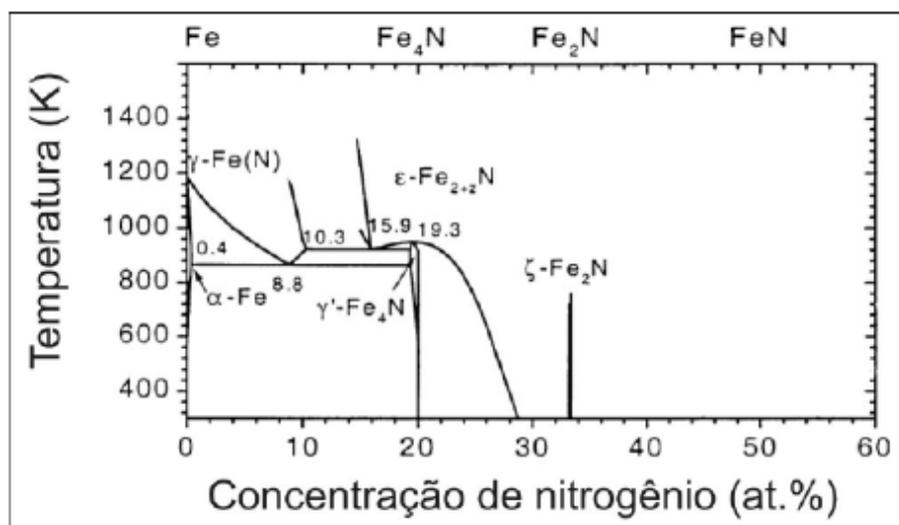


Fonte: BLEYS et al, 2006.

### 2.6.1 Nitretação por descargas elétricas- NDE

No processo de nitretação convencional, tanto líquida quanto gasosa, o nitrogênio é transferido para a amostra por difusão intersticial ou por lacunas no reticulado cristalino em temperaturas de trabalho na faixa de 500 a 590°C. Durante esse processo há precipitação de nitretos ou carbonitretos que são responsáveis por alterar as propriedades do material (ZAGONEL, 2006; SANTOS, 2013).

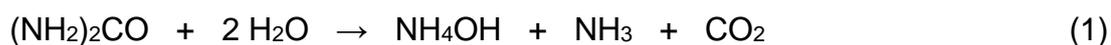
Figura 27- Diagrama de fase Fe – N.



Fonte: ZAGONEL, 2006.

O processo NDE utiliza do método de implantação iônica no qual íons acelerados para superfície da peça bombardeada aquecem e arrancam átomos da superfície que reagem com espécies do plasma e formam compostos instáveis com o nitrogênio do tipo Fe-N. Na figura 27 é possível visualizar os nitretos de ferro instáveis de acordo com o diagrama de fases, são depositados na superfície da peça que podem se recombinar para formarem nitretos mais estáveis, o excesso de nitrogênio difundirá para dentro da peça ou voltará para o plasma (ZAGONEL, 2006; SANTOS, 2013).

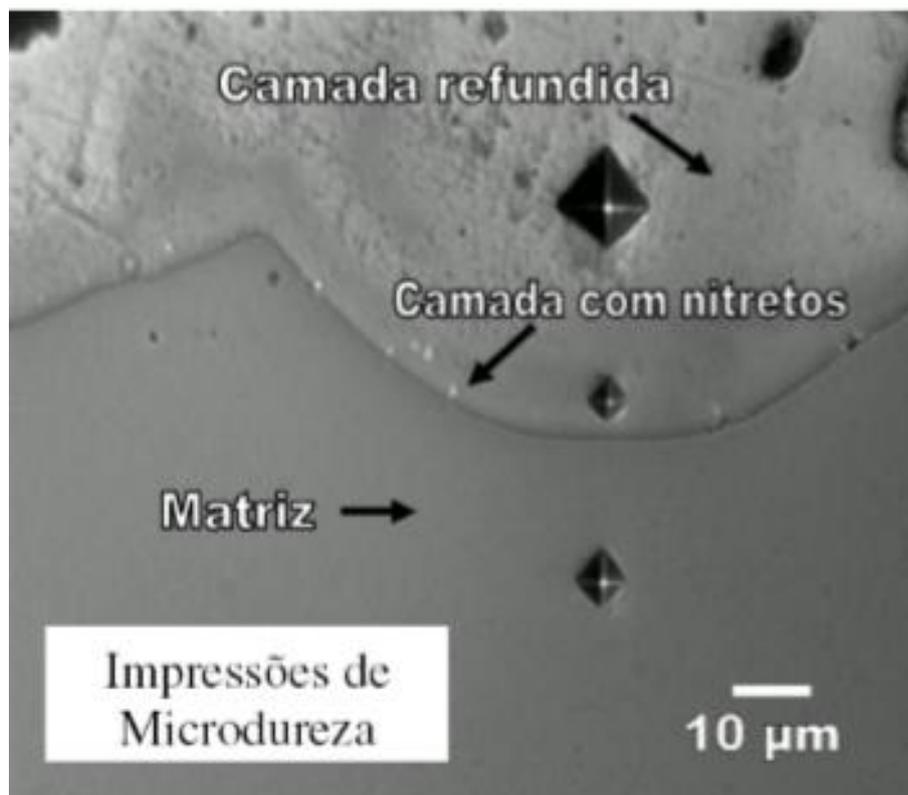
Na fase de ignição, ocorre o fenômeno de ionização por impacto, favorecendo a colisão dos elétrons acelerados em direção ao anodo devido ao campo elétrico com as moléculas presentes no fluido dielétrico. As colisões são importantes devido a ruptura do dielétrico, gerando NH<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub> gasosos, a energia é suficiente para decompor NH<sub>3</sub> em N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> conforme as reações:



O N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> irão difundir-se na forma de íons por meio do canal de plasma, como N<sup>+2</sup>, N<sup>+</sup> e H<sup>+2</sup>. Como possuem cargas positivas irão em direção ao eletrodo peça (catodo), e devido a alta energia cinética, implantam-se no interior da mesma. É também favorável a formação de íons provenientes do eletrodo ferramenta (anodo), como cobre e carbono (SANTOS, 2013).

Na amostra pós processo há formação de uma zona interna formada por difusão e a superficial é composta por uma camada enriquecida com nitretos que pode ser composta por fases  $\gamma'$  - Fe<sub>4</sub>N e  $\epsilon$  - Fe<sub>2-3</sub>N para uma matriz de ferro. Na figura 28, pode-se ver a formação três diferentes regiões em uma amostra de Ti6Al4V: camada refundida, camada com nitretos e matriz (SANTOS, 2015).

Figura 28 - Amostra de Ti6Al4V nitretada por EDM.

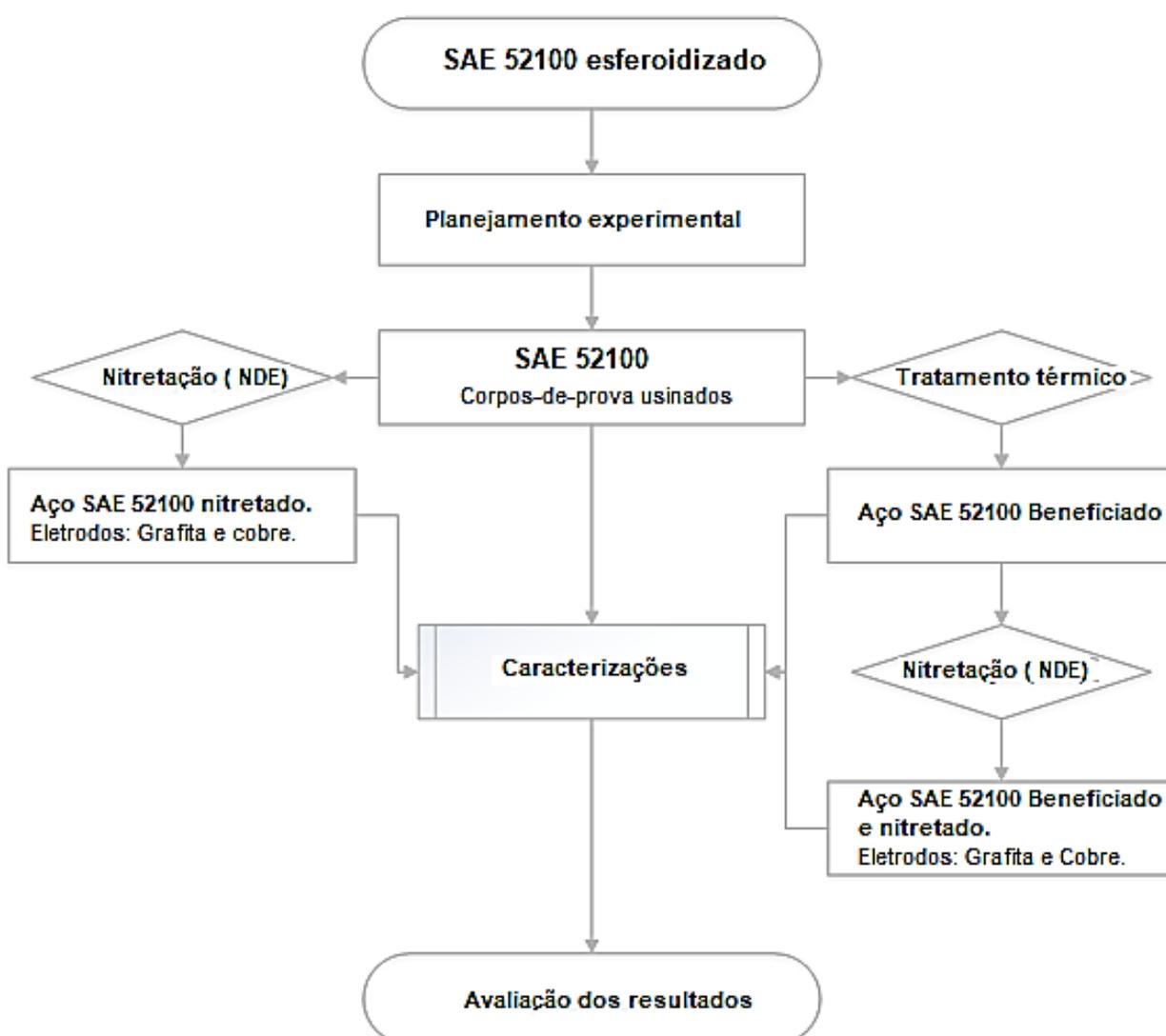


Fonte: CAMARGO et al, 2009.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente trabalho consiste na avaliação das propriedades tribológicas do aço SAE 52100 nas condições de esferoidizado e beneficiado, ambos nitretados pelo processo de descargas elétricas. O fluxograma da figura 29 possui a representação esquemática da metodologia adotada.

Figura 29 - Fluxograma do procedimento experimental realizado no trabalho.



Fonte: Próprio autor

### 3.1 PREPARAÇÃO DOS ELETRODOS PEÇAS E FERRAMENTAS

O aço SAE 52100 utilizado no presente trabalho possui composição química conforme especificado nos certificados de qualidade do material (Anexo A), a composição química média em percentual e em peso é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Composição química média do aço SAE 52100 ( % massa) .

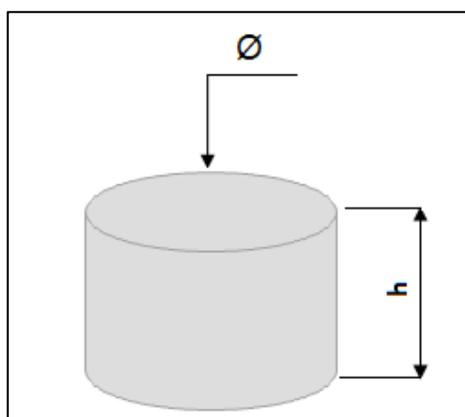
Composição Química										
(%) peso	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
	1,000	0,250	0,330	0,014	0,005	1,400	0,030	0,090	0,032	0,110

Fonte: Aços Roman, 2009.

#### 3.1.1 Processamento térmico do aço SAE 52100.

Todos os eletrodos foram usinados por processo convencional nos Laboratórios de Usinagem do CEFET-MG em formato cilíndrico, como indicado na figura 30.

Figura 30 - Formato dos eletrodos peças e ferramentas.



Fonte: Próprio autor.

O beneficiamento das amostras de aço SAE 52100, recebido esferoidizado, foi realizado em um forno elétrico tipo mufla, marca Magnus. Os parâmetros de beneficiamento foram escolhidos em função da espessura da amostra.

A têmpera foi realizada com temperatura de austenitização de 850°C durante 30 minutos no interior do forno, e seu resfriamento em óleo com agitação e aquecimento na temperatura de 30 °C.

Na sequência, realizou-se o revenimento com temperatura de aquecimento de 150 °C, durante 2 horas no interior do forno e resfriamento ao ar. Com isso, foram gerados dois grupos de eletrodos peças que foram combinados com os eletrodos ferramentas de cobre e grafita. A tabela 3, especifica o eletrodo, dimensões e materiais utilizados:

Tabela 3 - Especificações das dimensões dos eletrodos e material utilizado.

<b>Dimensões</b>	<b>Eletrodo peça</b>	<b>Eletrodo ferramenta</b>
<b>Diâmetro (mm)</b>	19	22
<b>Comprimento (mm)</b>	13	30
<b>Material</b>	Esferoidizado	Cobre
	Beneficiado	Grafita

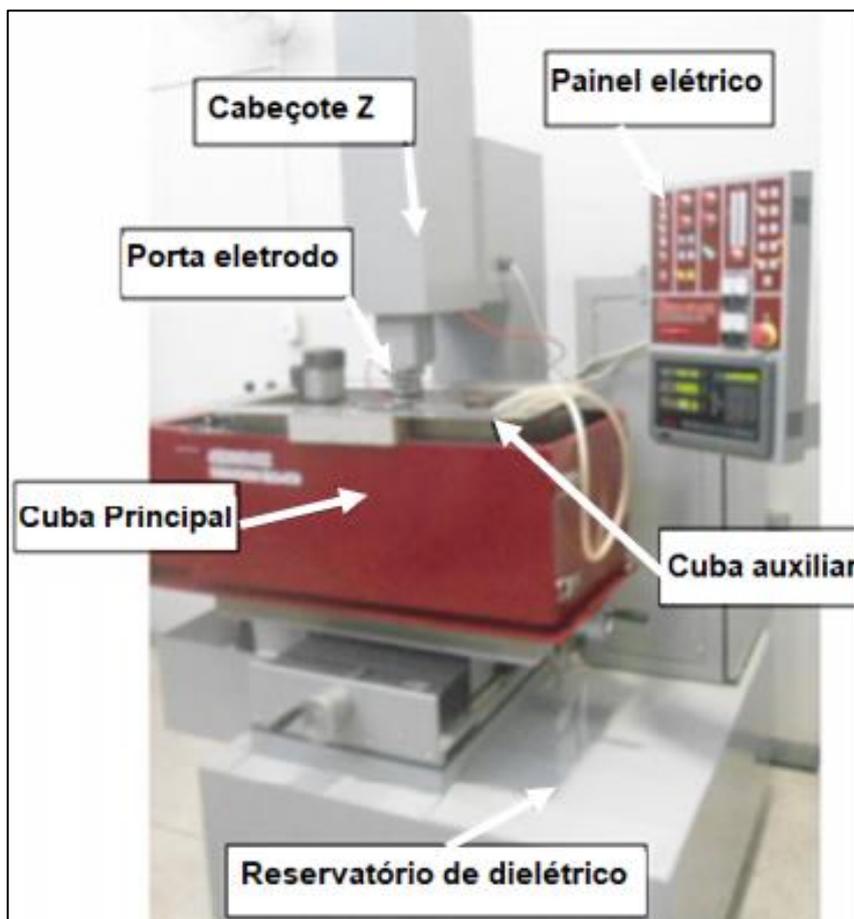
Fonte: Próprio autor

### 3.1.2 Equipamento de EDM por penetração

Os ensaios foram realizados em uma máquina de eletroerosão por penetração, modelo Servspark Eletroplus EDM-540, que possui uma cuba auxiliar com capacidade de 80 litros, fabricada em aço inoxidável AISI 304 para evitar contaminações com reservatório e corrosão devido ao uso da ureia, mostrado na figura 31.

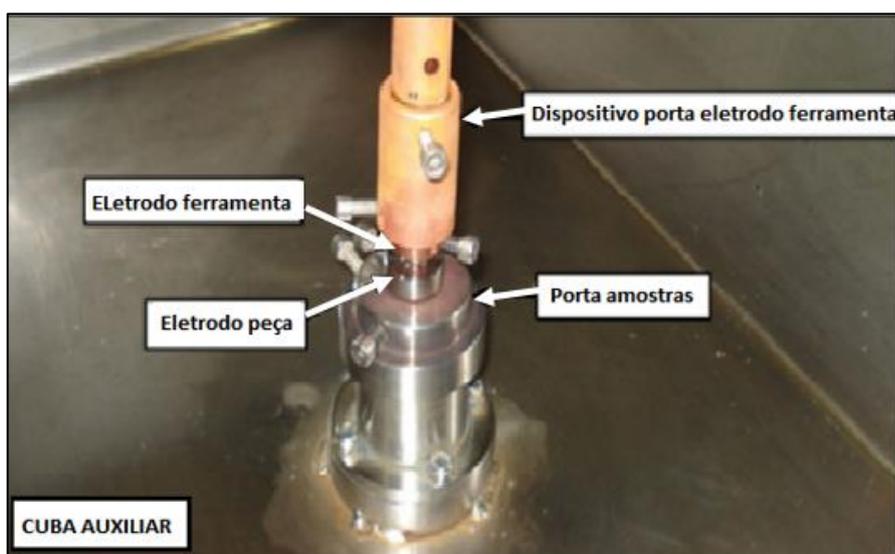
No interior da cuba auxiliar, figura 32, observa-se um dispositivo porta eletrodo feito de cobre eletrolítico para a realização dos testes, que ficou em contato com uma solução composta de água deionizada e ureia. Para a limpeza da fenda de trabalho, posicionou-se uma bomba centrífuga no interior da cuba auxiliar para agitação do fluido dielétrico.

Figura 31- Máquina de eletroerosão por penetração (modelo Servspark Eletroplus EDM-540).



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Detalhe interno da cuba auxiliar e fixação do eletrodo ferramenta.



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros operacionais utilizados foram determinados por meio de testes prévios no aço SAE 52100 e consulta ao manual do fabricante da máquina de eletroerosão. Com isso, determinou-se a corrente máxima de 40 A, tensão de 75 V e tempo de 10 minutos para todas as amostras. Os parâmetros ajustados no painel da máquina podem ser vistos na figura 33 e na tabela 4.

Figura 33 - Indicação dos parâmetros ajustados no painel da máquina.



Fonte: Próprio autor

Tabela 4 - Parâmetros ajustados na máquina para realização do processo NDE.

Parâmetros	Valores
<b>Polaridade do eletrodo ferramenta</b>	Positiva (+)
<b>Tensão (V)</b>	75
<b>Corrente (A)</b>	40
<b>Tempo de pulso -Ton (<math>\mu</math>s)</b>	100
<b>Tempo de pausa -T<sub>off</sub></b>	1,5
<b>Fenda de trabalho – gap</b>	1
<b>Velocidade do servo</b>	4
<b>Afastamento periódico da ferramenta</b>	3
<b>Tempo de erosão (s)</b>	6

Fonte: Servspark, 2011.

### 3.1.3 Fluido dielétrico

Primeiramente, mediu-se a condutividade elétrica da água deionizada para preparo da solução dielétrica com um aparelho condutivímetro portátil, que possui limites de escala entre 0 e 1999  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e incerteza de  $\pm 2\%$ . Com a confirmação do valor de condutividade de 0,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , preparou-se uma solução composta de água deionizada e ureia de concentração 30g/l.

A sequência de nitretação procedeu-se da seguinte forma, um grupo de amostras esferoidizadas foram nitretadas com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico, em seguida na mesma solução dielétrica, outro grupo de amostras esferoidizadas foram nitretadas com eletrodo de grafita. Os eletrodos beneficiados seguiram a mesma sequência de nitretação. A condutividade da solução dielétrica foi medida no início e no término do processo para cada combinação de eletrodos.

## 3.2 DESEMPENHO DA USINAGEM POR NDE

Primeiramente os eletrodos de grafita foram secos em um forno com temperatura de 300°C por duas horas. Para avaliação do desempenho na usinagem NDE, mediram-se as massas dos eletrodos peças e ferramentas antes e após o a nitretação por descargas elétricas com uma balança digital com precisão de 0,0001 gramas marca BEL modelo MARK M. Os eletrodos de grafita foram secos em um forno com temperatura de 300°C por duas horas para precisão nas medidas.

Com o valor da variação de massa foi possível avaliar a taxa de remoção de material (TRM) como descrito na equação 1:

$$TRM = \frac{\Delta m}{\delta.t} \quad (1)$$

A TRM é expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$ , onde  $\Delta m$  é a variação de massa do eletrodo peça ( $m_i - m_f$ ),  $\delta$  é peso específico do eletrodo peça e  $t$  é o tempo de usinagem.

Para a taxa de desgaste de material (TD) foi utilizada a equação 2 para avaliar o desgaste dos eletrodos ferramentas: cobre e grafita.

$$TD = \frac{\Delta m}{\delta \cdot t} \quad (2)$$

A equação é idêntica a equação 2, mas é utilizada com as variáveis do eletrodo ferramenta. A TD também é expressa em mm<sup>3</sup>/min, onde  $\Delta m$  é a variação de massa do eletrodo ferramenta (mi-mf),  $\delta$  é peso específico do material e t é o tempo de usinagem.

Para o avaliar o desempenho do processo EDM, utiliza-se o valor do desgaste volumétrico relativo (DVR) que é a razão entre a TD e a TRM que é, geralmente, expressa em percentual como na equação 3.

$$DVR(\%) = \frac{TD}{TRM} \times 100 \quad (3)$$

### 3.3 CARACTERIZAÇÕES DOS ELETRODOS PEÇAS E FERRAMENTAS

#### 3.3.1 Microscopia óptica da camada nitretada

Para a realização do processo de nitretação por descargas elétricas, as amostras foram cortadas ao meio com o auxílio de uma serra de disco (cut-off). Após o corte foram realizadas análises metalográficas na seção transversal à superfície nitretada para avaliação da espessura da camada formada. Foram feitas 10 imagens e 20 medidas por imagem para mensurar a espessura da camada nitretada formada, uma vez que o procedimento é importante nas amostras beneficiadas, pois as amostras podem apresentar regiões de descarbonetação. Como o aço SAE 52100 é alto carbono é suscetível a descarbonetação devido as altas temperaturas de austenitização, favorecendo a difusão dos átomos de carbono da superfície do material para a atmosfera do forno.

As amostras foram embutidas em resina termo endurecível no laboratório de metalografia do CEFET-MG em uma embutidora a quente sob pressão e refrigeração automática. Após o embutimento fizeram-se o lixamento em uma sequência de lixas de 120, 240, 320, 400 e 600 mesh e polimento com pasta de diamante com tamanhos de partícula de 9  $\mu$ m e 3  $\mu$ m, por fim ataque com reagente químico Nital 3 %.

Para a aquisição das imagens foi utilizado um microscópio óptico da marca Kontrol com uma câmera digital acoplada a um sistema de captura de imagens. As imagens foram determinantes para identificar a zona refundida e zona afetada pelo calor (ZAC).

### 3.3.2 Difração de Raios X (DRX)

Foi utilizado um difratômetro de marca Shimadzu, modelo 700, para avaliar a formação de nitretos no processo NDE. Para a comparação, realizou-se a difração em duas amostras referências que não foram submetidas ao processo NDE, uma amostra esferoidizada e outra beneficiada. Posteriormente, nas amostras nitretadas com os eletrodos ferramentas de cobre eletrolítico e grafita. Os parâmetros de varredura estão expressos na tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados na difração de raio x para os eletrodos peças.

Parâmetros	Unidade	
Radiação	CuK $\alpha$	
Voltagem do tubo	40	KV
Corrente	30	mA
Modo de varredura	Tempo Fixo	
Espaçamento	0,02 $^{\circ}$	
Velocidade de varredura	2	Graus/minuto
Tempo de varredura por ponto	5	s
Ângulo inicial (2 $\theta$ )	10	$^{\circ}$
Ângulo final (2 $\theta$ )	110	$^{\circ}$

Fonte: Próprio autor

Com os valores de intensidade e ângulo de difração foi construído espectros de raios-X para os eletrodos peças esferoidizados, beneficiados e nitretados por descargas elétricas e, para melhor assertividade, foram comparados com padrões de difração da base de dados de estruturas cristalinas inorgânicas (*Inorganic Crystal Structure Database- ICSD*).

### 3.3.3 Microdureza Vickers

Utilizou-se um microdurômetro Vickers da marca Shimadzu, modelo HMV 2T. Os ensaios foram realizados nas mesmas amostras preparadas por metalografia, e nos quais foram identificadas as camadas. Empregou-se uma carga de 490,3 mN (50 gf) no penetrador e um tempo de indentação de 20s. As indentações foram realizadas na zona refundida (ZR), na zona afetada pelo calor (ZAC) e na matriz para a comparação entre elas do valor médio e desvio-padrão.

### 3.4 ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO (PINO SOBRE DISCO)

Os ensaios de desgaste por deslizamento foram realizados por meio de um tribômetro Pino sobre Disco, localizado no laboratório de Desgaste e Tribologia da Escola de Engenharia da UFMG.

O tribômetro utilizado nos ensaios possui um computador com o software NANOVEA para aquisição e tratamento de dados. Os gráficos de coeficiente de atrito (COF) por distância de deslizamento (m) para o tempo de 120 minutos foram obtidos por meio de um filtro do software NANOVEA que trata cada ponto da curva do gráfico através da média de 40 pontos próximos. Os parâmetros do ensaio são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados no ensaio pino sob disco.

<b>Parâmetros</b>		<b>Unidade</b>
Diâmetro das esferas WC/Co	6	mm
Carga Normal	15	N
Velocidade tangencial	12	m/min
Rotação	239/254/382	rpm
Tempo	2	h
Raio da trilha	8,0/7,5/5,0	mm
Temperatura	20	°C

Fonte: Próprio autor

As amostras beneficiadas e esferoidizadas, escolhidas como referência, foram texturizadas somente com água deionizada pelo mesmo tempo de 10 minutos das amostras nitretadas para que pudessem ser comparadas.

A norma ASTM G99 – 05 (2010), recomenda que as amostras do ensaio pino sobre disco tenham no máximo 0,8  $\mu\text{m}$  de rugosidade, mas as amostras utilizadas no trabalho possuíam rugosidades superior devido à textura característica do processo na superfície das amostras.

Os ensaios foram realizados em todas as amostras pelo tempo total de 120 minutos e parcial de 48 minutos. Algumas das amostras apresentaram irregularidades localizadas em pontos específicos da superfície devido à texturização, e para que pudessem ser comparadas variou-se o raio da trilha e associou-se uma rotação correspondente para que a velocidade tangencial fosse constante entre as amostras.

Mediu-se as massas de todas as amostras e esferas usadas como contra corpo em uma balança digital com resolução de 0,0001 g, antes e após, o ensaio para a determinação do volume de material perdido durante os testes que, posteriormente, foram correlacionados com a taxa de desgaste.

#### **3.4.1 Microscopia eletrônica de varredura do ensaio de desgaste**

As trilhas geradas nas amostras, os desgastes causados nas esferas e a investigação dos mecanismos de desgaste em ambos os corpos, foram analisados por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e por elétrons secundários para correlacioná-los aos mecanismos de desgaste. O Microscópio utilizado foi o de modelo SSX-150 da marca Shimadzu.

#### **3.4.2 Perfilometria**

Para a análise da profundidade das trilhas geradas no ensaio de desgaste Pino sobre disco foi realizada a perfilometria da superfície desgastada na região onde se formou a trilha. Para tal, um perfilômetro HOMMEL-ETAMIC T8000 que possuía o

software Turbo Wave V.7.55 para tratamento e aquisição de dados. Os parâmetros utilizados estão resumidos na tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados na perfilometria.

<b>Parâmetros</b>		<b>Unidade</b>
Apalpador	TKU 300/600	-
Ponta	Stylus 230475	-
Margem de medição	800	-
Distância entre os valores de medição	1	µm
Velocidade de apalpação	0,5	mm/s
Trajeto de apalpação	5	mm
Quantidade de medição	100	-

Fonte: Próprio autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos no processo de nitretação por descargas elétricas, utilizando-se de eletrodos peças esferoidizados e beneficiados como substrato, ambos em combinação com eletrodos ferramentas de cobre e grafita. Foram realizadas caracterizações mecânicas, ópticas e tribológicas das amostras em estudo.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ELETRODOS PEÇAS

#### 4.1.1 Microestrutura

O eletrodo peça usinado do aço SAE 52100 do material como recebido apresentou microestrutura esferoidizada. Como pode ser observado na figura 34, a imagem proveniente da microscopia óptica (MO) revelou possíveis carbonetos dispersos em uma matriz ferrítica.

Figura 34 – Microscopia Óptica da microestrutura esferoidizada (MO).

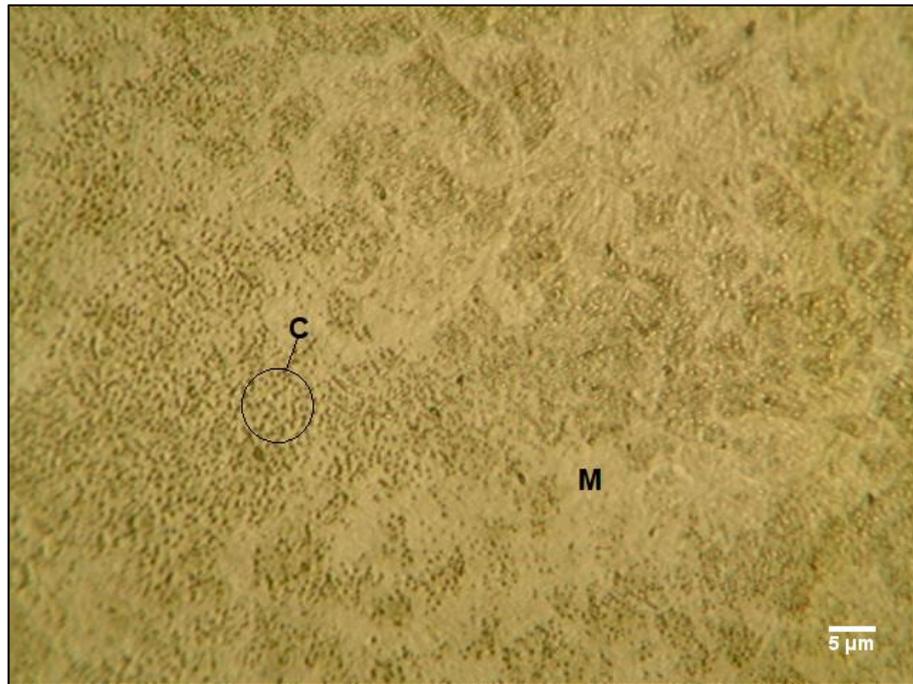


F- Ferrita; C- carbonetos de cromo e ferro.

Fonte: Próprio autor.

Na figura 35, tem-se a microestrutura após o beneficiamento do aço SAE 52100, anteriormente esferoidizado, utilizado para a usinagem de eletrodos peças. A imagem do ensaio metalográfico revelou uma microestrutura composta de martensita revenida e possíveis carbonetos finamente dispersos.

Figura 35 - Microestrutura beneficiada (MO).



M-Martensita revenida; C- carbonetos de cromo.

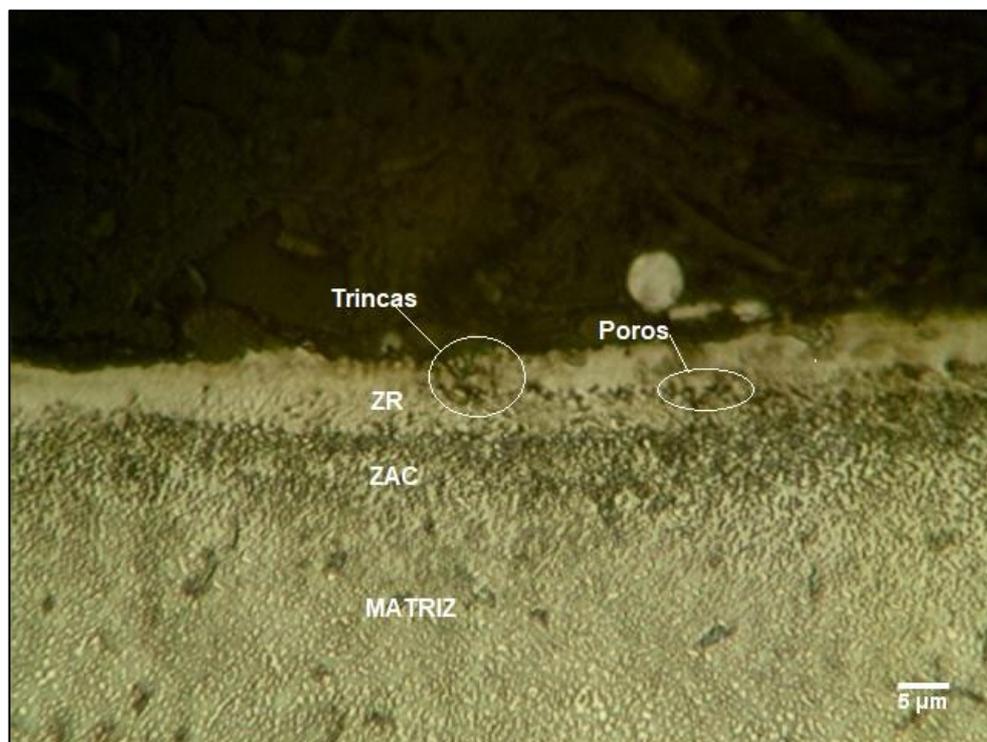
Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.2 Caracterização das Camadas

As amostras submetidas ao processo de nitretação por descargas elétricas revelam a formação de duas regiões que são: zona refundida (ZR) e zona afetada pelo calor (ZAC). As regiões especificadas nas imagens da figura 36 até a figura 39 são comumente encontradas em processos de usinagem por descargas elétricas, devido ao gradiente de carbono, composição do fluido dielétrico ou contaminações provenientes do eletrodo ferramenta (SANTOS, 2013).

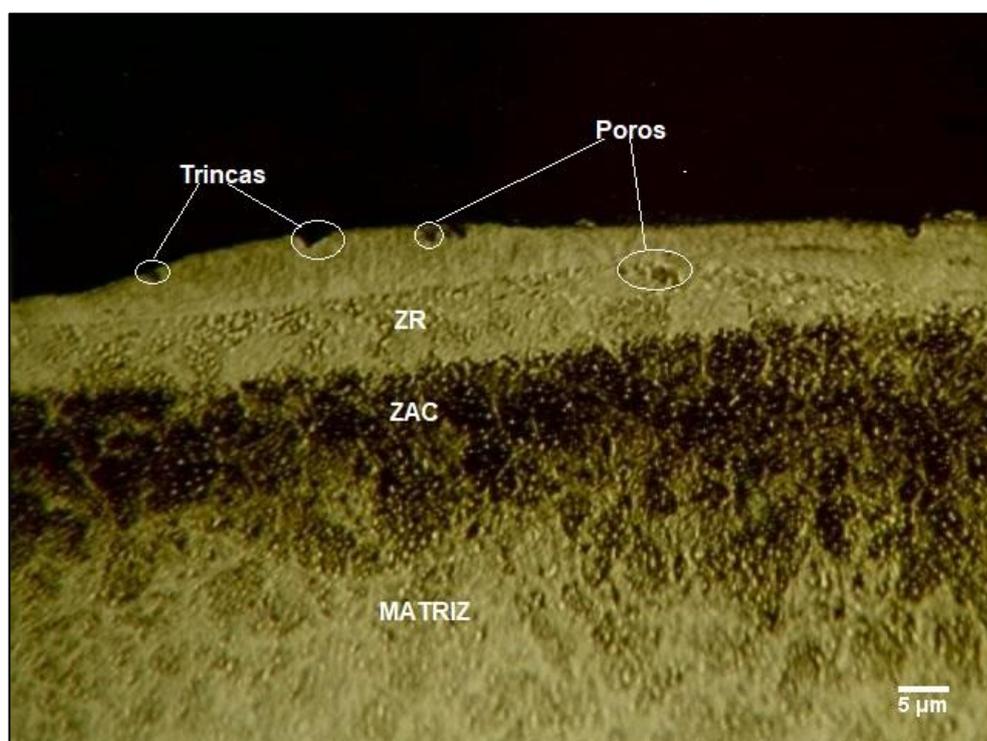
As imagens demonstram que os eletrodos apresentam uniformidade em relação a região da ZR, mas apresentam algumas discontinuidades como poros e trincas. A região da ZAC não possui distribuição uniforme em relação a extensão da amostra.

Figura 36 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça esferoidizado com a utilização do eletrodo ferramenta de cobre – ataque com reagente Nital 3%.



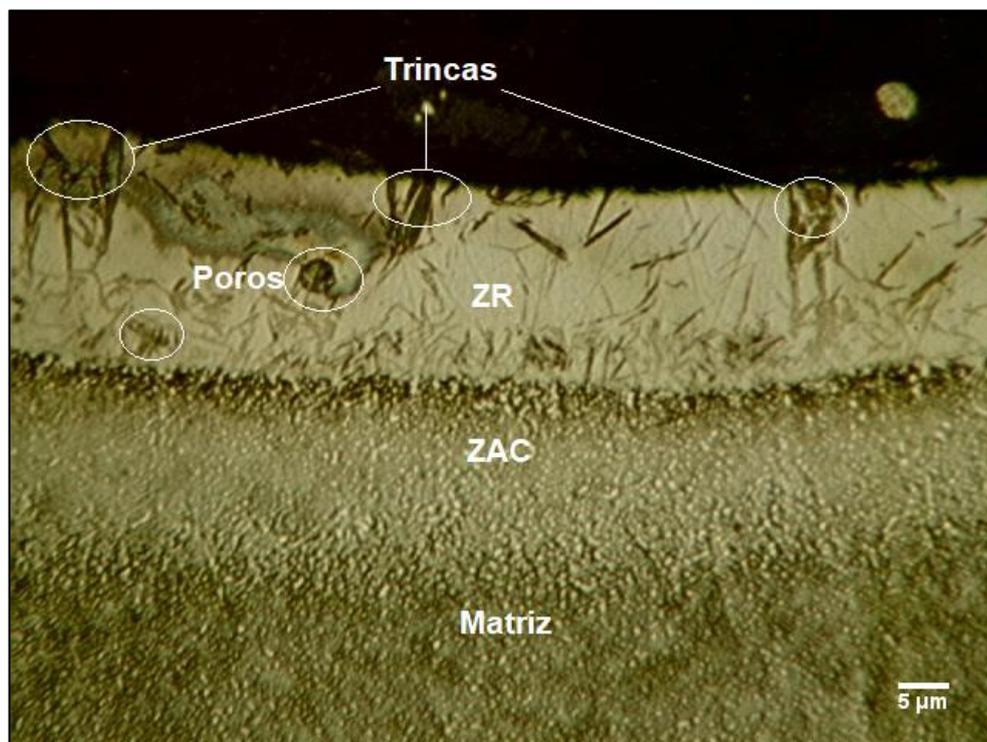
Fonte: Próprio autor

Figura 37 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça beneficiado com a utilização de eletrodo ferramenta de cobre – ataque com reagente Nital 3%.



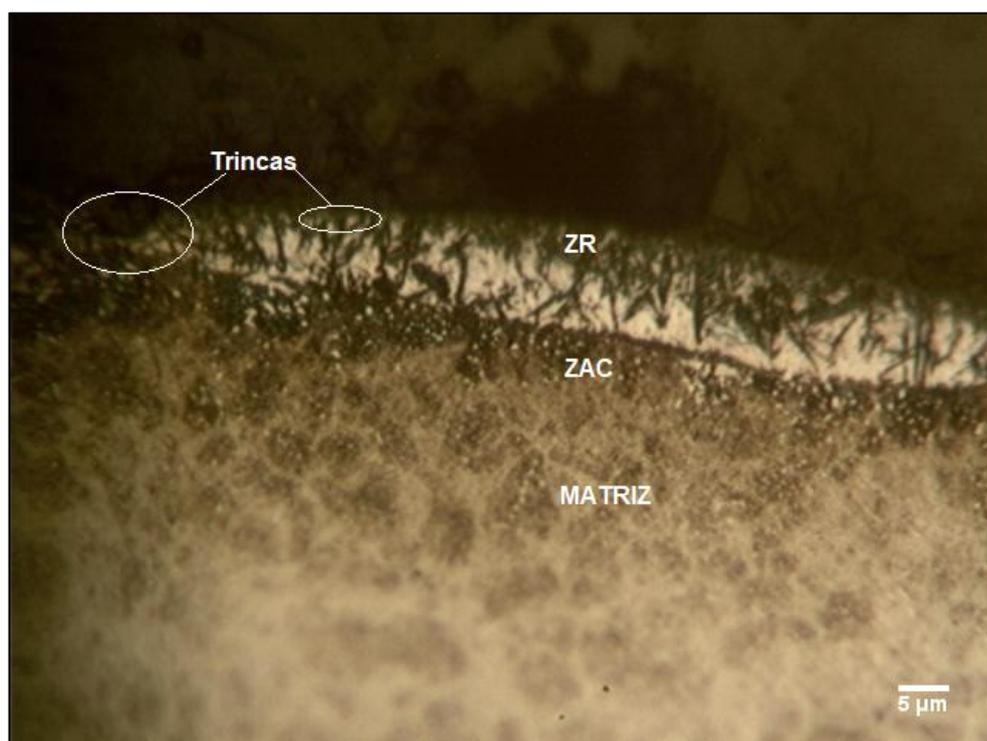
Fonte: Próprio autor

Figura 38 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça esferoidizado com utilização do eletrodo ferramenta de grafita – ataque com reagente Nital 3%.



Fonte: Próprio autor

Figura 39 - Imagem da seção transversal (MO) do eletrodo peça beneficiado com a utilização de eletrodo ferramenta de grafita – ataque com reagente Nital 3%.



Fonte: Próprio autor

Comparando-se as zonas refundidas, observa-se que os eletrodos nitretados com eletrodo ferramenta de grafita apresentaram maior quantidade de poros e trincas em comparação aos eletrodos de cobre. Observa-se na imagem do eletrodo beneficiado e nitretado com grafita menor uniformidade em relação aos outros eletrodos.

A tabela 8 apresenta os valores médios das medidas das espessuras das camadas nitretadas e o desvio padrão para os diferentes grupos de eletrodos. Comparando-se os eletrodos esferoidizados, a espessura da ZR do eletrodo de grafita aumentou 272 % em relação ao eletrodo cobre, enquanto que a espessura da ZAC houve redução de aproximadamente 20%. Sendo que a espessura total que é a soma da ZR e ZAC teve aumento de 60%.

Comparando-se os eletrodos beneficiados, observa-se que o comportamento foi inverso aos eletrodos esferoidizados, pois houve diminuição da espessura da ZR de 25% do eletrodo cobre para eletrodo de grafita e também diminuição da ZAC em 67%. Comparando-se as espessuras totais, encontra-se redução de 50% ao trocar cobre por grafita.

Para a comparação entre os eletrodos esferoidizados e beneficiados, nota-se que para o eletrodo de cobre, houve aumento da espessura ao mudar a condição esferoidizada para beneficiada e o comportamento inverso quando se compara o eletrodo de grafita, conforme ilustra a figura 40.

Tabela 8 - Espessura da camada nitretada pelo processo NDE.

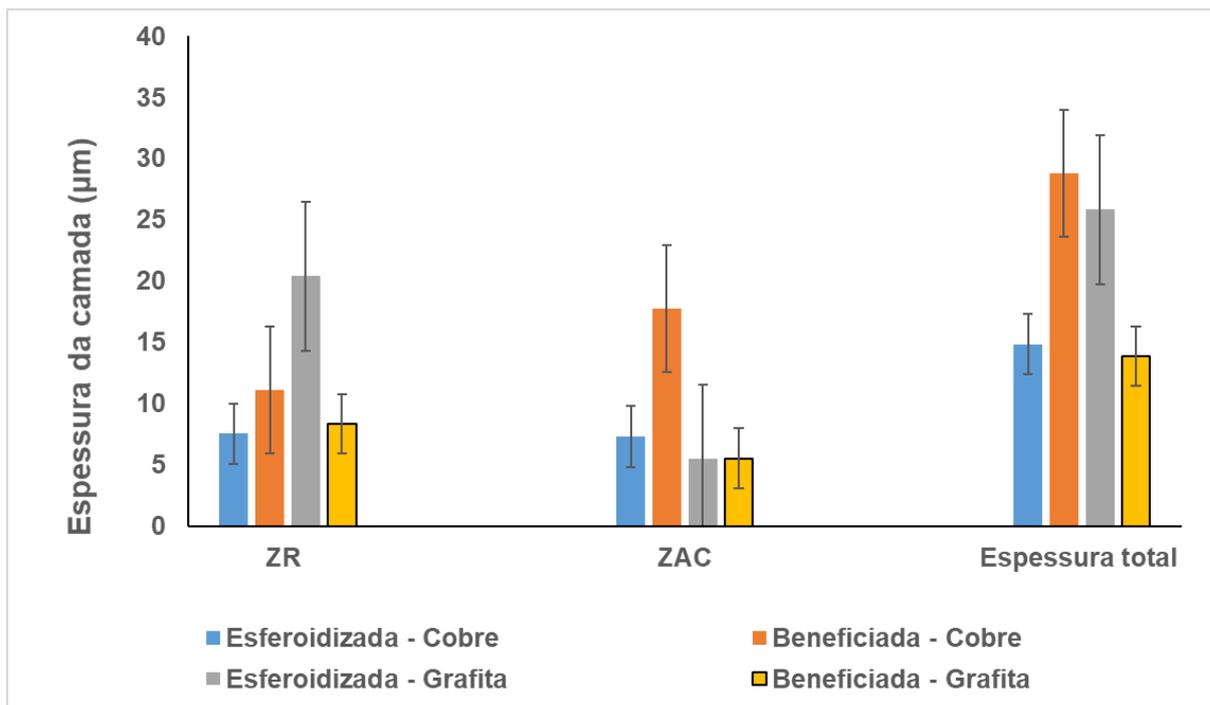
<b>Eletrodo peça / Eletrodo ferramenta</b>	<b>ZR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>ZAC (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Espessura total (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>Esferoidizada - Cobre</b>	7,5 $\pm$ 1,2	7,3 $\pm$ 1,6	14,8 $\pm$ 2,8
<b>Beneficiada - Cobre</b>	11,1 $\pm$ 2,1	17,8 $\pm$ 4,2	28,9 $\pm$ 6,3
<b>Esferoidizada - Grafita</b>	20,4 $\pm$ 4,0	5,5 $\pm$ 2,8	24,4 $\pm$ 6,8
<b>Beneficiada - Grafita</b>	8,3 $\pm$ 2,2	5,7 $\pm$ 1,3	14,0 $\pm$ 3,5

Fonte: Próprio autor.

Santos, Silva e Santos (2015) avaliaram a influência da corrente elétrica no processo de nitretação por descargas elétricas no aço AISI H13, encontrando valores de Espessura total de (30,97 $\pm$ 1,96)  $\mu\text{m}$  para a concentração de 30 g/L e corrente 30 A.

Xia et al. (2010) encontraram valores da camada total (ZR+ ZAC) próximos de 20  $\mu\text{m}$  em processo por plasma do aço SAE 52100. Portanto, os valores encontrados para as espessuras totais no processo de nitretação por descargas elétricas aproximam-se da ordem de grandeza de processos de nitretação já consolidados.

Figura 40 – Comparação das espessuras das camadas no aço SAE 52100.



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 MICRODUREZA

Os resultados da microdureza Vickers (HV) realizada nas amostras nitretadas são mostradas na tabela 9.

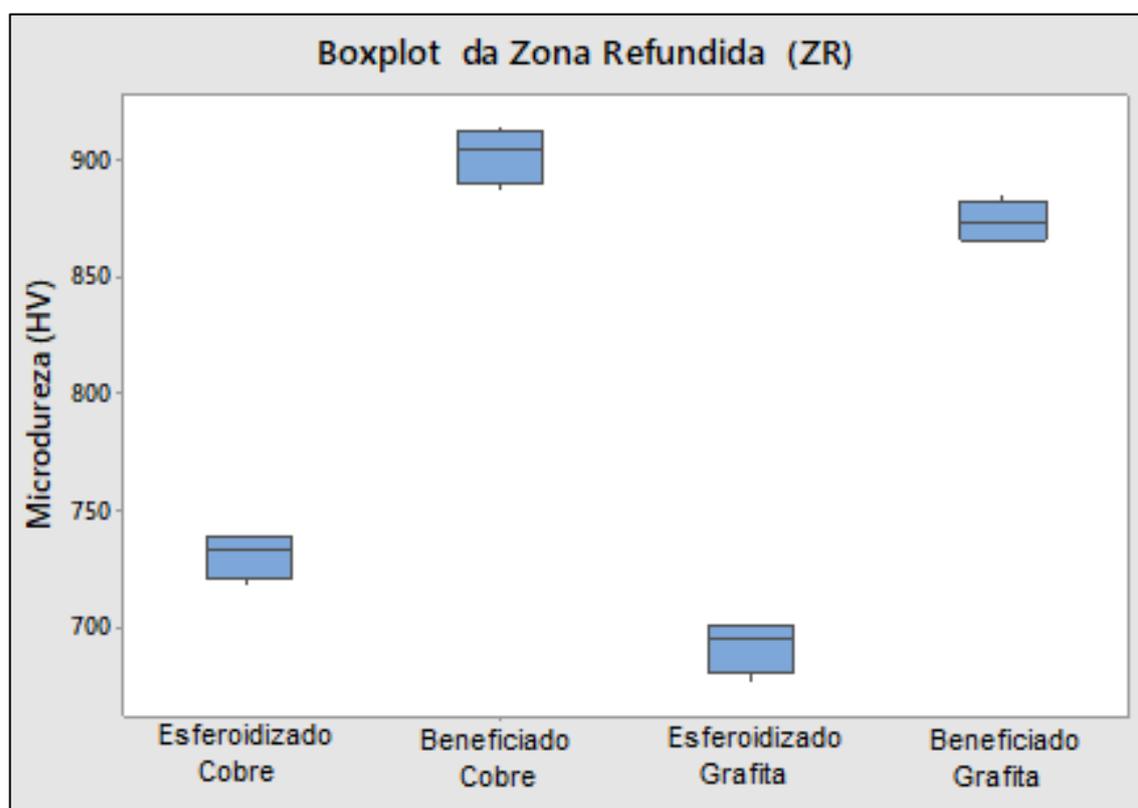
Tabela 9 - Microdureza vickers (HV) realizada com carga de 490,3 mN (50 gf) e tempo de indentação de 20 s.

<b>Eletrodo peça / Eletrodo ferramenta</b>	<b>ZR (HV)</b>	<b>ZAC (HV)</b>	<b>Matriz (HV)</b>
Esferoidizada - Cobre	734,0 ± 9,5	596 ,0 ±10,4	324,0 ±14,3
Beneficiada - Cobre	905,0 ± 11,8	683,0 ±11,9	813,0 ± 8,4
Esferoidizada - Grafita	696,0 ± 11,2	597,0 ±10,2	339,0 ± 9,7
Beneficiada - Grafita	873,5 ± 8,7	617,0 ± 8,1	813,5 ± 7,1

Fonte: Próprio autor.

A figura 41, demonstra a distribuição dos dados de microdureza Vickers (HV) para a região da zona refundida e a dispersão dos valores em torno da mediana. As amostras esferoidizadas assim como as beneficiadas apresentaram valores de dureza próximos das medianas o que evidencia que o tipo de eletrodo não influenciou significativamente nos valores encontrados e sim a condição inicial do eletrodo peça.

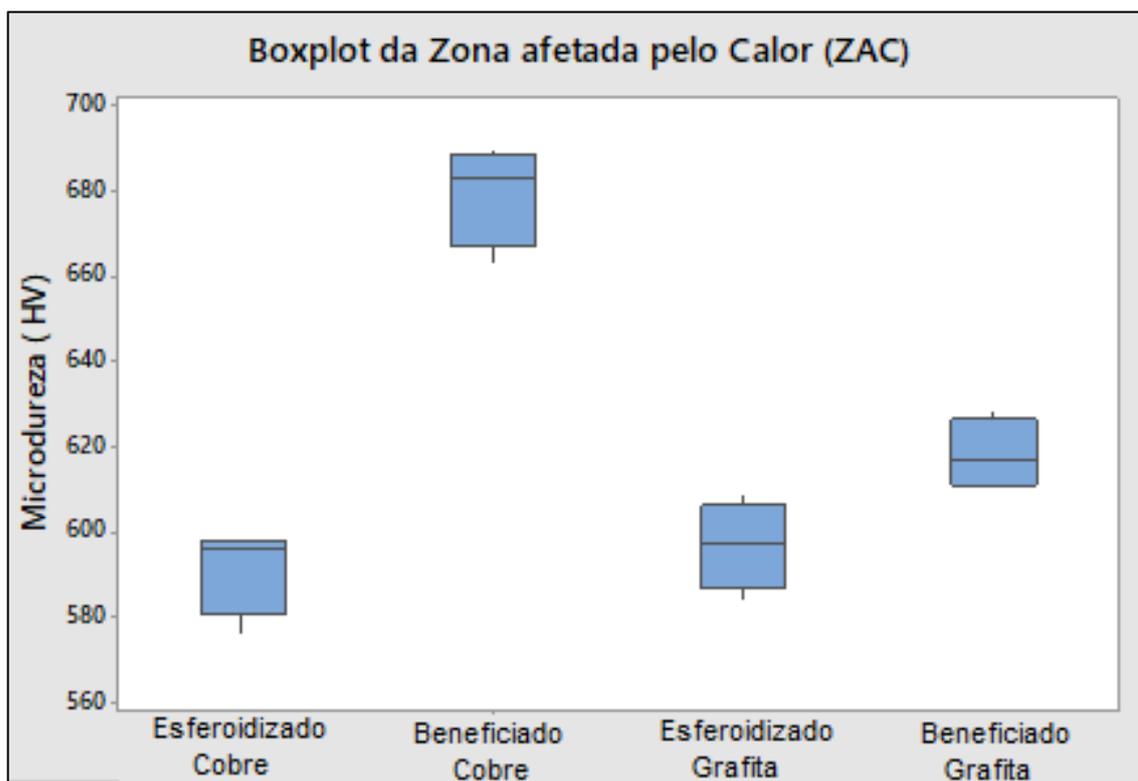
Figura 41 - Boxplot dos valores de Microdureza vickers (HV) da zona refundida (ZR).



Fonte: Próprio autor.

Com esperado, a zona afetada pelo calor (ZAC) apresentou valores bem distintos entre os eletrodos, pois essa região apresenta propriedades térmicas diferentes que em combinação com eletrodos ferramentas geraram resultados bem dispersos como pode ser visto na figura 42.

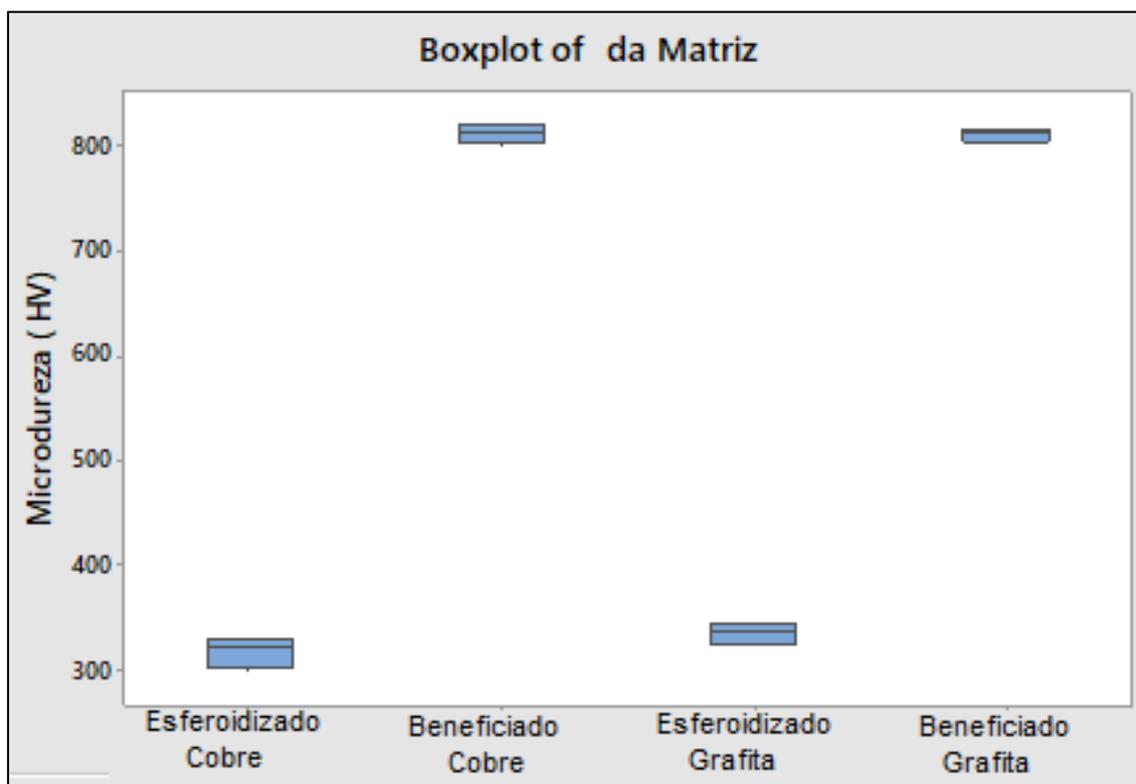
Figura 42 - Boxplot dos valores de Microdureza Vickers (HV) da zona afetada pelo calor (ZAC).



Fonte: Próprio autor.

Os valores para a matriz já foram os mais previsíveis, pois não dependem da combinação com os eletrodos ferramentas. Como apresentado na figura 43, as matrizes dos eletrodos peças beneficiados apresentaram valores de dureza maiores que as matrizes esferoidizadas.

Figura 43 - Boxplot dos valores de Microdureza Vickers (HV) para a Matriz.



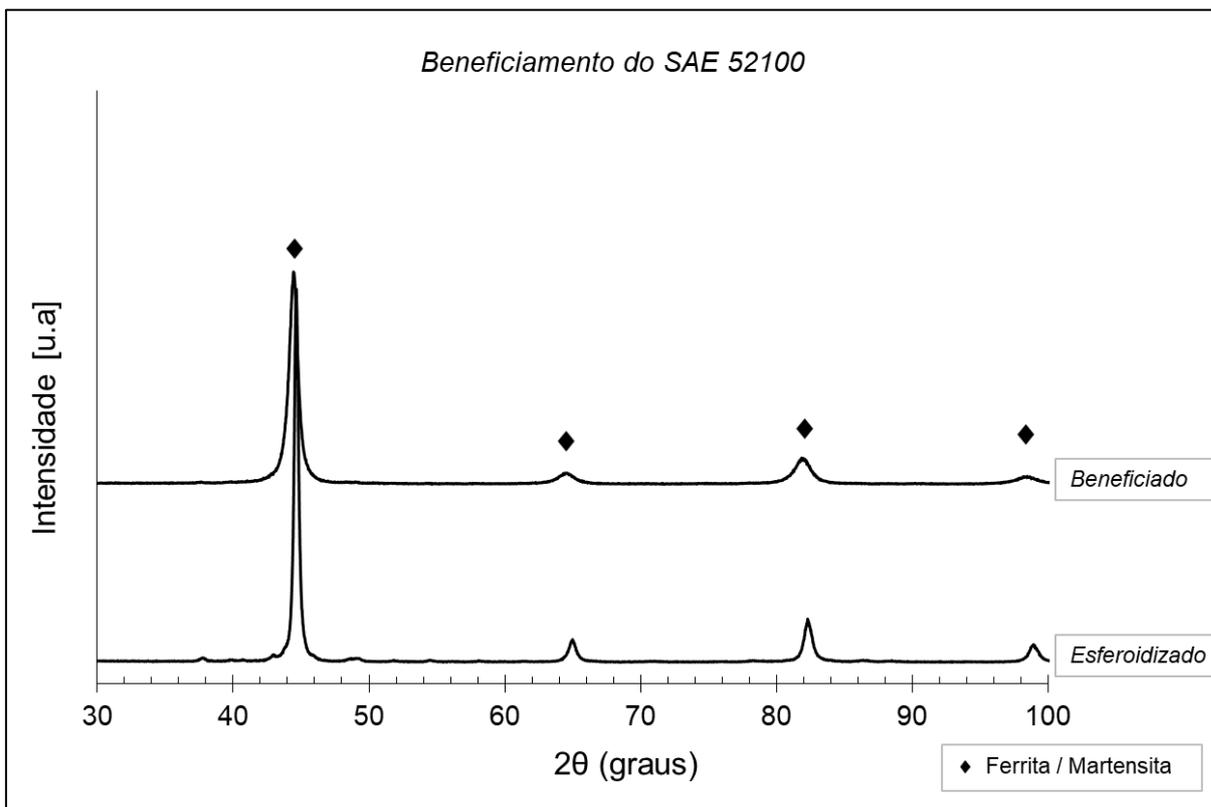
Fonte: Próprio autor.

#### 4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Os difratogramas apresentados na figura 44 revelam que antes e após tratamento térmico, tem-se a fase ferrita ( $\alpha$ -Fe, ICSD Card.52258), nas posições  $44.7^\circ, 65.0^\circ, 82.4^\circ, 98.9^\circ$  com planos (1 1 0), (2 0 0), (2 1 1) e (2 2 0), respectivamente. Isso ocorre devido à coincidência dos picos de difração da ferrita e martensita.

A confirmação do beneficiamento ocorreu quando se comparou os valores medidos no ensaio de microdureza vickers (HV) com as imagens produzidas na metalografia, com isso, confirmou-se a formação da martensita revenida e carbonetos.

Figura 44 – Difratomogramas do Beneficiamento do aço SAE 52100.

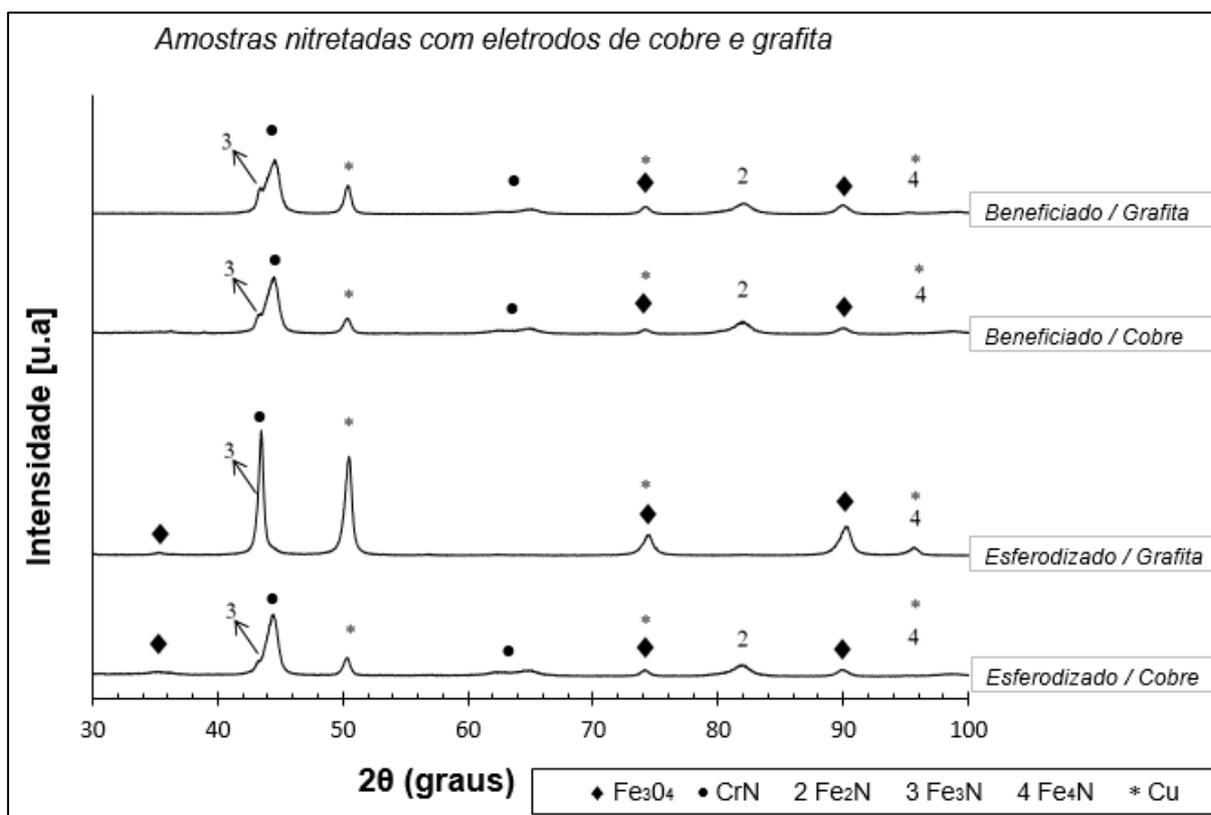


Fonte: Próprio autor.

Com a confirmação dos tratamentos térmicos realizados, o próximo passo foi a identificação dos compostos formados após o processo de nitretação por descargas elétricas. De acordo com a composição química do SAE 52100 e a afinidade com nitrogênio, oxigênio e cobre eletrolítico proveniente do eletrodo ferramenta, fizeram-se as comparações com os padrões. Conforme os difratogramas apresentados na figura 45, verifica-se a formação de nitretos, óxido de ferro e deposição de cobre elementar.

Para os nitretos que apresentaram compatibilidades, destacam-se, Fe<sub>2</sub>N (ICSD Card. 152811) identificado na posição 82.2° e plano (2 2 3), Fe<sub>3</sub>N (ICSD Card. 79981) na posição 43.4° e plano (2 -1 1), Fe<sub>4</sub>N (ICSD Card. 79980) na posição 89.5° e plano (2 2 2) e CrN (ICSD Card. 53146) nas posições 43,8°, 62,4°, 64,7° com os planos (1 0 10), (2 0 0) e (0 0 2) respectivamente.

Figura 45 – Difratomogramas de Nitretação por descargas elétricas do aço SAE 52100.



Fonte: Próprio autor

Foram também identificados óxido de ferro, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, nas posições 35.4°, 74.0°, 89.6° para os planos (3 1 1), (5 3 3) e (7 3 1). Além disso, os difratogramas demonstram que há uma certa concentração de cobre que foi depositada na superfície de todos os eletrodos peças, identificado nas posições 50.4°, 74.1°, 90.0° com os planos (2 0 0), (2 2 0) e (3 1 1).

A Tabela 10 apresenta os valores das medidas de condutividade elétrica que foram medidos no processo NDE.

Tabela 10 - Valores de condutividade dielétrica medidos no processo NDE.

Eletrodo ferramenta	Condutividade elétrica (μS/cm)			
	Esferodizado		Beneficiado	
	Antes	Após	Antes	Após
<b>Cobre eletrolítico</b>	28	50	28	52
<b>Grafita</b>	50	73	52	76

Fonte: Próprio autor

A sequência de nitretação indica que o cobre identificado nos difratogramas das amostras nitretadas com grafita foi devido a uma possível contaminação da solução, para ambos os eletrodos peças, as nitretações foram iniciadas com eletrodo de cobre eletrolítico e terminadas com eletrodo de grafita, observa-se que a possível contaminação contribuiu para o aumento da condutividade elétrica da solução.

#### 4.4 DESEMPENHO DO PROCESSO NDE

Os resultados da média e desvio padrão da Taxa de Remoção de Material (TRM), Taxa de Desgaste do eletrodo ferramenta (TD) e Desgaste Volumétrico Relativo (DVR) são mostrados na tabela 11 e tabela 12.

Tabela 11 - Desempenho no processo NDE para o aço SAE 52100 esferoidizado.

	<b>Eletrodo Cobre</b>	<b>Eletrodo Grafita</b>
<b>TRM (mm<sup>3</sup>/min.)</b>	33,5 ± 3,2	36,5 ± 3,3
<b>TD (mm<sup>3</sup>/min.)</b>	3,9 ± 0,6	5,5 ± 0,8
<b>DVR (%)</b>	11,8 ± 2,4	15,2 ± 2,7

Fonte: Próprio autor

Tabela 12 - Desempenho no processo NDE para o aço SAE 52100 beneficiado.

	<b>Eletrodo Cobre</b>	<b>Eletrodo Grafita</b>
<b>TRM (mm<sup>3</sup>/min.)</b>	51,6 ± 1,6	34,3 ± 3,5
<b>TD (mm<sup>3</sup>/min.)</b>	5,2 ± 0,6	5,2 ± 0,2
<b>DVR (%)</b>	10,1 ± 1,3	15,4 ± 1,6

Fonte: Próprio autor

Os resultados indicam que amostra beneficiada e nitretada com eletrodo ferramenta de cobre apresentou maior taxa de remoção de material, sendo que as outras taxas são significativamente iguais. A amostra esferoidizada e nitretada com eletrodo ferramenta de cobre apresentou o menor desgaste do eletrodo ferramenta, enquanto que as outras amostras apresentaram desgaste significativamente iguais.

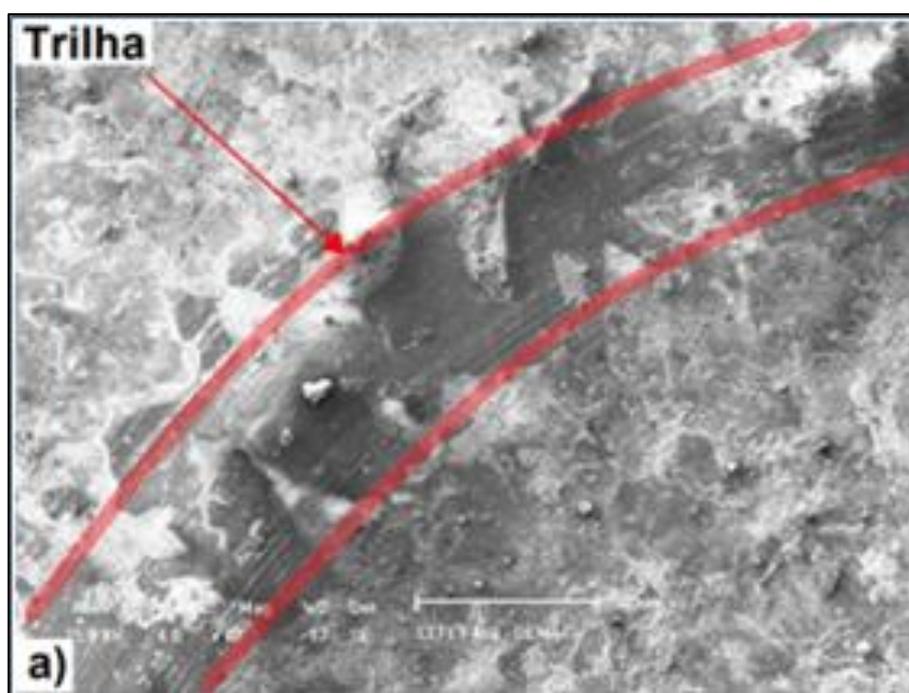
A amostra beneficiada e nitretada com cobre apresentou o menor DVR que foi  $(10,1 \pm 1,3) \%$ , mas o desempenho ficou bem próximo dos outros eletrodos testados. Portanto o processo com a amostra beneficiada e nitretada com cobre apresentou melhor desempenho, além de possuir maior TRM, menor DVR e TD está próximo exibido pelos outros eletrodos.

## 4.5 DESGASTE POR DESLIZAMENTO

### 4.5.1 Mecanismos de desgaste

As imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) das trilhas do ensaio de pino sobre disco são apresentadas a seguir. Na Figura 46 (a) é apresentada a trilha de desgaste do material esferoidizado sem nitretação e com indicação do sentido da trilha.

Figura 46 – Trilha de desgaste do material esferoidizado.



Fonte: Próprio autor

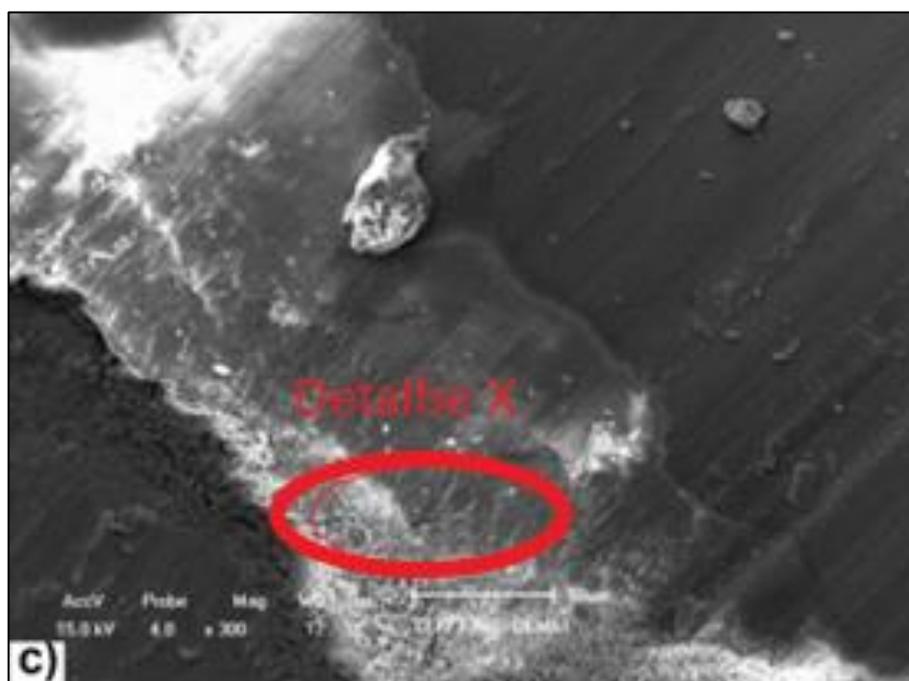
Na figura 46 (a) é possível observar a presença de debris na trilha que são detalhados na figura 47 (b). Na figura 48 (c) e 49 (d) com ampliação maior, observa-se também a presença de trincas.

Figura 47 – Debris na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado.



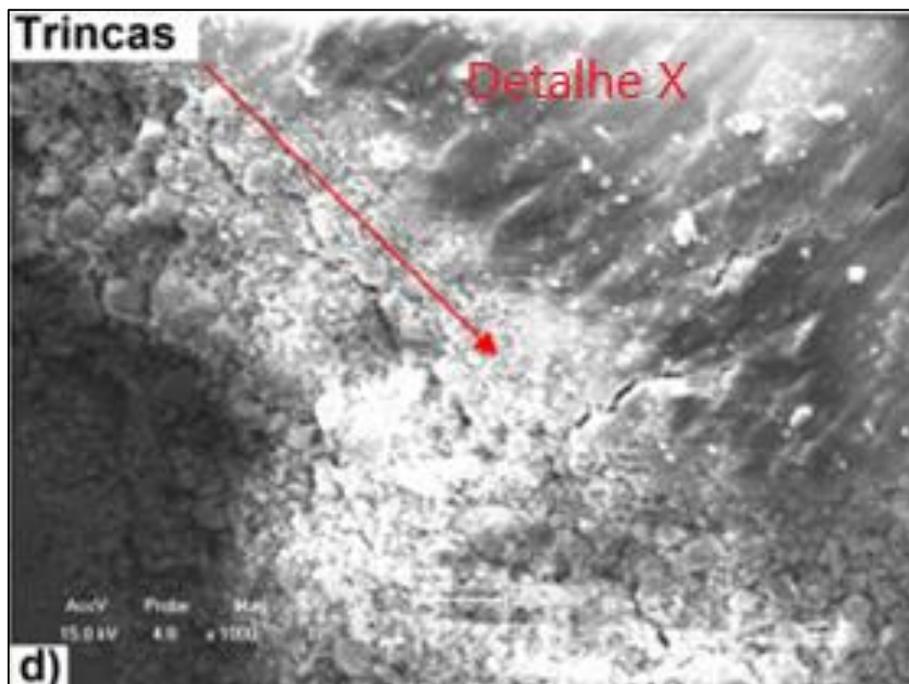
Fonte: Próprio autor.

Figura 48 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado.



Fonte: Próprio autor.

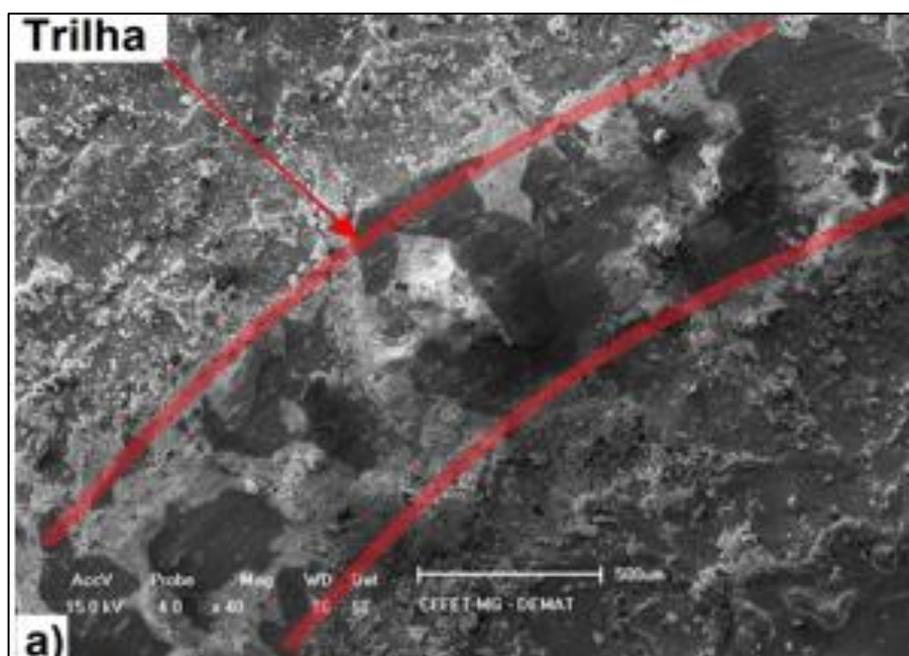
Figura 49 – Detalhe da superfície com trincas do material esferoidizado



Fonte: Próprio autor

. Na Figura 50 (a) é possível observar o sentido da trilha de desgaste da amostra beneficiada.

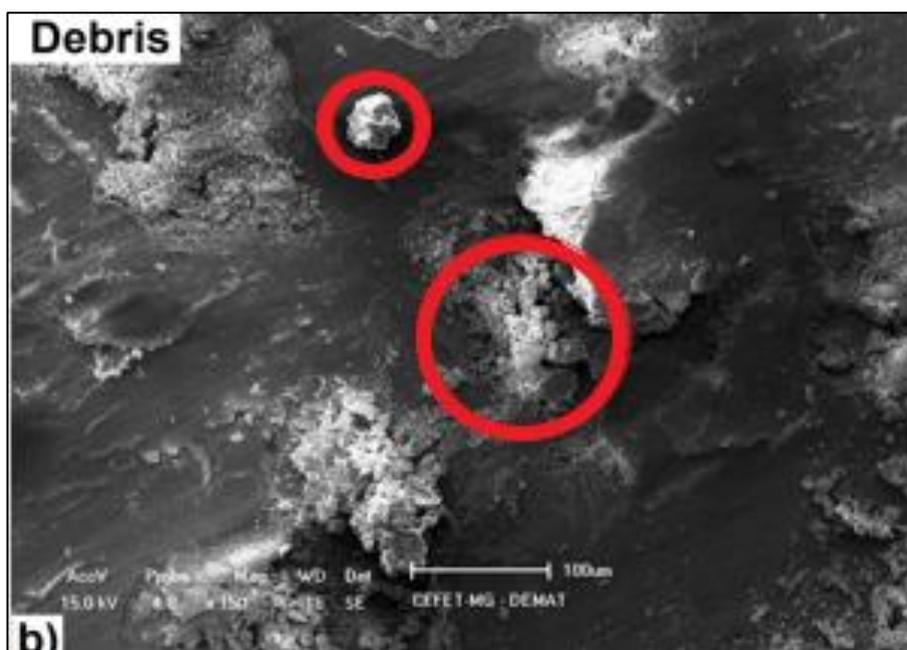
Figura 50 – Trilha de desgaste do material beneficiado..



Fonte: Próprio autor

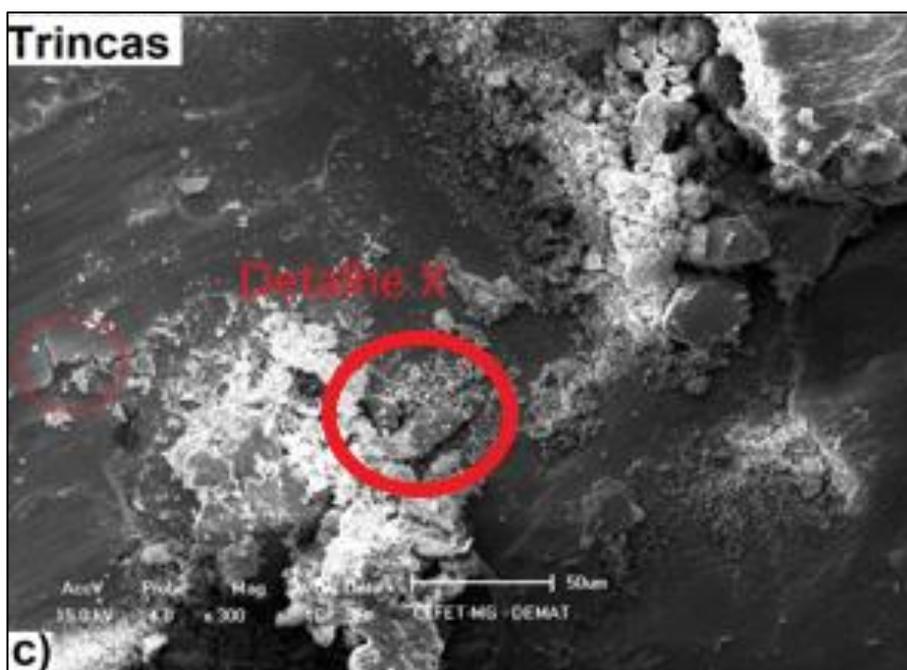
Na figura 51 (b), nota-se que há debris aprisionados na superfície de deslizamento e nas figuras 52 (c) e 53 (d), observa-se trincas formadas na superfície da amostra beneficiada.

Figura 51 – Debris na superfície da trilha de desgaste do material beneficiado.



Fonte: Próprio autor

Figura 52 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material beneficiado.



Fonte: Próprio autor

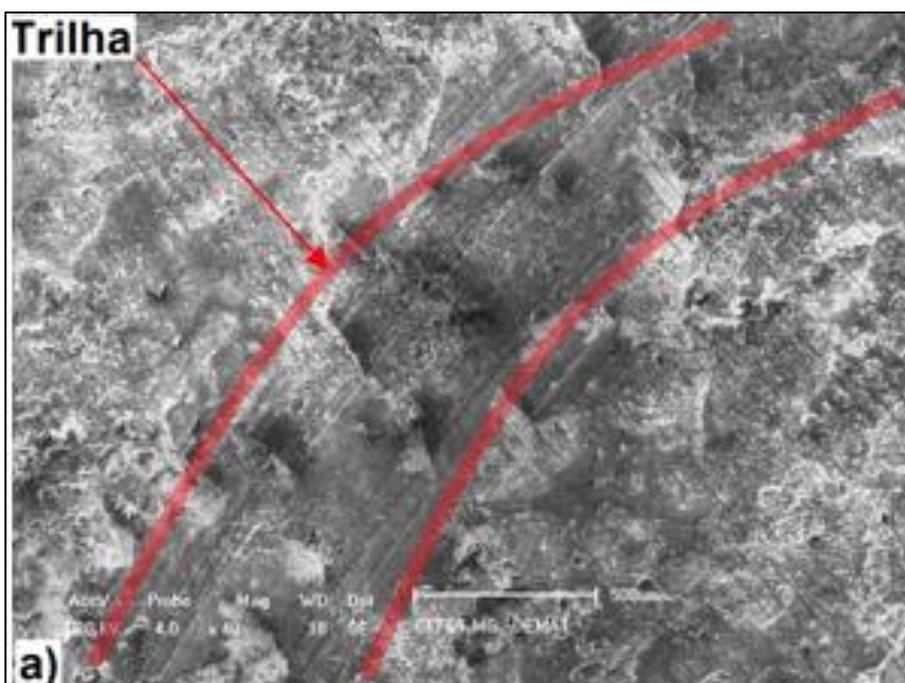
Figura 53 – Detalhe da superfície com trincas do material beneficiado.



Fonte: Próprio autor

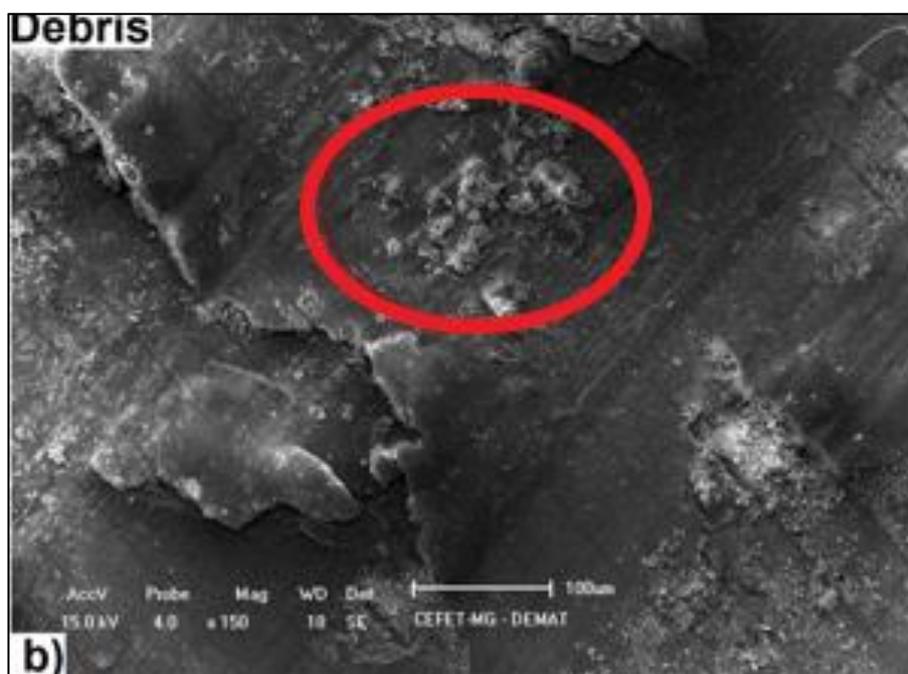
Na figura 54 (a), é indicado o sentido da trilha de desgaste da amostra esferoidizada e nitretada com cobre. Enquanto que da figura 55 (b) até a figura 57 (d) é possível observar debris e trincas na superfície desgastada.

Figura 54 – Trilha de desgaste esferoidizado / cobre.



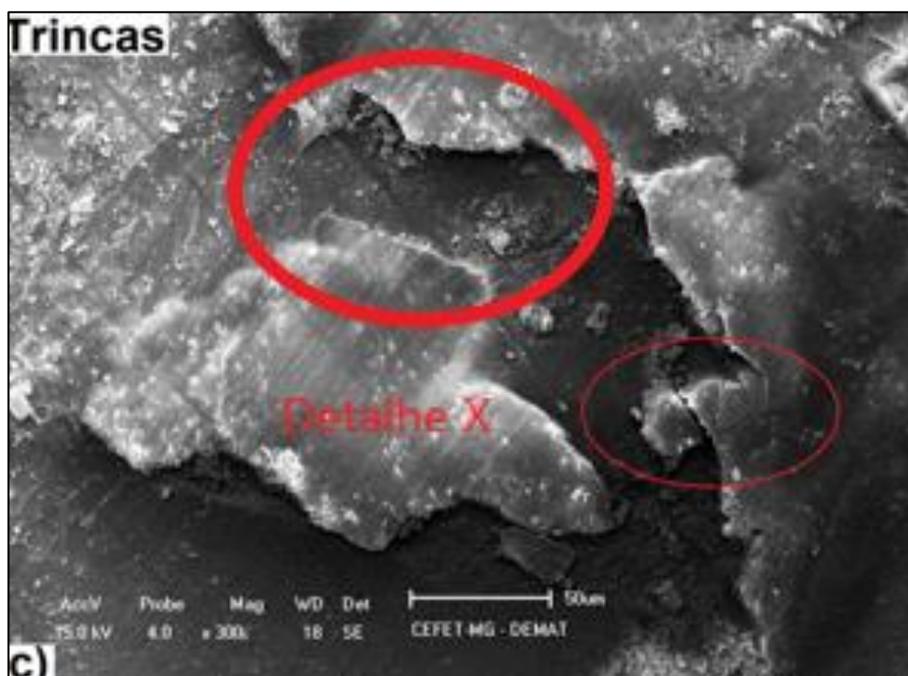
Fonte: Próprio autor

Figura 55 – Debris na superfície do material esferoidizado / cobre.



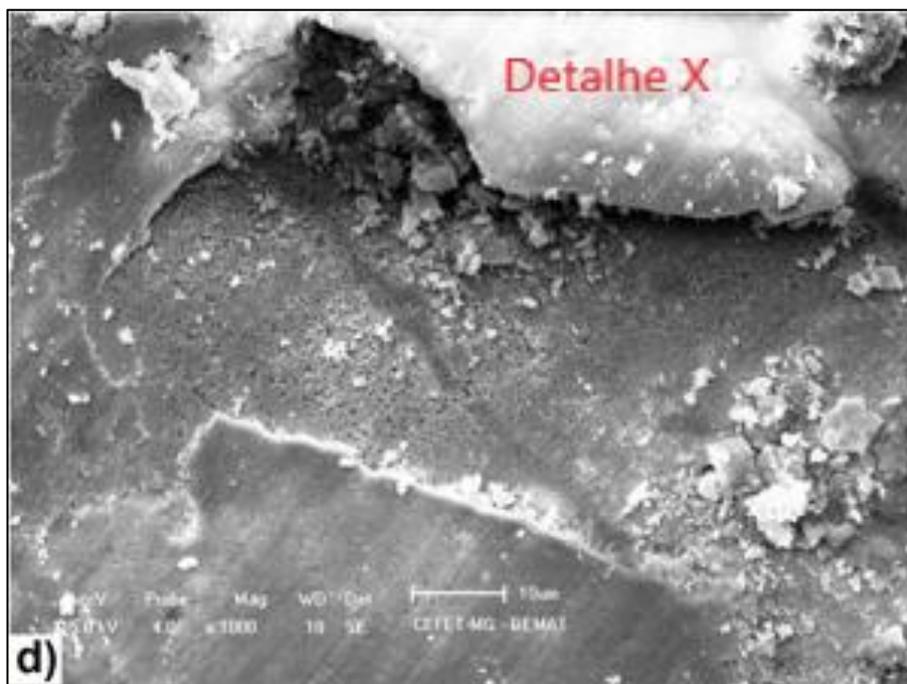
Fonte: Próprio autor

Figura 56 – Trincas na superfície do material esferoidizado / cobre.



Fonte: Próprio autor

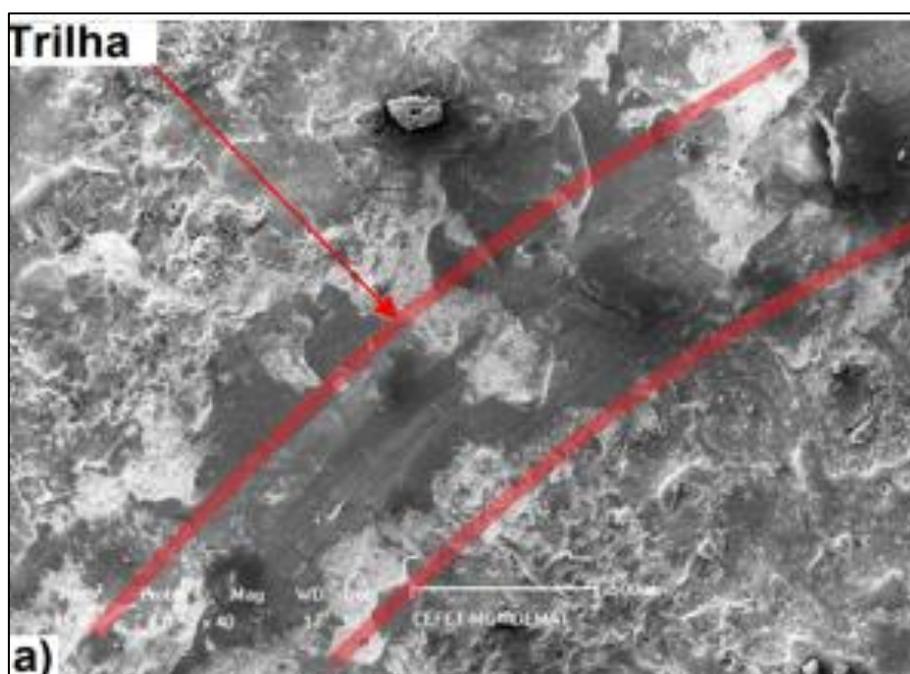
Figura 57 – Detalhe da superfície com trincas do material esferoidizado / cobre.



Fonte: Próprio autor

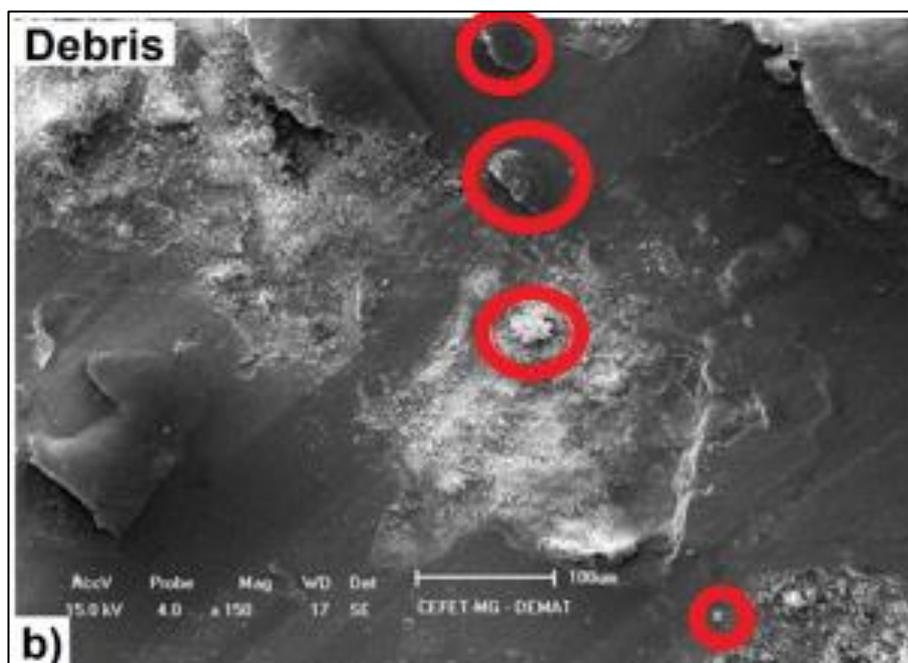
Na figura 58 (a), observa-se o sentido da trilha de desgaste da amostra esferoidizada e nitretada com grafita, da figura 59 (b) até a figura 61(d), foi identificada na superfície desgastada a presença de trincas e debris.

Figura 58 – Trilha de desgaste esferoidizado / grafita.



Fonte: Próprio autor

Figura 59 – Debris na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado / grafita.



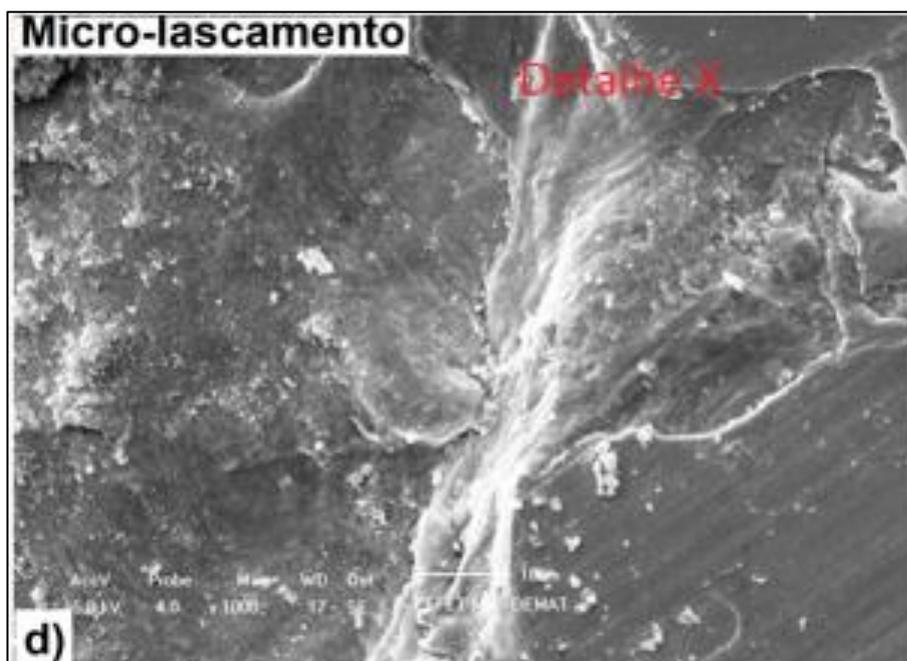
Fonte: Próprio autor

Figura 60 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material esferoidizado / grafita.



Fonte: Próprio autor

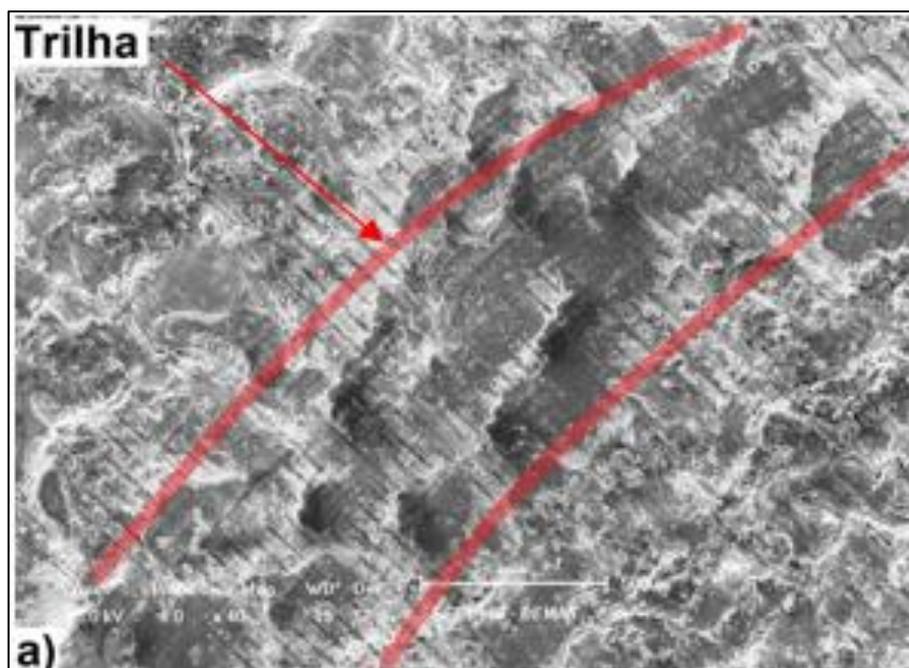
Figura 61 – Detalhe da superfície com trincas do material esferoidizado / grafita.



Fonte: Próprio autor

A figura 62(a) possui a indicação do sentido da trilha de desgaste da amostra beneficiada e nitretada com cobre. Observa-se a presença de riscos perpendiculares ao sentido da trilha de desgaste que é atribuído ao contra-corpo utilizado.

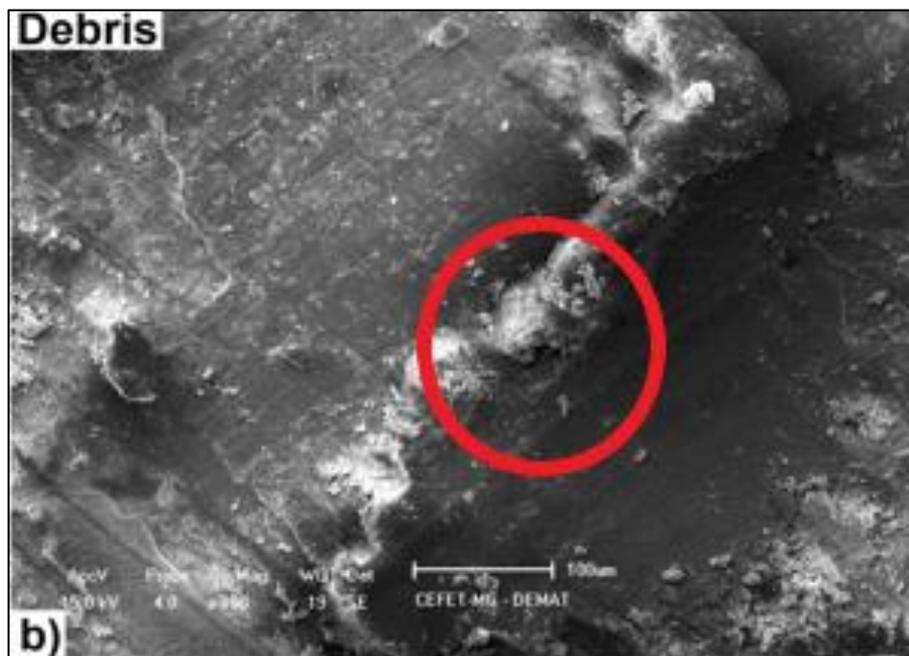
Figura 62 – Trilha de desgaste do material beneficiado / cobre.



Fonte: Próprio autor

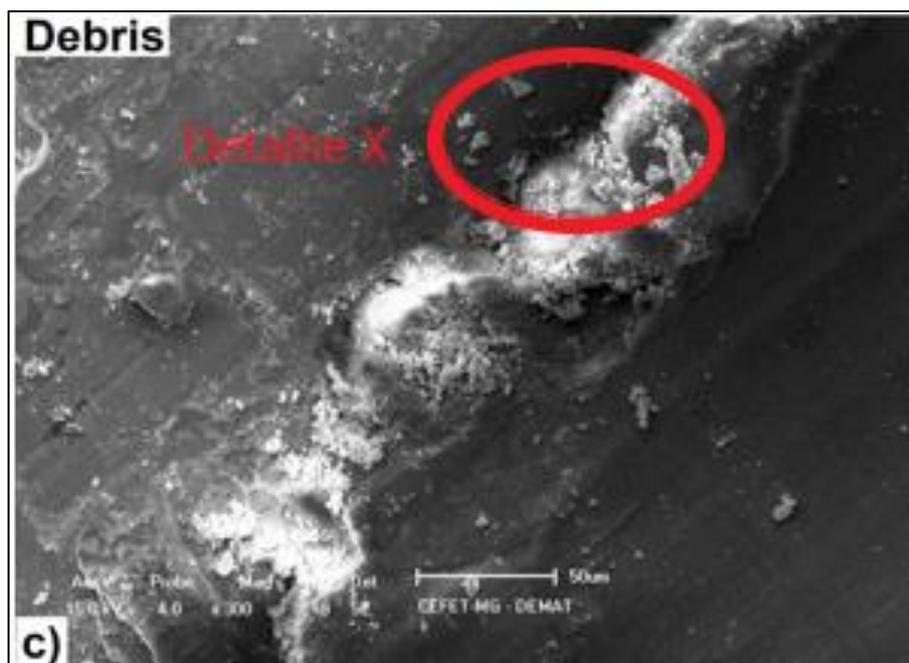
Na figura 63 (b) mostra que há presença de debris aprisionados na superfície de deslizamento e com mais detalhes, da figura 64 até a figura 65, nota-se a presença de trincas.

Figura 63 – Debris na superfície da trilha do material beneficiado / cobre.



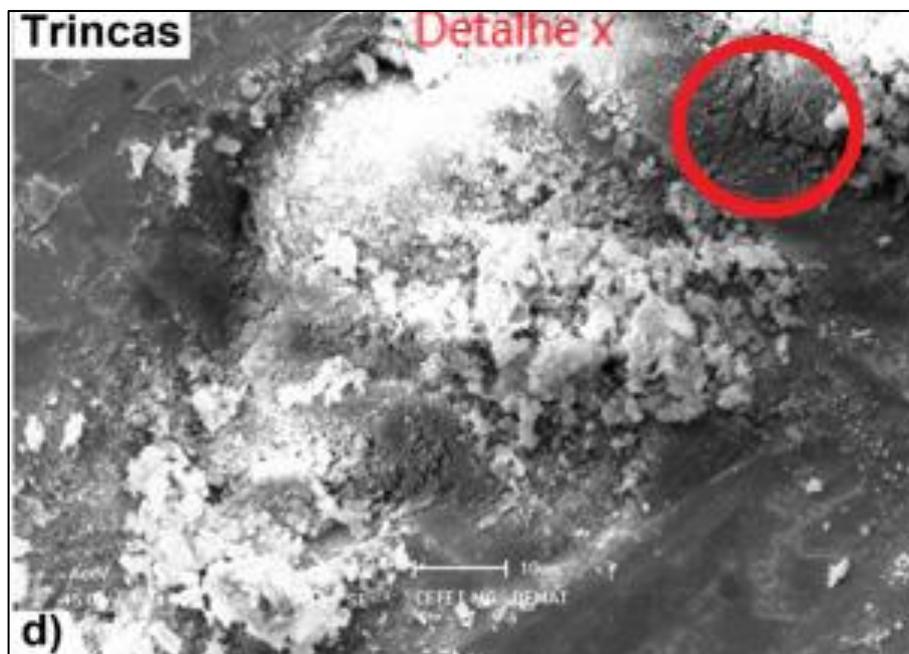
Fonte: Próprio autor

Figura 64 – Trincas na superfície da trilha do material beneficiado / cobre.



Fonte: Próprio autor

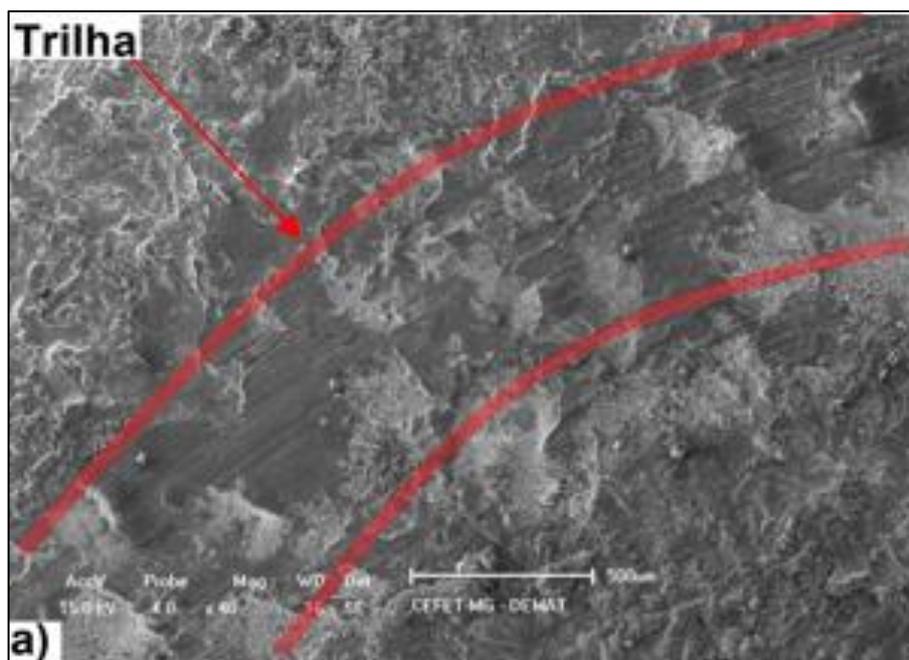
Figura 65 – Detalhe da superfície com trincas do material beneficiado / cobre.



Fonte: Próprio autor

Na figura 66 (a) possui a indicação do sentido da trilha de desgaste da amostra esferoidizada e nitretada com grafita.

Figura 66 – Trilha de desgaste beneficiado / grafita.



Fonte: Próprio autor

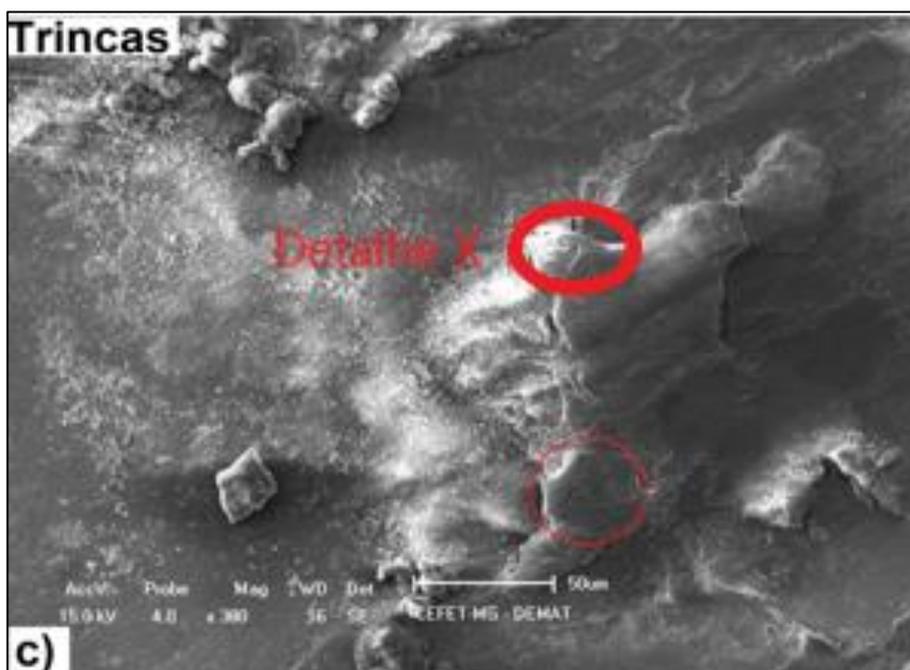
Na figura 67 (b), observa-se a presença de material na forma de debris aprisionado na superfície, e na figura 68 (c) a presença de trincas.

Figura 67 – Debris na superfície da trilha do material beneficiado / grafita.



Fonte: Próprio autor

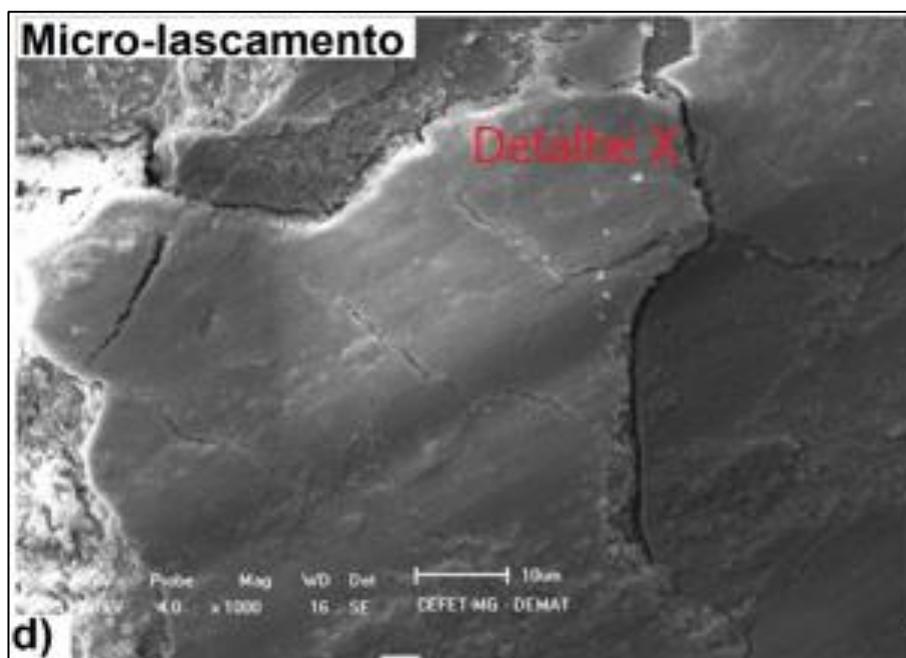
Figura 68 – Trincas na superfície da trilha do material beneficiado / grafita.



Fonte: Próprio autor

No detalhe da figura 69 (d), observa-se comportamento frágil do material, pois foi identificado o micromecanismo de lascamento.

Figura 69 – Trincas na superfície da trilha de desgaste do material beneficiado / grafita.



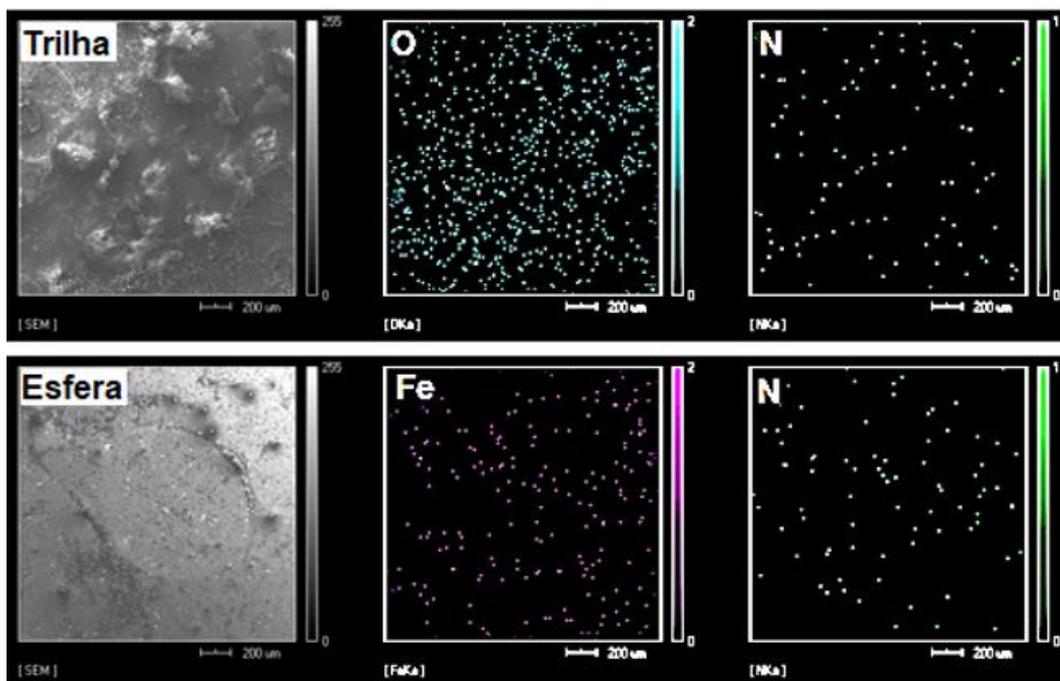
Fonte: Próprio autor.

As trilhas de desgastes geradas para todas as condições revelam características de desgaste abrasivo, pois as superfícies apresentam-se com sulcos na direção do movimento da esfera e em alguns casos com riscos em direção perpendicular ao movimento da esfera, explicado pelo desgaste da esfera que também funciona como uma aspereza, os riscos perpendiculares são vistos nas amostras esferoidizada e beneficiada, ambas nitretadas com cobre. Além dos mais, apresentam debris aprisionados e trincas sobre a superfície, destacando-se o micromecanismo de lascamento que é comum em materiais frágeis, mostrado na figura 61(d) e figura 69(d). É de conhecimento que o processo NDE promove a formação de uma a ressolidificação de material, conhecido como zona refundida, devido ao resfriamento brusco, o que contribui com os mecanismos observados em materiais frágeis (SANTOS, 2013, RABINOWICZ, 1995).

Como as imagens apresentadas reforçam indícios de outros mecanismos de desgaste, realizaram-se mapeamentos por Espectrometria de Energia Dispersiva de Raio-X (*Energy Dispersive Spectroscopy* - EDS) nas trilhas de desgastes e nas

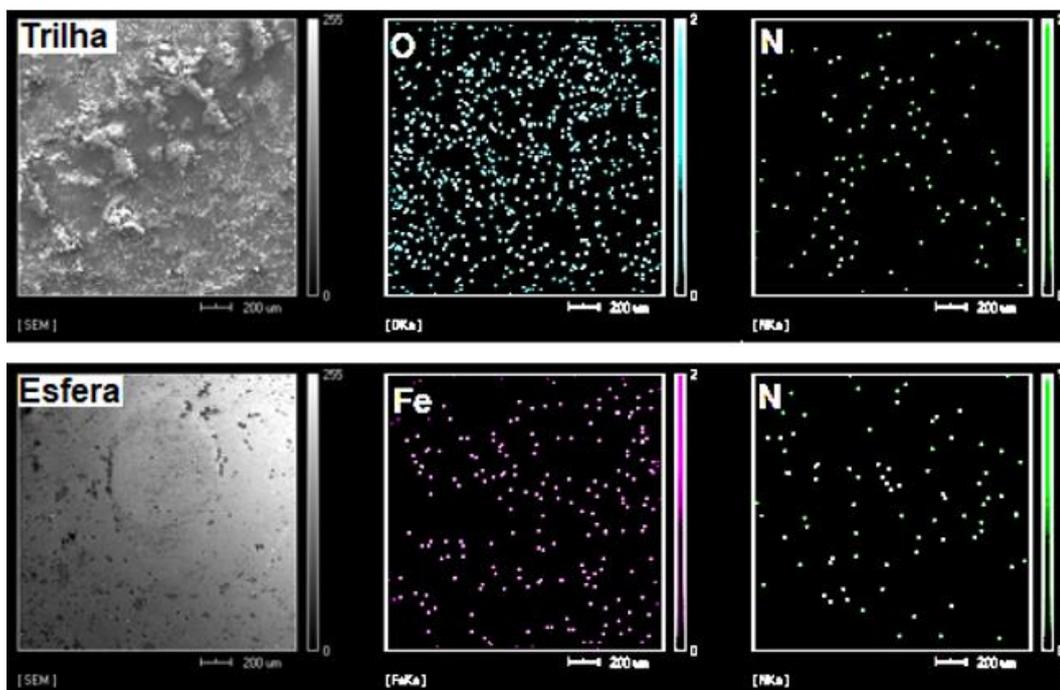
esferas após o ensaio de desgaste por deslizamento. Os mapeamentos são apresentados da figura 70 até a figura 75.

Figura 70 – Mapeamento EDS do eletrodo peça esferoidizado sem NDE.



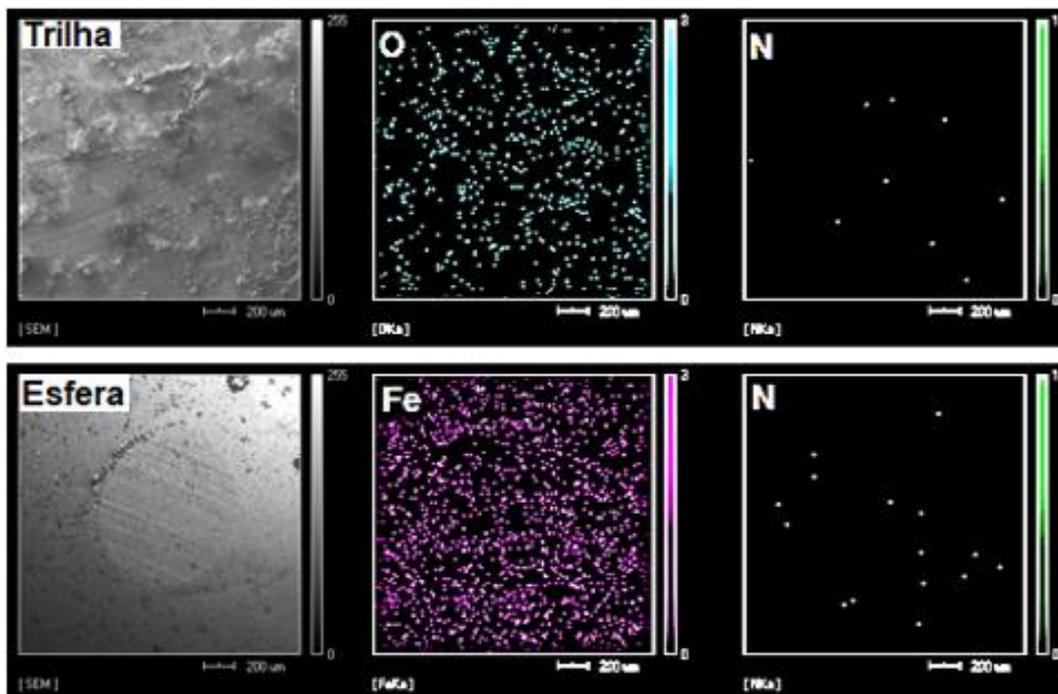
Fonte: Próprio autor

Figura 71 - Mapeamento EDS do eletrodo peça beneficiado sem NDE.



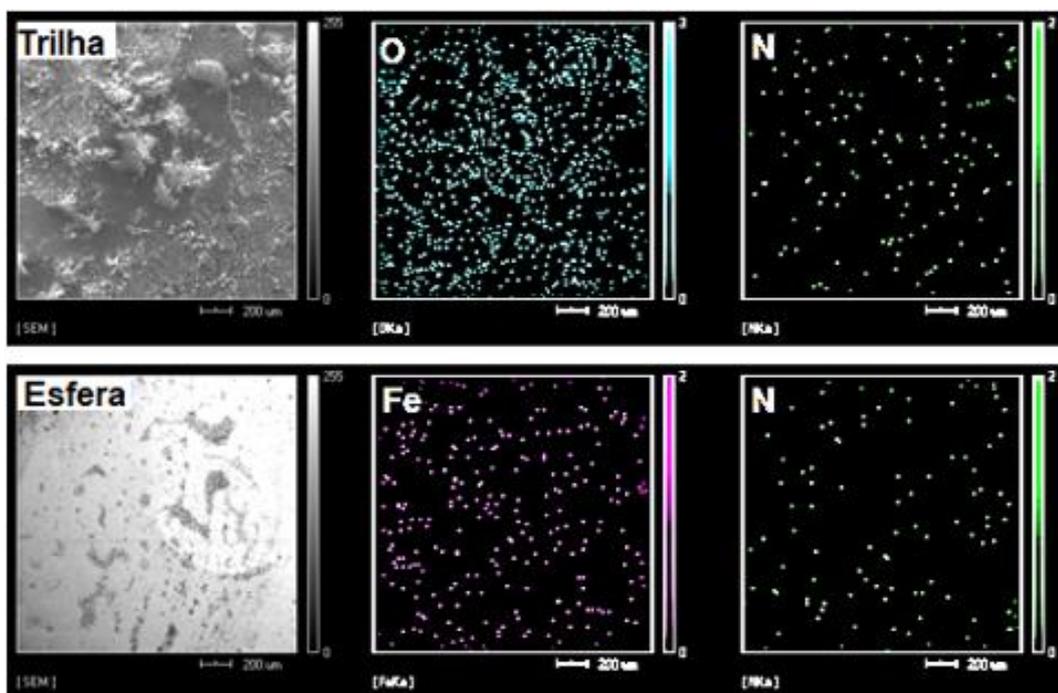
Fonte: Próprio autor

Figura 72 - Mapeamento EDS do eletrodo esferoidizado / cobre.



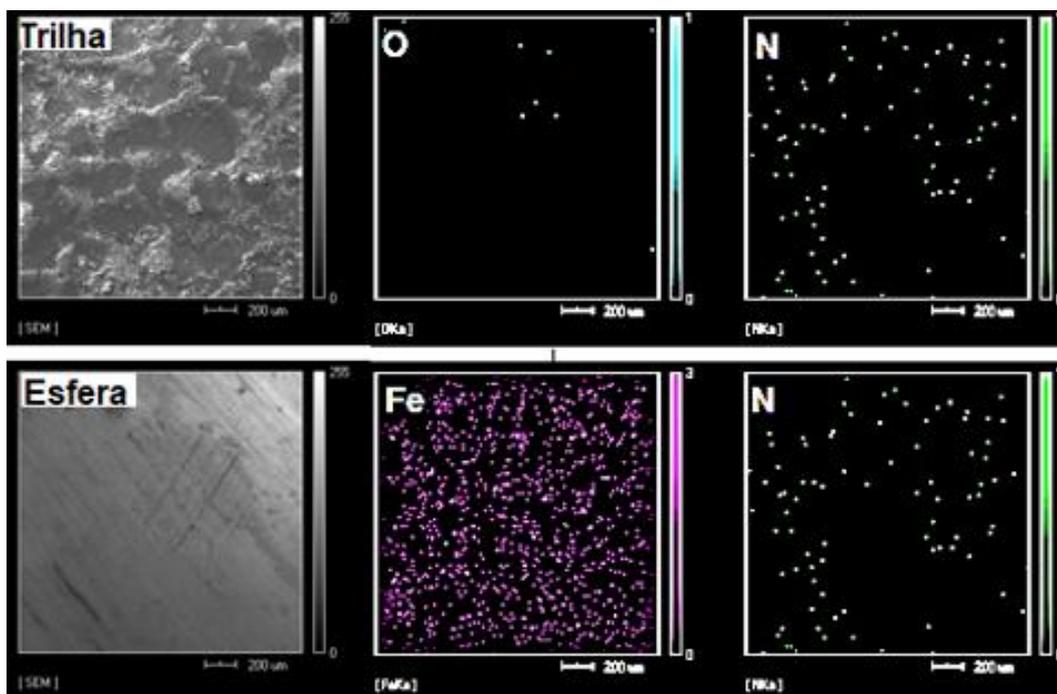
Fonte: Próprio autor

Figura 73 - Mapeamento EDS do eletrodo esferoidizado / grafita.



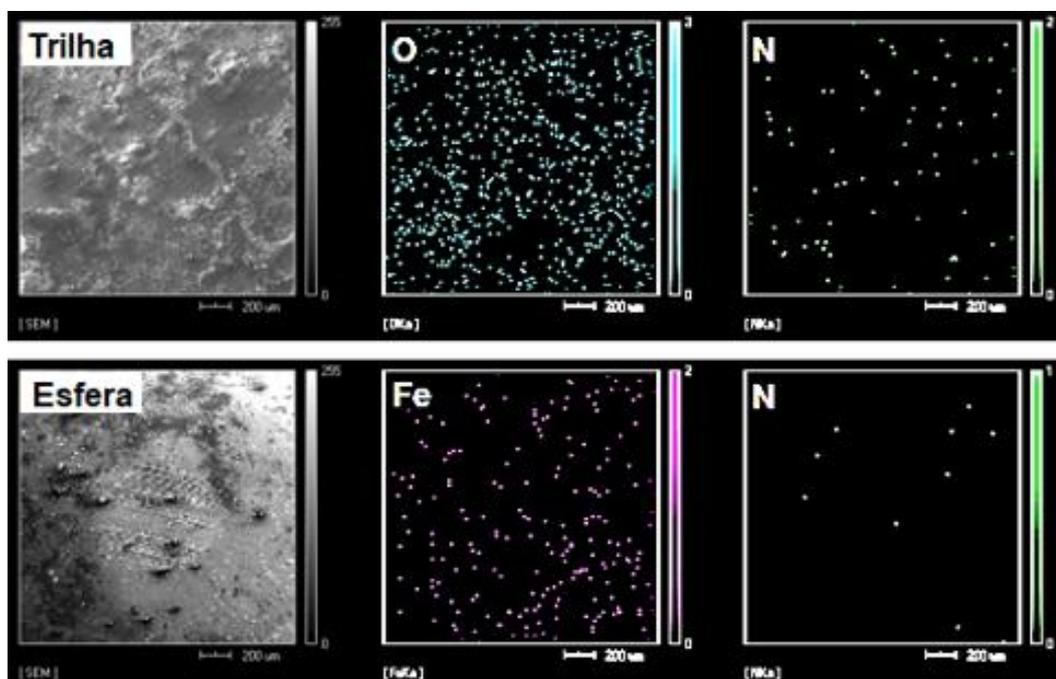
Fonte: Próprio autor

Figura 74 - Mapeamento EDS do eletrodo beneficiado / cobre.



Fonte: Próprio autor

Figura 75 - Mapeamento EDS do eletrodo beneficiado / grafita.



Fonte: Próprio autor

Os mapeamentos por EDS revelaram que houve transferência de metal na superfície dos eletrodos peças para a superfície de contato das esferas de WC/Co, para todos os casos, confirmado pela presença dos elementos Nitrogênio (N) e ferro

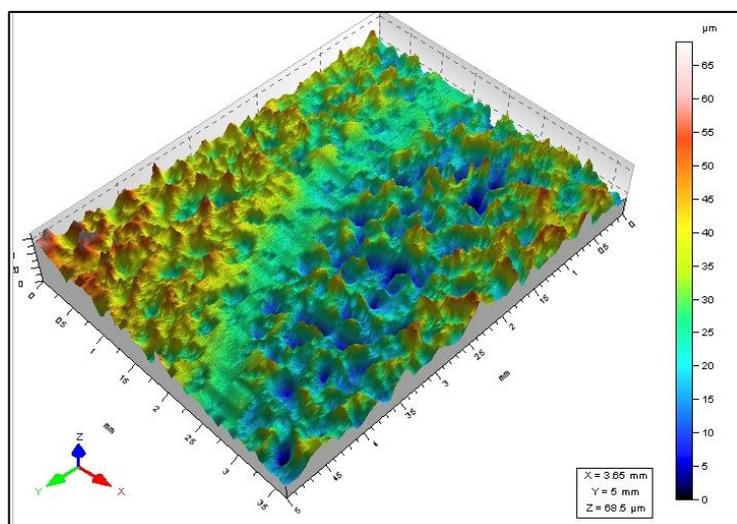
(Fe), o que confirma a hipótese do mecanismo de desgaste adesivo. Há também diferenças significativas quanto a quantidade de pontos dos elementos analisados na superfície dos eletrodos peças, destacam-se os eletrodos peças esferoidizado/nitretado com cobre e beneficiado/nitretado com grafita, que possuem menos nitrogênio na superfície do contra corpo (esfera) em relação aos outros eletrodos, do mesmo modo o eletrodo beneficiado /nitretado grafita é possível observar que a superfície da trilha não ficou muito oxidada, pois há menos pontos com o elemento oxigênio, observa-se também nesse mesmo eletrodo que o contra-corpo possui uma grande quantidade do elemento ferro na superfície.

A presença de vários pontos com oxigênio (O) na superfície dos eletrodos peças e também confirmado pela difração de raio-x, picos de óxido de ferro, demonstra que também houve o mecanismo de desgaste oxidativo.

#### 4.5.2 Perfilometria

Por meio das análises das imagens geradas no ensaio de perfilometria, foi possível estimar a profundidade média do desgaste ocorrido, bem como a largura da trilha gerada, para as curvas totais e parciais do ensaio pino sobre disco. A figura 76 exhibe a superfície de um exemplo de uma trilha e a figura 77 o perfil da trilha em duas dimensões, as medidas realizadas estão na tabela 13 e no gráfico da figura 78.

Figura 76 – Perfil 3D da trilha do ensaio pino sobre disco.



Fonte: Próprio autor

Figura 77 – Perfil 2D da superfície da trilha desgastada.



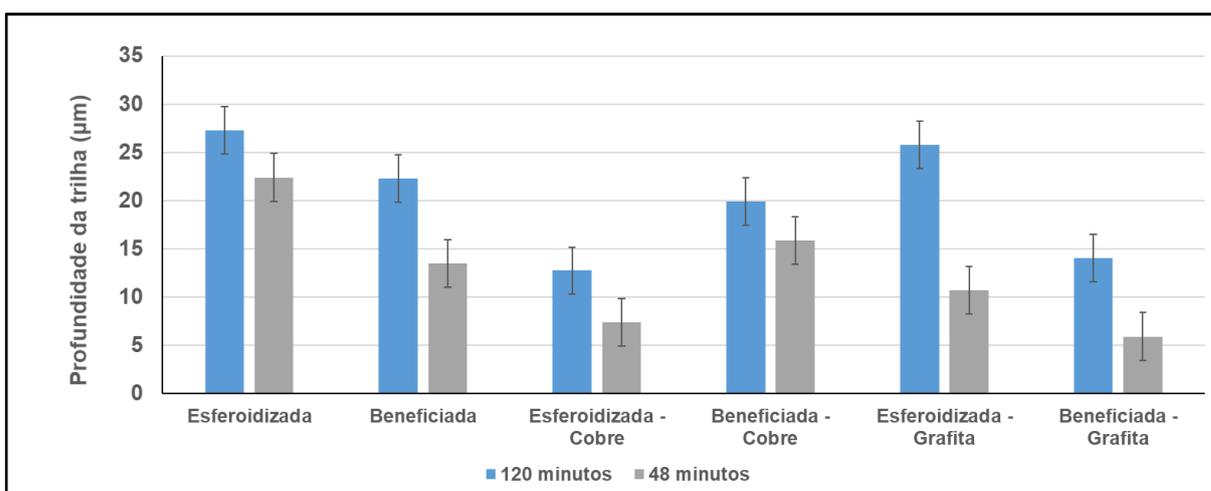
Fonte: Próprio autor

Tabela 13 - Valores coletados da análise da perfilometria.

Eletrodo peça / Eletrodo ferramenta	120 minutos		48 minutos	
	Profundidade	Largura	Profundidade	Largura
<b>Esferoidizada</b>	27,3 ± 5,9	1,2 ± 0,1	22,4 ± 3,4	1,2 ± 0,1
<b>Beneficiada</b>	22,3 ± 5,6	2,5 ± 0,0	13,5 ± 2,4	1,0 ± 0,1
<b>Esferoidizada - Cobre</b>	12,8 ± 3,3	0,7 ± 0,2	7,4 ± 1,1	1,0 ± 0,1
<b>Beneficiada - Cobre</b>	19,9 ± 2,0	1,0 ± 0,1	15,9 ± 3,6	1,2 ± 0,1
<b>Esferoidizada - Grafita</b>	25,8 ± 6,0	0,9 ± 0,2	10,7 ± 2,7	1,1 ± 0,2
<b>Beneficiada - Grafita</b>	14,1 ± 2,3	1,0 ± 0,1	5,9 ± 1,3	0,8 ± 0,1

Fonte: Próprio autor

Figura 78 – Comparação da profundidade das trilhas.

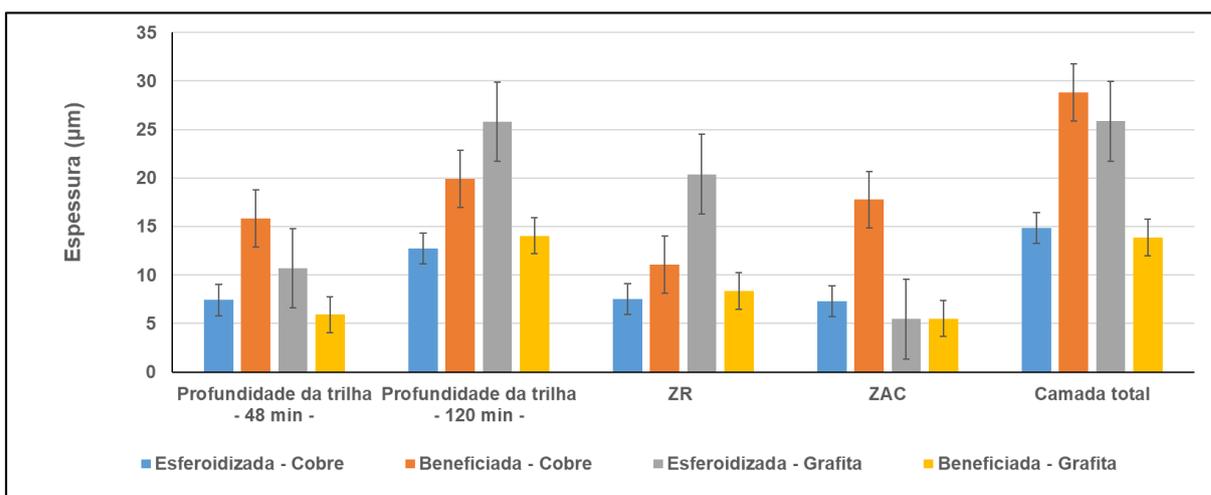


Fonte: Próprio autor

Os resultados demonstram que as amostras esferoidizada / nitretada com cobre e beneficiada / nitretada com grafita, apresentaram menores profundidades nas trilhas de 120 min e nas parciais de 48 min. Pelos valores apresentados na tabela 14, tem-se que as trilhas das amostras esferoidizadas, beneficiada e esferoidizada/nitretada com grafita, apresentaram profundidades maiores que as demais para o teste total. Considerando o teste parcial, observou-se que a esferoidizada continua com a maior profundidade e que a amostra beneficiada/ cobre apresentou a segunda maior profundidade. O comportamento é explicado com os valores apresentados no tópico de microdureza, pois no teste parcial a amostra beneficiada/ cobre não atingiu a matriz beneficiada que possui o maior valor de dureza.

A figura 79 apresenta a comparação entre as profundidades das trilhas com a espessura das camadas medidas por microscopia óptica.

Figura 79 – Comparação da profundidade das trilhas com a camada nitretada.



Fonte: Próprio autor

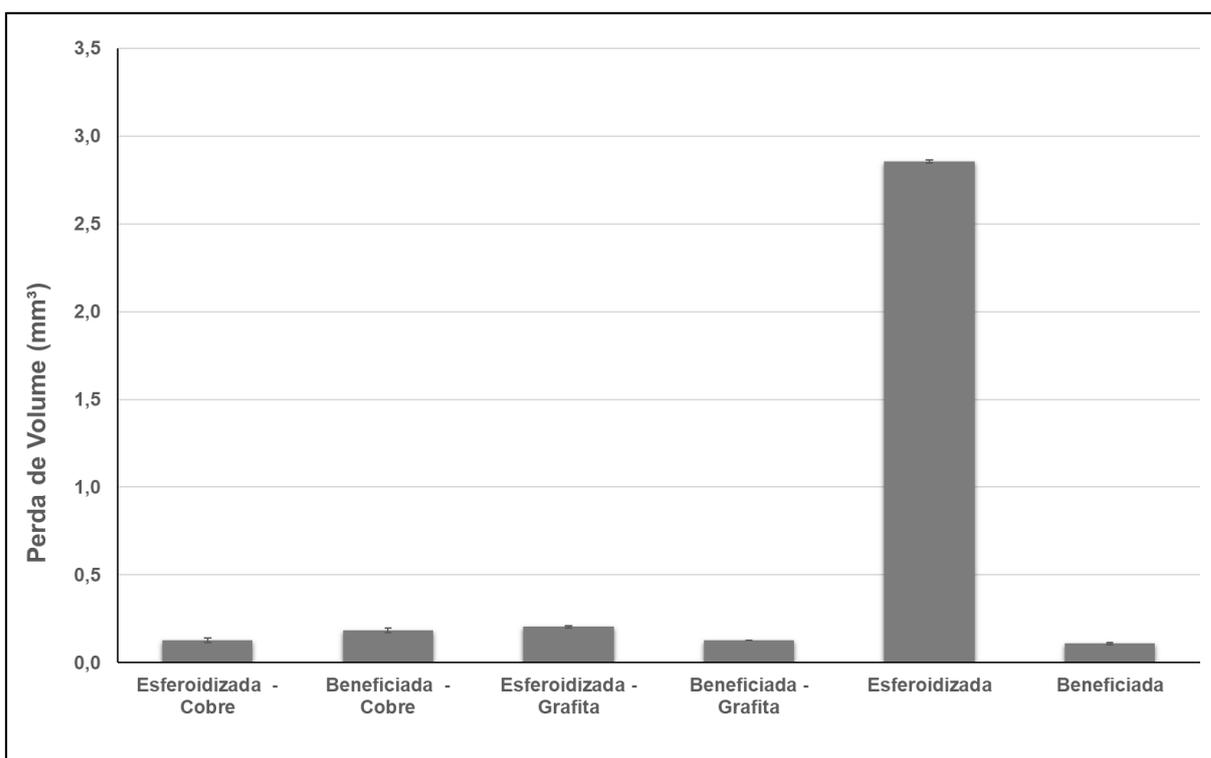
A partir da análise das curvas de 120 min, foi possível perceber que somente a amostra beneficiada e nitretada com cobre não atingiu a transição da ZAC com a matriz (Camada Total). As outras amostras, permaneceram no material da matriz.

Para o teste parcial de 48 min, com exceção da amostra esferoidizada e nitretada com grafita, as demais amostras, permaneceram entre as camadas ZR e ZAC. É importante ressaltar que somente em alguns pontos podem ter acontecido tais fenômenos, pois as análises baseiam-se em médias com desvios consideráveis e as camadas não são uniformes.

### 4.5.3 Taxa de desgaste

Os valores medidos da massa das amostras e esferas antes e após o ensaio de desgaste serviram para a comparação das taxas de desgaste das amostras e esferas usadas como contra corpo, como mostram a figura 80 e 81.

Figura 80 - Gráfico da taxa de desgaste das amostras.

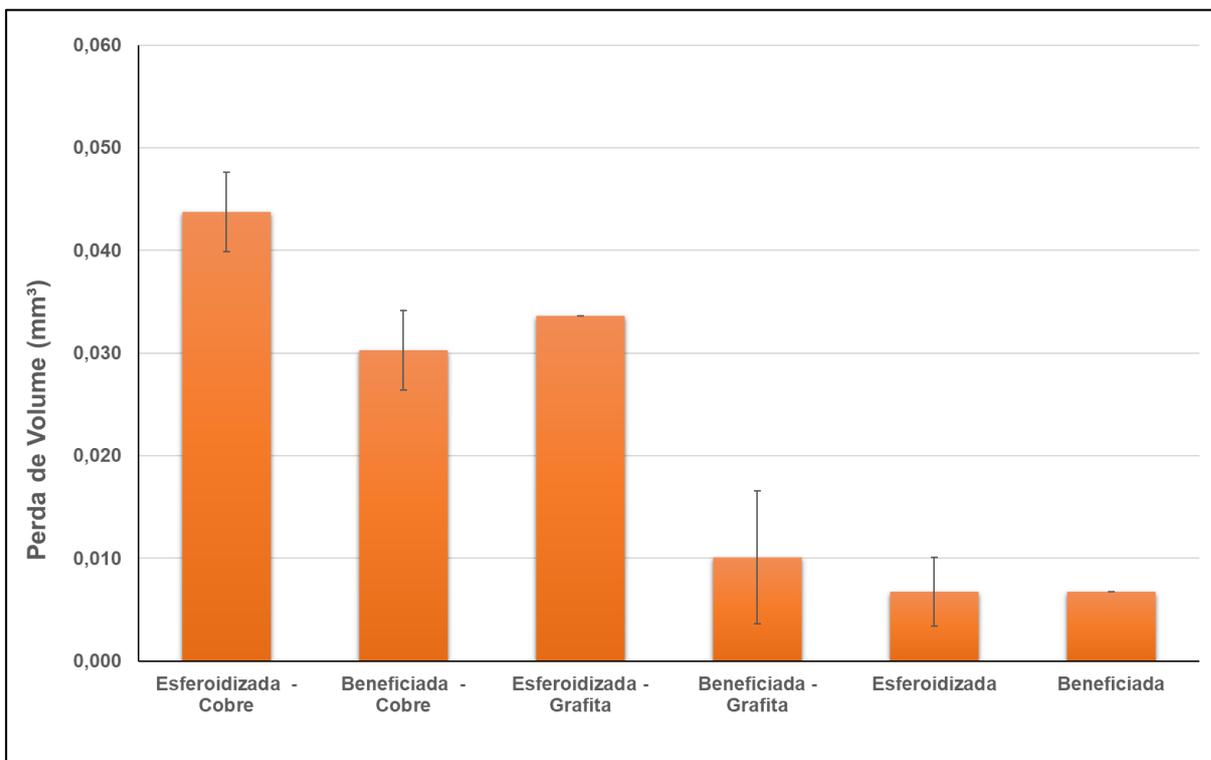


Fonte: Próprio autor.

Nas figuras 80 e 81, observou-se a severidade do desgaste dos eletrodos peças por meio da perda de volume ( $\text{mm}^3$ ); o eletrodo somente esferoidizado, apresentou perda de, aproximadamente, 2591% de volume em relação ao eletrodo peça somente beneficiado, que possui um dos menores valores de perda volumétrica.

Na figura 81, observou-se que a esfera que atuou como contra corpo do par tribológico do eletrodo somente esferoidizado, apresenta a menor perda volumétrica. Nota-se que apresenta perda volumétrica aproximada de 16% em relação ao maior valor que foi a da esfera que atuou como contra corpo do eletrodo esferoidizado /cobre.

Figura 81 - Gráfico da taxa de desgaste das esferas.



Fonte: Próprio autor.

Comparando-se a dureza das amostras, observou-se que a dureza da esfera de WC/Co é aproximadamente 2100 HV e do eletrodo esferoidizado de  $(324,0 \pm 14,3)$  HV, ou seja, tem-se um valor 6,5 vezes maior. Já o eletrodo beneficiado com dureza de  $(813,0 \pm 8,4)$  HV apresenta uma diferença de, aproximadamente, 2,6 vezes maior.

Os eletrodos peças esferoidizado-cobre de dureza de  $(734,0 \pm 9,5)$  HV e beneficiado-grafita de dureza  $(873,5 \pm 8,7)$  HV apresentaram perdas volumétricas semelhantes ao eletrodo beneficiado de dureza  $(813,0 \pm 8,4)$  HV, podendo ser associado ao aumento da resistência ao desgaste devido à formação de nitretos na superfície dos respectivos eletrodos, como confirmado pela difração de raios-x. Por outro lado, o efeito da microestrutura na região da zona refundida (ZR) e da zona afetada pelo calor (ZAC) pode ter contribuído para o aumento da resistência ao desgaste, pois o processo de nitretação por descargas elétricas possui a característica da rápida solidificação na superfície dos eletrodos peças, contribuindo para microestruturas com maior resistência ao desgaste, como a martensita.

Nota-se também na figura 63 que os eletrodos tratados com grafita e cobre apresenta ligeira diferença em relação ao mesmo substrato, o que pode ser atribuído a diferença de condutividade térmica do cobre e da grafita, além do efeito da matriz.

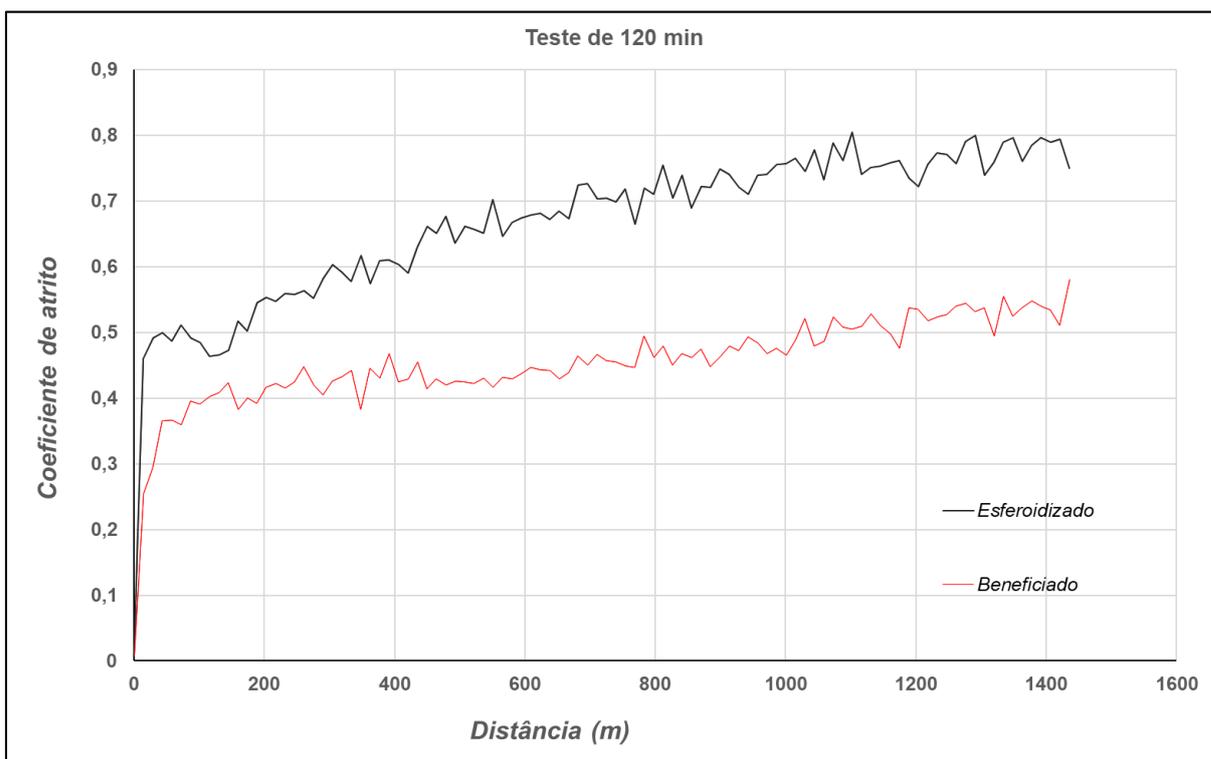
As esferas associadas com eletrodos nitretados e com eletrodos ferramenta de cobre, apresentaram maiores desgastes. A ZAC dos eletrodos peças nitretados com grafita apresentaram também menores valores de dureza em relação aos nitretados com eletrodo de cobre para a mesma matriz.

#### 4.5.4 Curva de coeficiente de atrito x Distância de deslizamento

##### 4.5.4.1 Efeito do tratamento térmico

Para a comparação do efeito do tratamento térmico, foram analisadas as curvas de coeficiente de atrito em função da distância (m), nas condições de esferoidizado e beneficiado, como mostra a figura 82.

Figura 82 – Curva de comparação entre esferoidizado e beneficiado



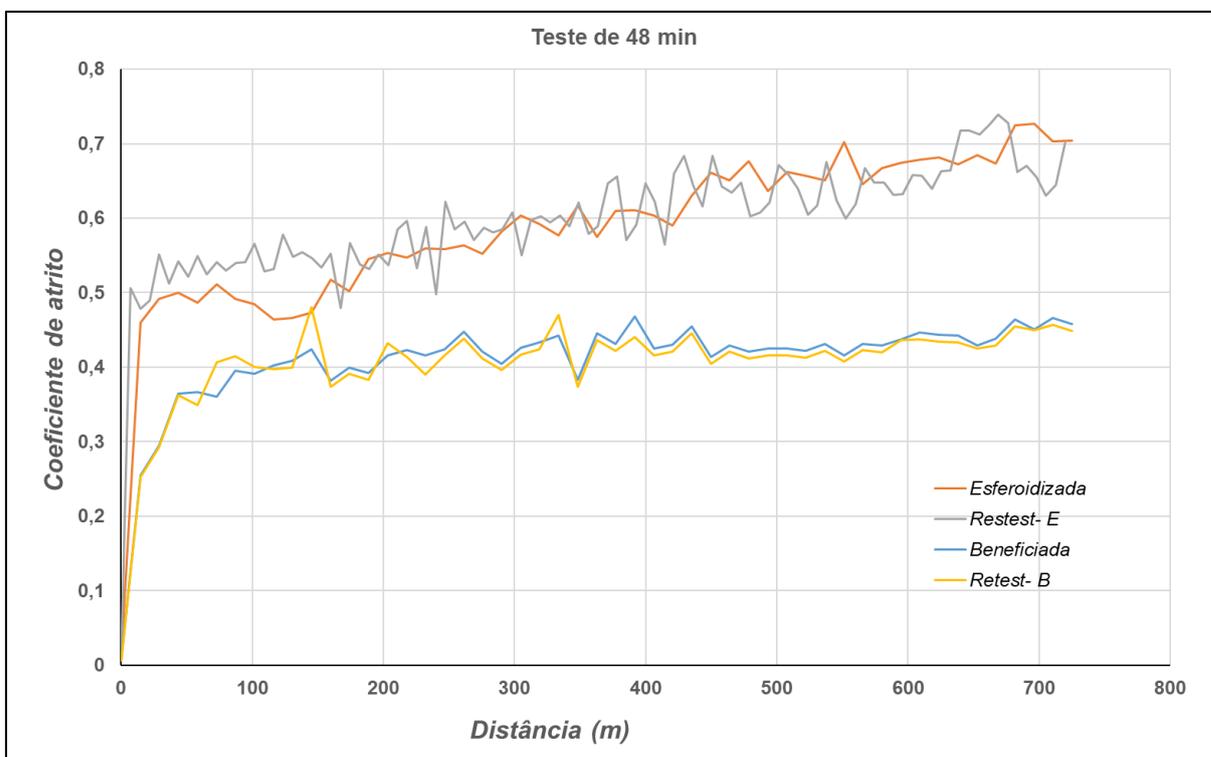
Fonte: Próprio autor.

Comparando a curva do eletrodo esferoidizado com o beneficiado, foi possível observar que o eletrodo beneficiado apresentou menor coeficiente de atrito durante toda distância de deslizamento. Evita-se relacionar a dureza à resistência ao desgaste, pois trata-se de um ensaio quase-estático, mas o beneficiamento do aço

SAE 52100 contribuiu para o aumento da dureza, passando de 324 HV para 813 HV em média. Estudos relacionam a melhoria das propriedades obtidas no tratamento térmico de beneficiamento do aço SAE 52100 com a formação de uma microestrutura refinada composta de martensita revenida e carbonetos, o que contribui para o aumento da resistência ao desgaste por deslizamento sem lubrificação e diminuição do coeficiente de atrito, pois ambos são respostas da microestrutura (BHADESHIA, 2012).

Na figura 83 é apresentada a curva parcial de 48 min com suas respectivas réplicas, mostrando que o processo possui repetibilidade.

Figura 83 – Curva do eletrodo esferoidizado e beneficiado.



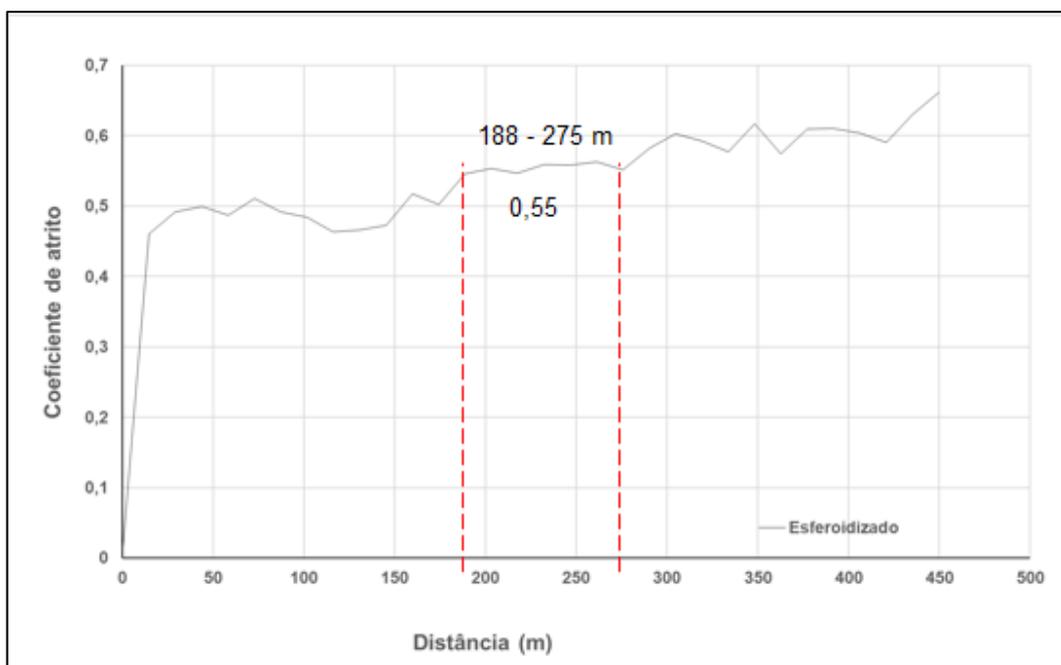
Fonte: Próprio autor.

O regime estacionário tem o início logo após o término do período running-in, e ocorre com uma estabilização do valor médio do coeficiente de atrito em 0,55 e entre as distâncias de 188 – 275 m para o eletrodo esferoidizado, para o eletrodo beneficiado ocorre em 0,42 e entre as distâncias de 449 – 652 m, como mostra a figura 84 e 85.

Conforme a pesquisa de Czichos (1992), entre o período running-in e o início do regime estacionário, ocorre o decréscimo do coeficiente de atrito e este pode ser

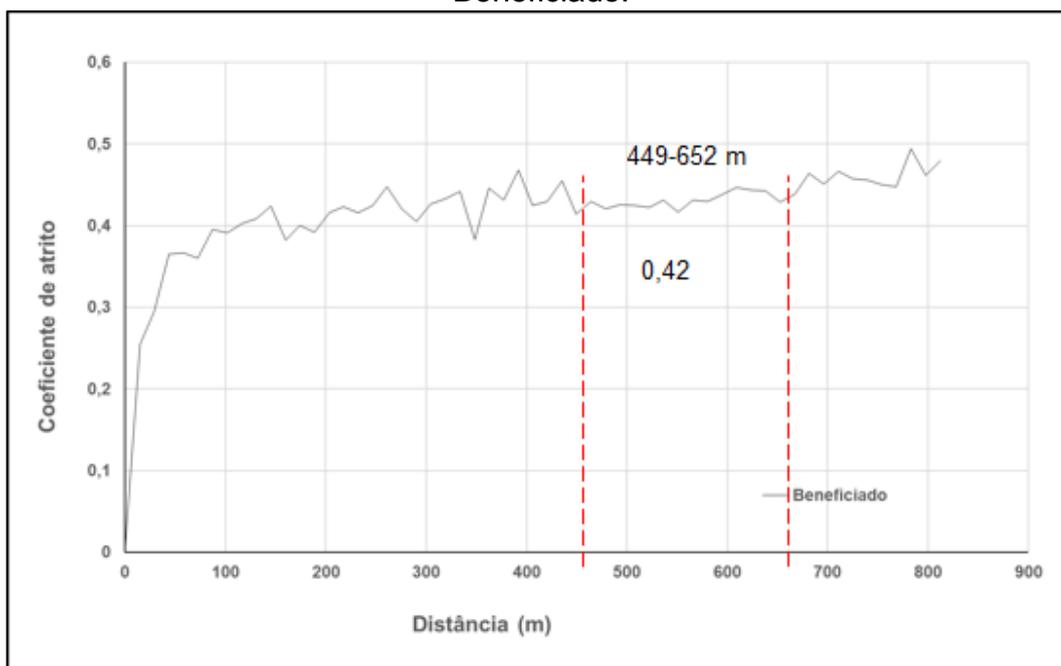
atribuído a uma possível camada triboquímica que protege a superfície ou a diminuição na deformação de asperezas.

Figura 84 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo esferoidizado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 85 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo Beneficiado.



Fonte: Próprio autor.

Viáfara e Sinatora (2012) investigaram a transição do regime de desgaste deslizante sem lubrificação em aços e concluíram que esse processo envolve a ação de dois mecanismos principais de desgaste: adesivo e oxidativo. Contudo, os mecanismos de desgaste em estado estacionário são promovidos por esses mecanismos, onde o desgaste adesivo é considerado severo e o oxidativo é leve em função das taxas de desgaste.

Quando a dureza do metal abaixo da camada de óxido é baixa ou a carga de contato é alta, o metal se deformará plasticamente e as asperezas irão atravessar a fina camada levando ao contato metal-metal. Nesse caso, o desgaste por abrasão ou adesão dependerá das propriedades mecânicas e das propriedades químicas dos metais em contato. O efeito benéfico do óxido é mínimo e a taxa de desgaste é geralmente alta (RABINOWICZ, 1995; VIÁFARA E SINATORA 2012).

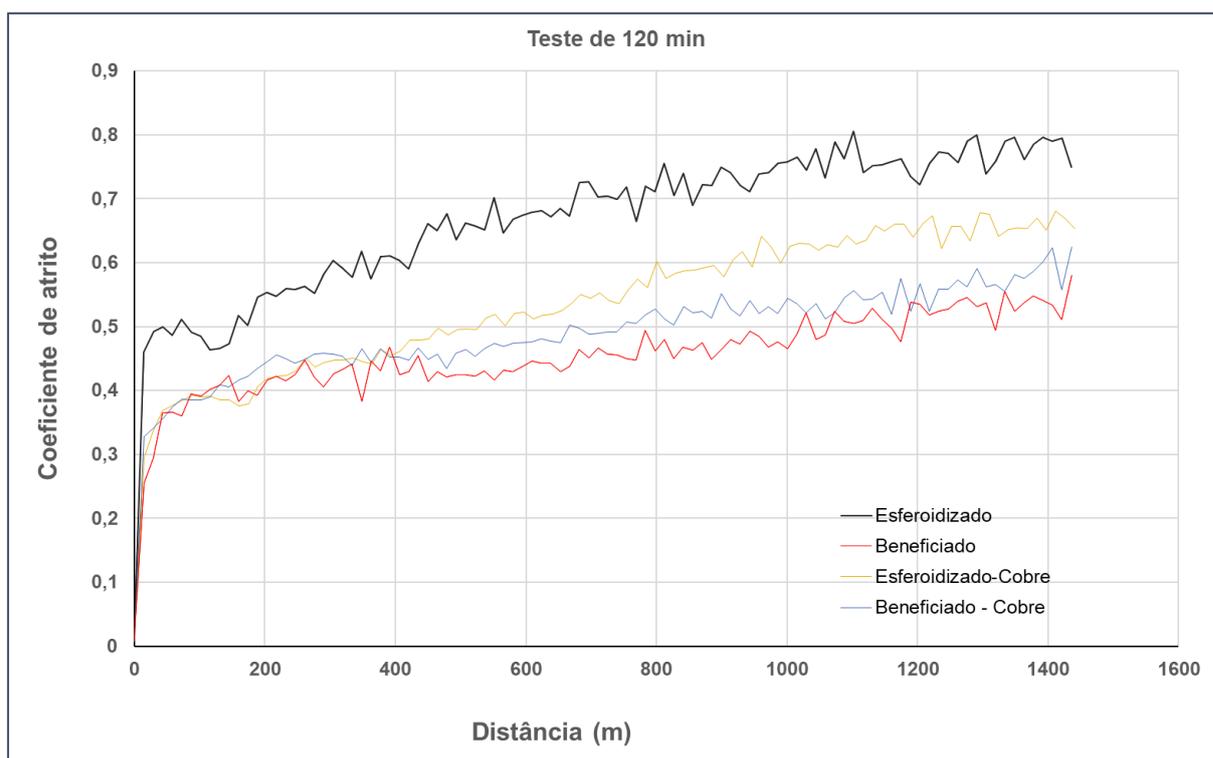
Blau (2009), com base em uma pesquisa da literatura tribológica, no início da década de 1980, discutiu os efeitos dos seguintes processos: transferência de metal, formação e remoção de filmes, geração de detritos e deterioração cíclica da superfície. Dessa forma, mostrou como a redução da força normal desencadeou diferentes processos interfaciais e alterou a forma da curva de fricção em experimentos que envolveram o metal cobre, deslizando-o sem lubrificação sobre o aço 52100 em três testes de anel-em-bloco executados com presença de gás argônio. De acordo com esse estudo, as formas das curvas podem ser produzidas por diferentes conjuntos de processos interfaciais. Com base nisso, a curva do eletrodo peça esferoidizado está relacionada com o desenvolvimento subsequente de uma camada de detritos ou transferência excessiva de material, o que caracteriza sua alta taxa de desgaste inicial até que as asperezas mais afiadas sejam desgastadas e a superfície se torne mais suave. À medida que o eletrodo beneficiado, o formato da curva está relacionado ao desgaste de uma película fina de contaminantes nas superfícies deslizantes.

De fato, os resultados encontrados por Rabinowicz (1995), Viáfara e Sinatora (2012) e Blau (2009) estão em concordância com os resultados de MEV e EDS apresentados no tópico sobre mecanismos de desgaste.

#### 4.5.4.2 Efeito do Eletrodo ferramenta de cobre

Na figura 86, foram inseridas as curvas do ensaio pino sobre disco para as amostras nitretadas com eletrodo ferramenta de cobre, representado na figura 68.

Figura 86 – Efeito da nitretação com eletrodo ferramenta de cobre.

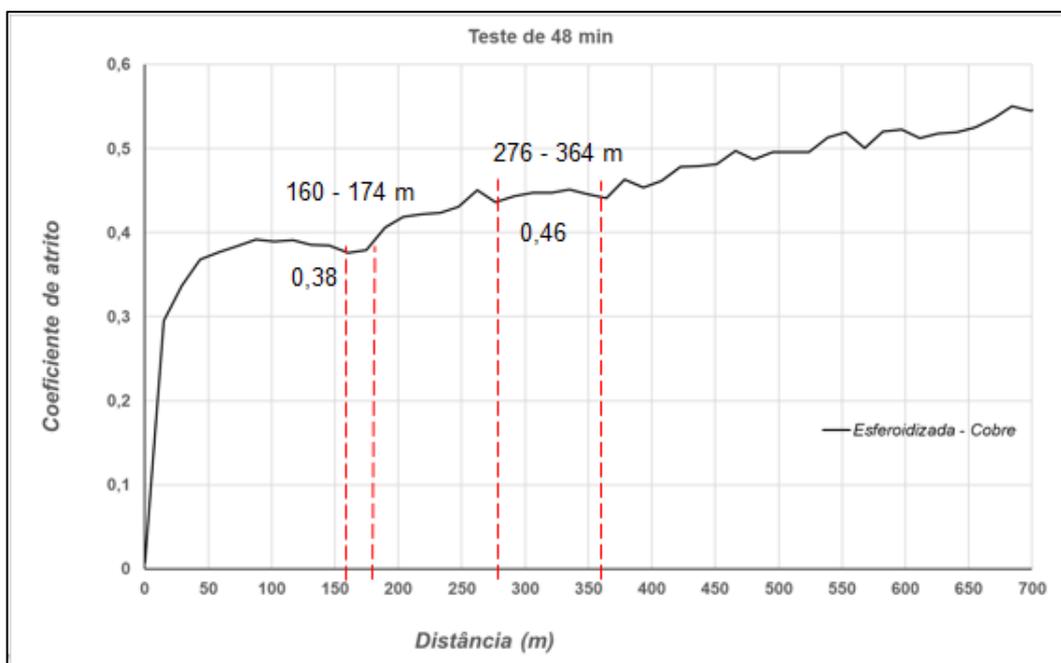


Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que as curvas dos eletrodos peças nitretadas com eletrodo ferramenta de cobre possuem valores intermediários aos limites superior e inferior que são os eletrodos de referência. É interessante observar que o processo NDE atuou de forma a diminuir o coeficiente de atrito na superfície nitretada de ambos os eletrodos peças, pois, no ensaio realizado apresentaram comportamentos semelhantes do coeficiente de atrito aos materiais beneficiados de referência até 400 m. Após esse valor, houve tendência dos eletrodos nitretados aproximarem-se do comportamento de suas matrizes. No processo de nitretação por descargas elétricas, o nitrogênio implantado na superfície aumenta a dureza e induz tensões compressivas da ordem dezenas de microns na superfície de aços para rolamentos, o que contribui para aumento da resistência ao desgaste (JIN et al., 2014).

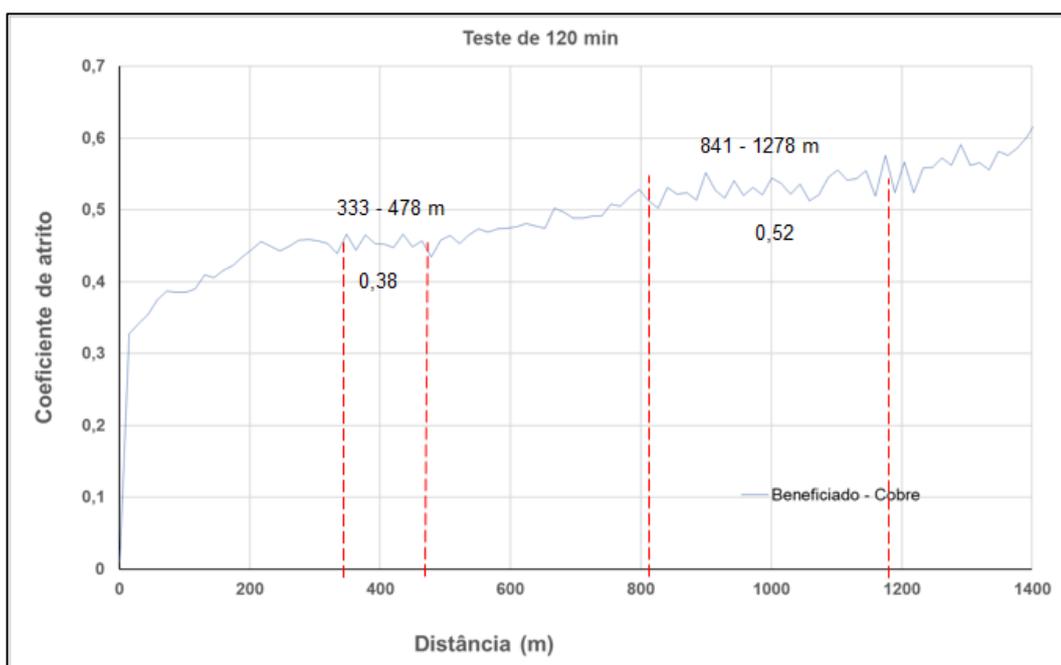
Por causa do efeito de escala no gráfico, as curvas estão detalhadas na figura 87 e 88 para análise dos estágios.

Figura 87 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo esferoidizado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 88 – Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo beneficiado.



Fonte: Próprio autor.

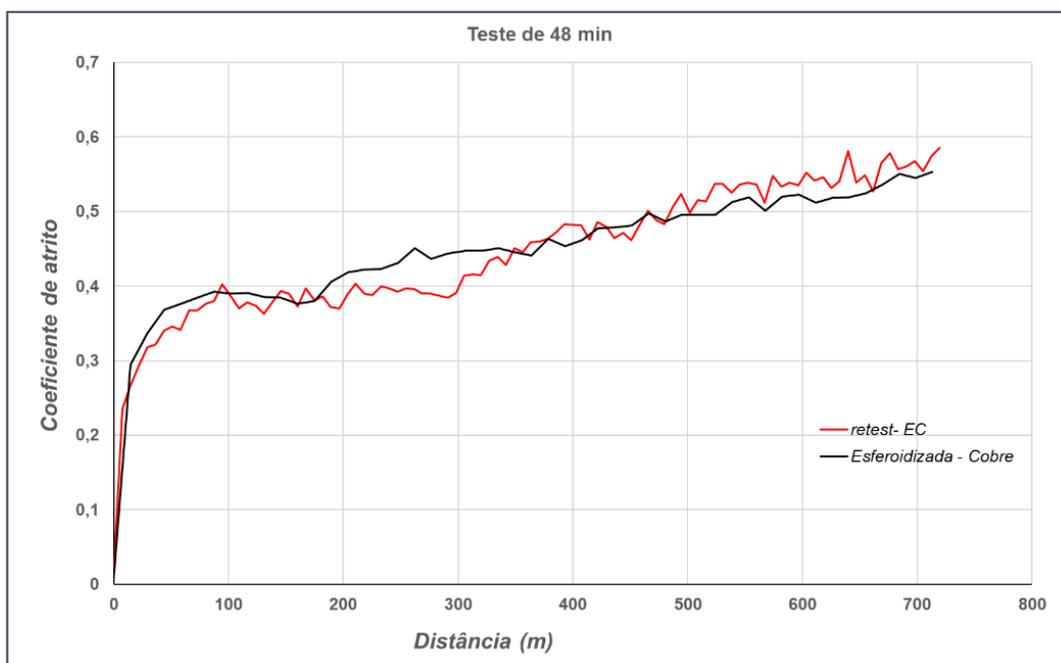
Na figura 87, observa-se que, para o eletrodo esferoidizado e nitretado com cobre, o término do período running-in ocorre por volta de 160 m. Logo após, no primeiro estado estacionário, entre as distâncias de 160 - 174m, com coeficiente de atrito de 0,38, ocorre uma provável transição da camada nitretada para uma camada mais profunda devido ao aumento do coeficiente de atrito até aproximadamente 0,46, com o início do segundo estado estacionário em 276-364m. Na prática, os resultados vistos no tópico de perfilometria, confirmam que houve uma transição da camada ZR-ZAC que pode ter desgastado alguns trechos da trilha, posicionando-se ao final do teste próximo da transição ZAC-Matriz.

Na figura 88, observa-se que o término do running-in ocorre por volta de 333 m. Imediatamente depois, o primeiro estado estacionário acontece/ocorre entre as distâncias de 333-478m, com coeficiente de atrito de 0,38, o coeficiente de atrito aumenta até aproximadamente 0,52, e com o início do segundo estado estacionário entre as distâncias de 841-1278 m. Houve a sinalização de uma transição de camadas entre os dois estados estacionários que foi comprovado por meio da perfilometria que detectou a transição entre a ZR-ZAC.

Conforme os modelos propostos por Blau (2009), ambas as curvas possuem a característica, o desenvolvimento subsequente de uma camada de detritos ou transferência excessiva de material, o que caracteriza alta taxa de desgaste inicial até que as asperezas mais afiadas sejam usadas e a superfície se torne mais suave.

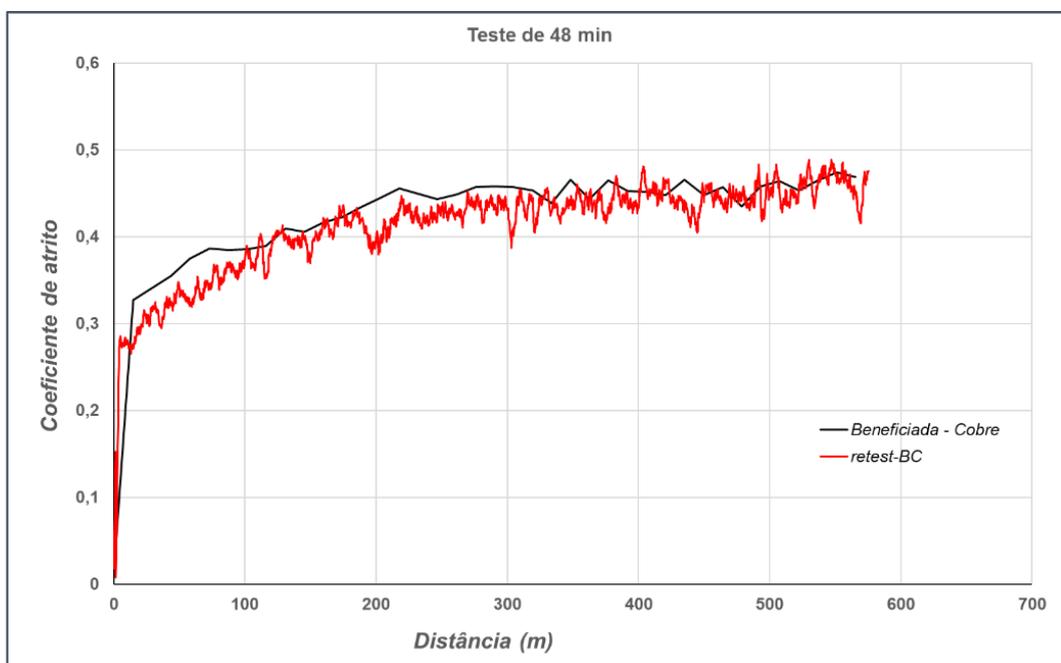
Do mesmo modo, os resultados das análises de MEV e EDS apresentadas no tópico sobre mecanismos de desgaste, comprovam as preposições analisadas. Na figura 89 e 90 estão mostradas as curvas parciais para os eletrodos nitretados com cobre e seus respectivos retestes, provando a repetibilidade para a distância deslizada.

Figura 89 – Curva parcial do eletrodo esferoidizado e nitretado com cobre.



Fonte: Próprio autor.

Figura 90 – Curva parcial do eletrodo beneficiado e nitretado com cobre.

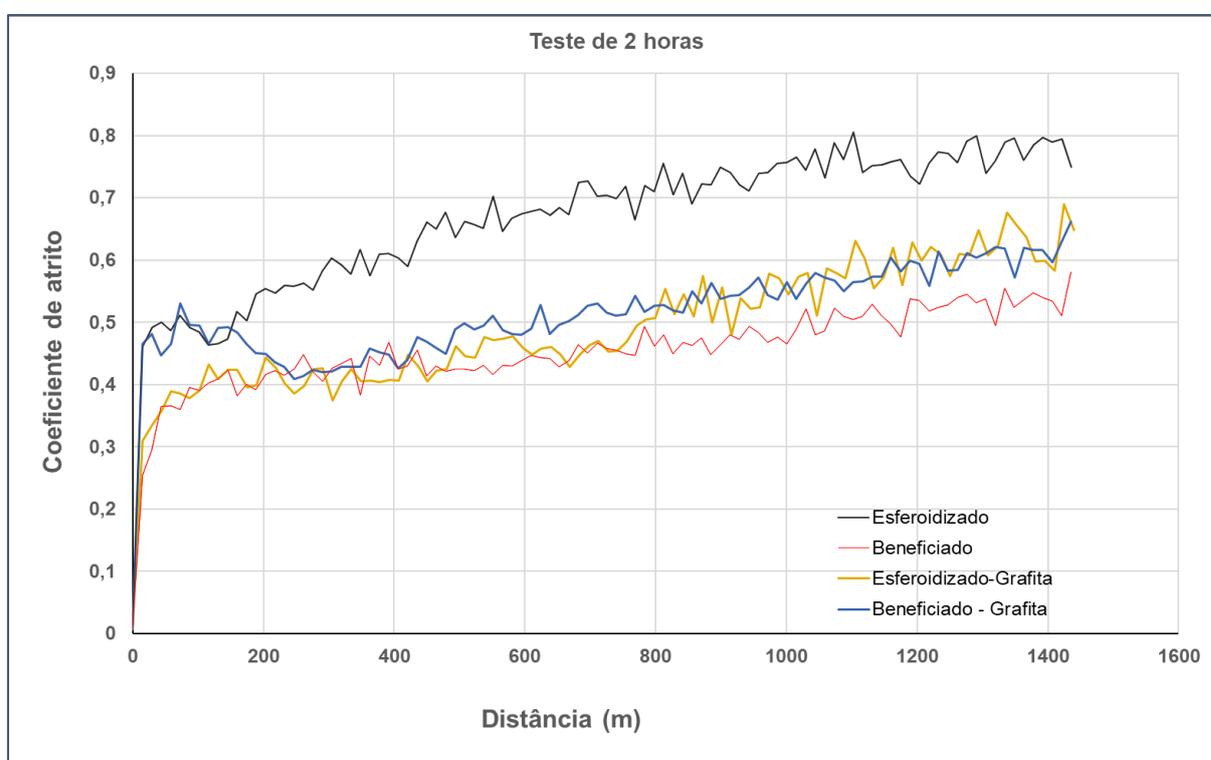


Fonte: Próprio autor.

#### 4.5.4.3 Efeito do eletrodo ferramenta de grafita

A figura 91 exibe o efeito do eletrodo ferramenta de grafita em relação ao coeficiente de atrito pela distância de deslizamento. Nota-se que, as curvas dos eletrodos nitretados com grafita também apresentaram valores de coeficiente de atrito por distância com valores intermediários entre as curvas do eletrodo esferoidizado e beneficiado.

Figura 91 – Efeito da nitretação com eletrodo ferramenta de grafita.



Fonte: Próprio autor

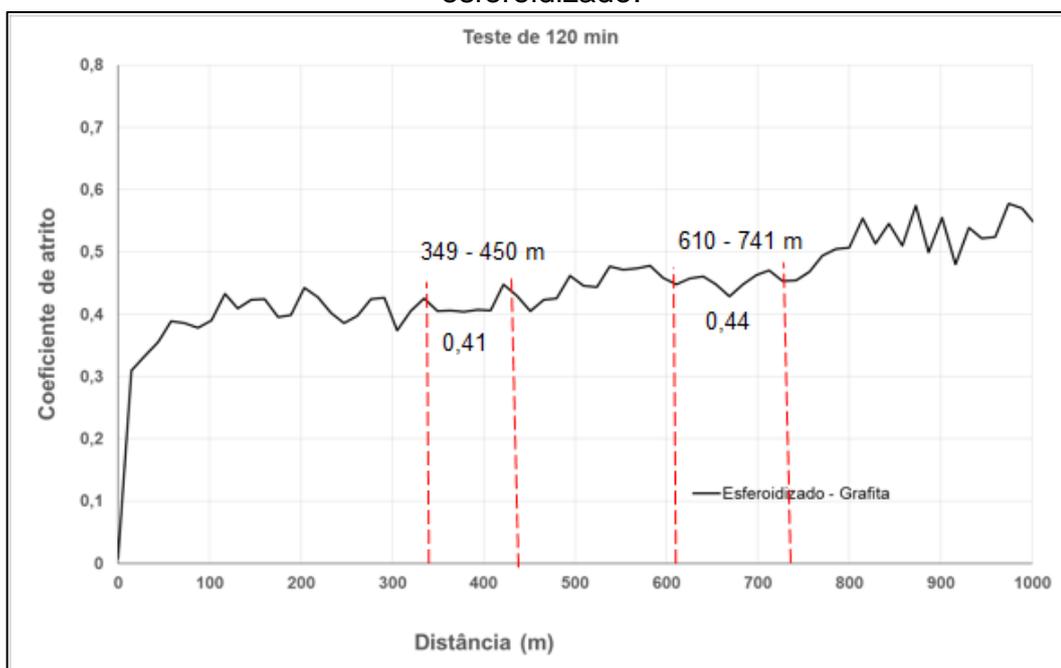
A partir da análise da curva do eletrodo esferoidizado na figura 92, é possível que o término do período running-in ocorre por volta de 349 m. Depois do primeiro estado estacionário, compreendido entre as distâncias de 349-450m e coeficiente de atrito de valor aproximado de 0,41, ocorre uma provável transição da camada ZR para a camada ZAC, devido ao aumento do coeficiente de atrito até, aproximadamente, 0,44 com o início do segundo estado estacionário em 610-741m.

Na figura 93, nota-se que o término do running-in ocorre por volta de 261 m. Ao final do primeiro estado que ocorre entre as distâncias de 261-348m, com coeficiente

de atrito de 0,42; após o regime estacionário, o coeficiente de atrito aumenta até a distância de deslizamento final.

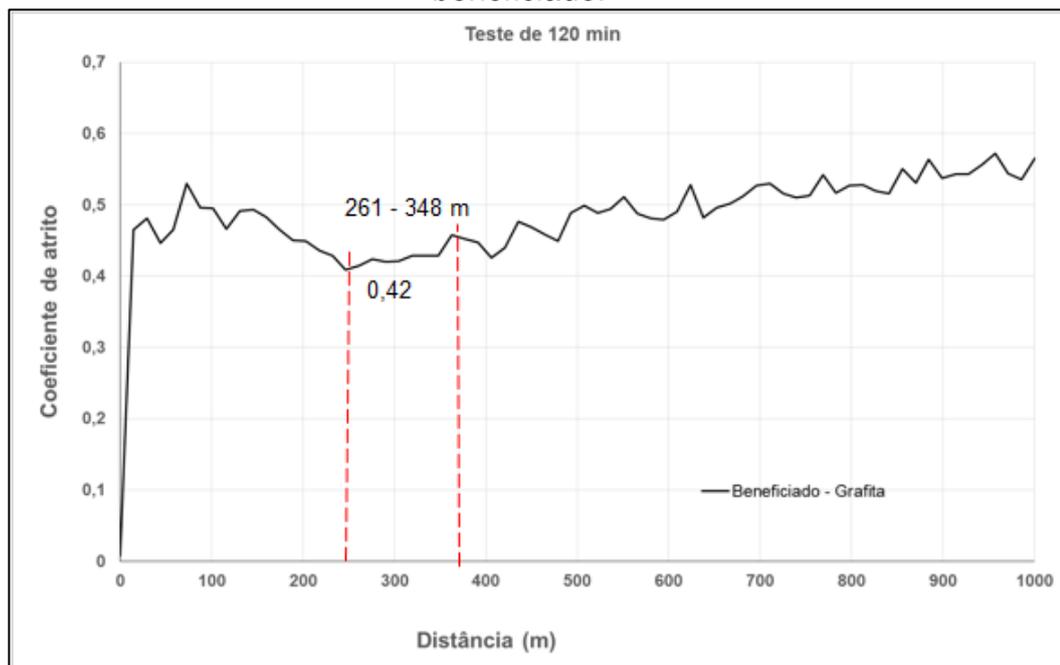
Como mencionado no tópico de perfilometria, os resultados indicaram que os eletrodos nitretados com grafita fizeram duas transições de camadas que são: ZR-ZAC e ZR-Matriz. Por meio das curvas, é possível visualizar somente a transição que é da ZR-ZAC, que é a camada mais superficial.

Figura 92 - Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo esferoidizado.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 93 - Posição do Running-in e regime estacionário para o eletrodo beneficiado.

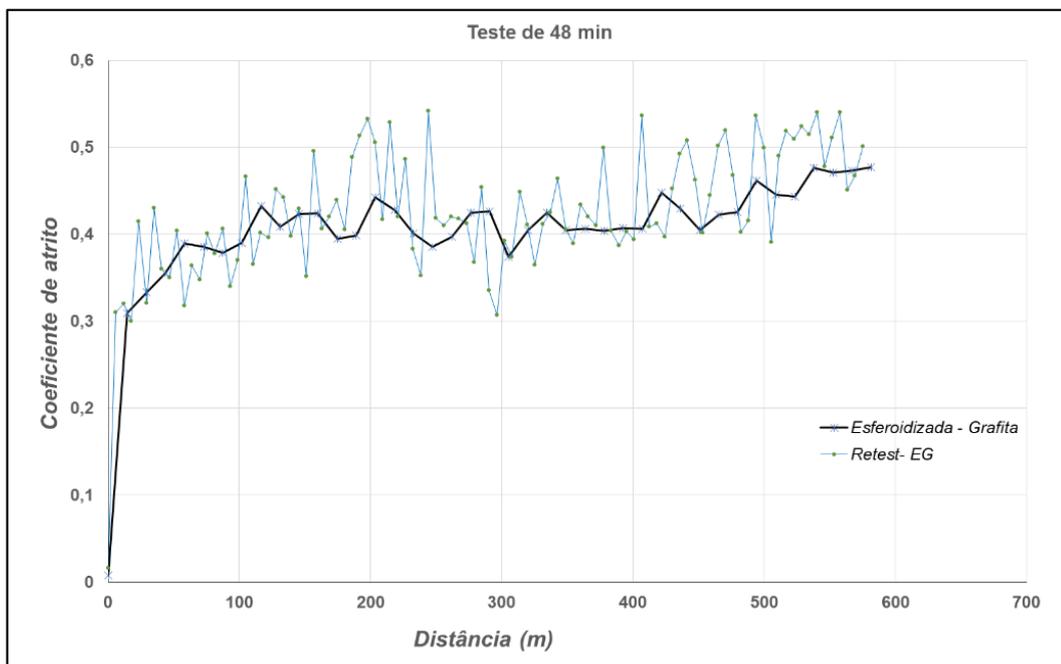


Fonte: Próprio Autor.

Com base na pesquisa de Blau (2009), a curva do eletrodo peça esferoidizado está relacionada com desgaste de uma película fina de contaminantes nas superfícies deslizantes. Para o caso do eletrodo beneficiado, tem-se o desenvolvimento subsequente de uma camada de detritos ou transferência excessiva de material, o que caracteriza alta taxa de desgaste inicial até que as asperezas mais afiadas sejam desgastadas e a superfície se torne mais suave.

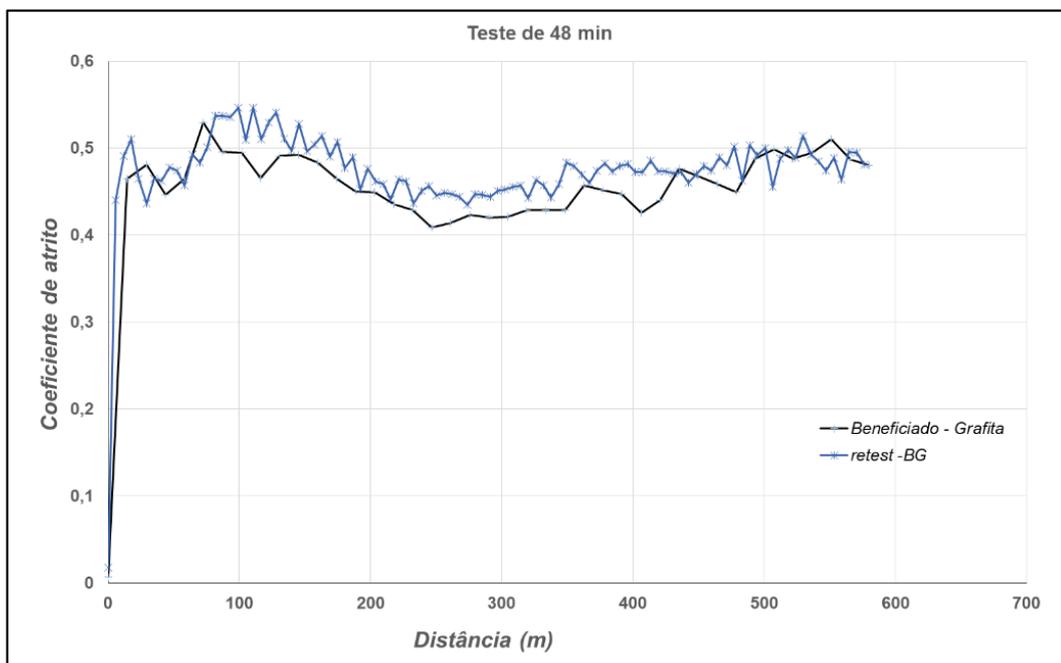
Os resultados encontrados no tópico de mecanismos encontrados estão em concordância com as preposições de Blau (2009) para os formatos das curvas. As curvas parciais para os eletrodos nitretados com grafita estão representadas na figura 94 e 95, provando a repetibilidade para a distância deslizada.

Figura 94 – Curva parcial do eletrodo beneficiado e nitretado com cobre.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 95 – Curva parcial do eletrodo beneficiado e nitretado com cobre.



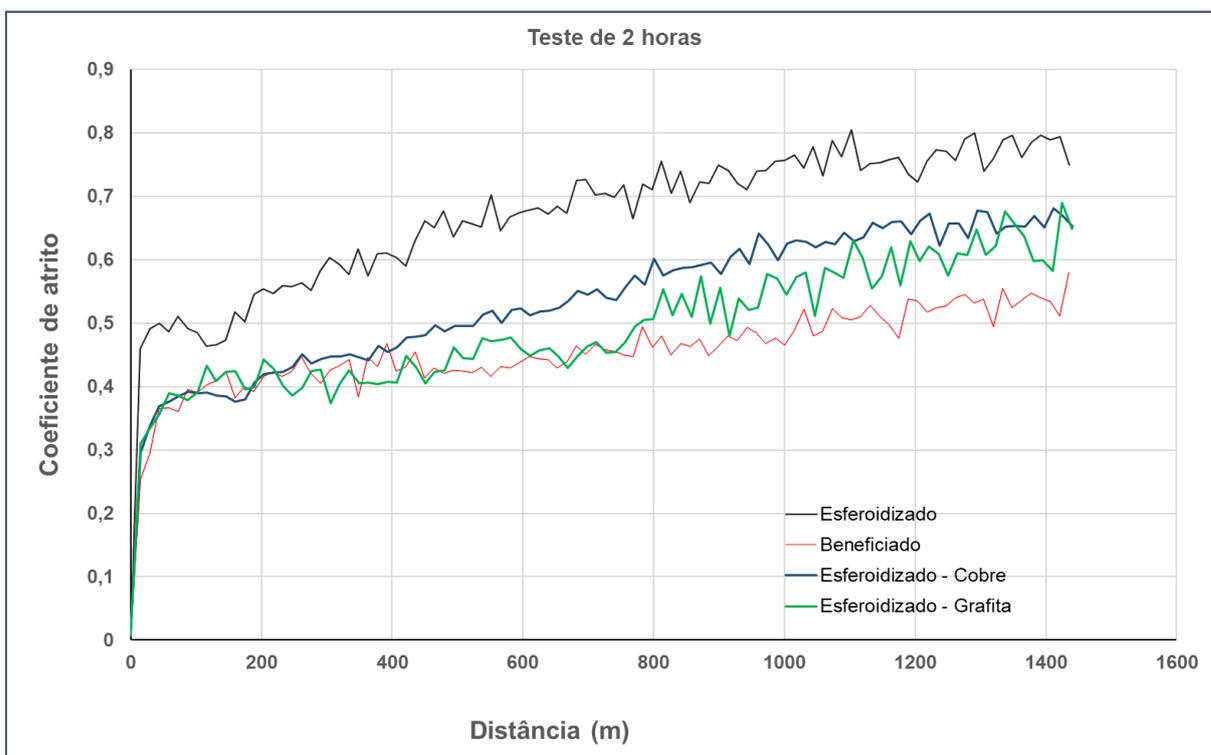
Fonte: Próprio Autor.

#### 4.5.4.4 Comparação entre os eletrodos ferramentas de cobre e grafita

As figuras 96 e 97 demonstram o comportamento dos eletrodos em relação ao coeficiente de atrito pela distância de deslizamento com matriz esferoidizada para a comparação dos eletrodos ferramentas. O eletrodo beneficiado e nitretado com eletrodo grafita, exibiu comportamento semelhante ao eletrodo beneficiado em relação ao coeficiente de atrito até 800 m. Após essa distância, o coeficiente de atrito aumentou até a distância de 1400m, aproximando-se do comportamento da matriz esferoidizada.

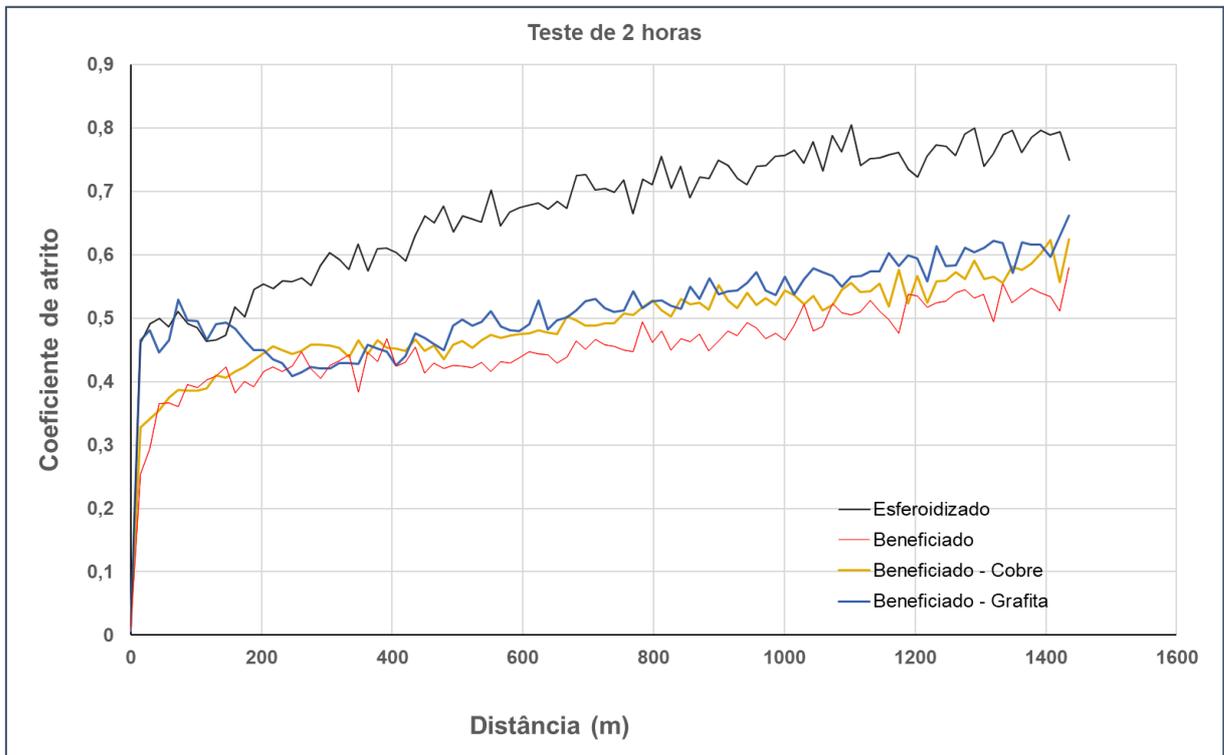
O eletrodo nitretado com cobre exibiu comportamento semelhante ao beneficiado até 362 m em relação ao coeficiente de atrito; a partir dessa distância, o coeficiente de atrito tem como comportamento aproximar-se do valor da matriz esferoidizada.

Figura 96 – Comparação entre os eletrodos ferramentas de matriz esferoidizada.



Fonte:Próprio autor

Figura 97 - Comparação entre os eletrodos ferramentas de matriz beneficiada.



Fonte:Próprio autor.

## 5 CONCLUSÃO

Em vista dos argumentos apresentados o aço SAE 52100 como recebido possuía microestrutura esferoidizada, composta de carbonetos dispersos em uma matriz ferrítica, e que, após beneficiamento, apresentou microestrutura composta de martensita revenida e carbonetos dispersos.

Levando-se em conta o que foi observado na pesquisa, há influência do eletrodo ferramenta na espessura da ZR e ZAC para a matriz esferoidizada e matriz beneficiada. Foram encontradas espessuras médias totais da ordem de 20 µm para a combinação de eletrodos. Os resultados demonstram que o processo apresenta descontinuidades, como trincas e poros.

Portanto houve variação do perfil de dureza em relação ao substrato, sendo a camada ZR como os maiores valores alcançados. Para o eletrodo esferoidizado a dureza da ZR aumentou 226%, em média, em relação à matriz. Para o eletrodo beneficiado, houve aumento de 11%.

Os resultados demonstram que o processo NDE promoveu a formação de nitretos de ferro e cromo na superfície do aço SAE 52100, comprovado por meio de difração de raios x.

Quanto à amostra beneficiada e nitretada com eletrodo ferramenta de cobre, apresentou melhor desempenho na usinagem, pois mostrou maiores valores de TRM, menor DVR e TD comparável aos outros eletrodos.

Em todas as amostras, observaram-se os mecanismos de desgaste abrasivo, adesivo e oxidativo.

Pelos resultados apresentados, a maioria das amostras desgastaram, toda camada nitretada até atingir a matriz, com exceção da amostra beneficiada e nitretada com cobre. Para o teste parcial de 48 min, todas as amostras localizam-se entre as camadas ZR e ZAC, com exceção da amostra esferoidizada e nitretada com grafita.

Em relação à taxa de desgaste, observou-se que o desgaste foi mais severo no eletrodo somente esferoidizado - perda de volume de 2591% - se comparada ao eletrodo peça somente beneficiado. Comprovou-se que a nitretação por descargas elétricas contribui na diminuição das taxas de desgaste, apresentado comportamento próximo do eletrodo beneficiado. O comportamento dos eletrodos de grafita e cobre foram ligeiramente diferentes em relação ao mesmo substrato, o que foi à diferença de condutividade térmica do cobre e da grafita, além do efeito da matriz.

Os ensaios de desgaste por deslizamento demonstraram que ocorre um aumento na resistência ao desgaste do aço SAE 52100 quando submetido ao processo NDE, pois a presença de nitretos contribuiu para a diminuição do coeficiente de atrito por distância de deslizamento.

Pela observação dos resultados apresentados, eletrodos nitretados possuíam comportamento equivalente ao eletrodo de matriz beneficiada. Por fim, as técnicas utilizadas foram suficientes para avaliar a resistência ao desgaste do aço SAE 52100 e podem ser usadas para melhorar o desempenho do componente.

## **SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Analisar a influência de altas concentrações de ureia para a preparação da solução dielétrica.
- Avaliar a influência de correntes mais elevadas no processo NDE.
- Avaliar intervalos menores para testes parciais no pino sobre disco para o aço SAE 52100.
- Avaliar métodos para diminuir a rugosidade da superfície do eletrodo peça.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G99-05: standard test method for wear testing with a pin-on-disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

AMORIM, F. L. Tecnologia da EDM por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre Cu Be para ferramentas de moldagem de materiais plásticos. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFSC. Florianópolis. 2002.

ARCHARD, J. F.. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. **Journal Of Applied Physics**, [s.l.], v. 24, n. 8, p.981-988, ago. 1953. AIP Publishing.

BABU, Vijaya et al. Electrical Discharge Machining (EDM): A Review. International Journal of Engineering Trends and Technology, [s.l.], v. 40, n. 6, p.371-375, 25 out. 2016. Seventh Sense Research Group Journals. <http://dx.doi.org/10.14445/22315381/ijett-v40p260>.

BARRAU, O et al. Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging. **Wear**, [s.l.], v. 255, n. 7-12, p.1444-1454, ago. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(03\)00280-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(03)00280-1).

BESWICK, J. M.. The effect of chromium in high carbon bearing steels. **Metallurgical Transactions A**, [s.l.], v. 18, n. 11, p.1897-1906, nov. 1987. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02647019>.

BLEYS, P.; KRUTH, J-P.; LAUWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; FROYEN, L.; HUMBEECK, J. V. Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM. *Advanced Engineering Materials*. p. 15-25. 2006.

BLAU, P. J. Friction, Lubrication and Wear Technology. vol. 18, ASM Handbook, 1992.

BHADESHIA, H.k.d.h.. Steels for bearings. Progress In Materials Science, [s.l.], v. 57, n. 2, p.268-435, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.06.002>.

BHUSHAN, B. Introduction to tribology. New York: John Wiley & Sons Inc., 2002.

BOUACHA, Khaider et al. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.349-361, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.11.011>.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5.ed. São Paulo: LTC, 2002. 578p.

CAMARGO, B. C.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. **Endurecimento Superficial de Uma LigaTi6Al4V por meio de Usinagem por Descargas Elétricas**. In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 5, 2009, Belo Horizonte, MG.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos.7ed.São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599p.

DAVIS, J.R, Davis & Associates. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM International, USA.319 p.2001.

DIN 50320: Verschleiß – Begriffe, Analyse von Verschleißvorgänge, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin 1979.

EYRE, T.s. Wear characteristics of metals. Tribology International, [s.l.], v. 9, n. 5, p.203-212, out. 1976. Elsevier BV.

GERDAU (Org.). **Aços para a construção mecânica**: Gerdau 100Cr6. 2017. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/pt/productservices/products/Document Gallery/Gerdau - 100Cr6.pdf>>. Acesso em: 06 maio 2017

GGD METALS. **AÇO CONSTRUÇÃO MECÂNICA**: SAE 52100. 2017. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2016/01/Construcao-Mecanica.pdf?x99575>>. Acesso em: 04 maio 2017.

LABRECQUE,C.; GAGNE,M.: Review ductile iron: fifty years of continuous development. Canadian Metallurgical Quarterly. Québec, v. 37, n.5, p. 343-378, June.1998.

HO, K.h; NEWMAN, S.t. State of the art electrical discharge machining (EDM). **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 43, n. 13, p.1287-1300, out. 2003.

HOLMBERG, Kenneth; MATTHEWS, Allan. Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering.2. ed. Helsinki e Sheffield: Elsevier Science, 2008. 576 p.

HOSSEINI, S.b. et al. Dissolution of Iron-chromium Carbides during White Layer Formation Induced by Hard Turning of AISI 52100 Steel. Procedia Cirp, [s.l.], v. 14, p.107-112, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.095>.

HUTCHINGS, Ian M.. Leonardo da Vinci's studies of friction. Wear, [s.l.], v. 360-361, p.51-66, ago. 2016. Elsevier BV.

HU, Yahui et al. The attenuation model of sliding guides wear theory based on Archard wear model. **2014 IEEE International Conference On Mechatronics And Automation**, [s.l.], p.1570-1574, ago. 2014. IEEE.

JAMESON, Elman C. Electrical discharge machining. Society of Manufacturing Engineers, 2001.

JIN, Jie et al. The effect of ion implantation on tribology and hot rolling contact fatigue of Cr4Mo4Ni4V bearing steel. *Applied Surface Science*, [s.l.], v. 305, p.93-100, jun. 2014. Elsevier BV.

KRAUSS, G. *Steel: processing, structure and performance*. ASM international, 2005, 291p.

KUFFNER, Bruna Horta Bastos et al. Study of the AISI 52100 Steel Reuse Through the Powder Metallurgy Route Using High Energy Ball Milling. **Materials Research**, [s.l.], p.1-10, 6 nov. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0546>.

KUMAR, Ravindra et al. Plasma nitriding of AISI 52100 ball bearing steel and effect of heat treatment on nitrided layer. *Bulletin of materials science*, v. 34, n. 1, p. 153-159, 2011.

KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B. L. Surface modification by electrical discharge machining: a Review. *Journal of Materials Processing Technology*. v.209, p.3675-3687, 2009.

KUPPAN, P.; NARAYANAN, S.; RAJADURAI, A.. Effect of process parameters on material removal rate and surface roughness in electric discharge drilling of Inconel 718 using graphite electrode. **International Journal Of Manufacturing Technology And Management**, [s.l.], v. 23, n. 3/4, p.214-224, 2011. Inderscience Publishers. <http://dx.doi.org/10.1504/ijmtm.2011.045509>.

MADSEN, B.W., Corrosive wear, in: *ASM Handbook, Vol. 18, Friction, Lubrication and wear technology*, ASM international, p.487, 1992.

MEYERS, M. A; CHAWLA, K. K. *Mechanical Behavior of Materials*. Prentice-Hall, New Jersey, 2009.

MISRA, Ambrish; FINNIE, Iain. A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester. **Wear**, [s.l.], v. 60, n. 1, p.111-121, abr. 1980. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(80\)90252-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(80)90252-5).

MOHANTY, Chinmaya P.; MAHAPATRA, Siba Sankar; SINGH, Manas Ranjan. An intelligent approach to optimize the EDM process parameters using utility concept and QPSO algorithm. **Engineering Science And Technology, An International Journal**, [s.l.], v. 20, n. 2, p.552-562, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.003>.

MOORE, M.a.. A review of two-body abrasive wear. *Wear*, [s.l.], v. 27, n. 1, p.1-17, jan. 1974. Elsevier BV.

MURRAY, M.J., MUTTON, P.J. and WATSON, J.D.: Abrasive wear mechanisms in steels, in *Wear of Materials 1979*, K.C. Ludema et al., eds., ASME, New York, p. 257-265, 1979.

MURRAY, M. J.; MUTTON, P. J.; WATSON, J. D.. Abrasive Wear Mechanisms in Steels. **Journal Of Lubrication Technology**, [s.l.], v. 104, n. 1, p.9-16, 1982. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3253171>.

QUINN, T.f.j.; WINER, W.o.. The thermal aspects of oxidational wear. **Wear**, [s.l.], v. 102, n. 1-2, p.67-80, mar. 1985. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90092-4](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(85)90092-4).

RABINOWICZ, E.; DUNN, L.a.; RUSSELL, P.g.. A study of abrasive wear under three-body conditions. *Wear*, [s.l.], v. 4, n. 5, p.345-355, set. 1961. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(61\)90002-3](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(61)90002-3).

REED-HILL, R. Princípios de metalurgia física. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776p.

SADEGHI, Farshid et al. A Review of Rolling Contact Fatigue. *Journal Of Tribology*, [s.l.], v. 131, n. 4, p.1-15, 2009. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3209132>.

SANTOS, C. A; SILVA, E. R; SANTOS, R. F. Avaliação da corrente elétrica no processo de nitretação por EDM no aço AISI H13.In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 8., 2015, salvador. Anais... Salvador: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas,2015.

SANTOS, R.F. Nitretação por EDM do aço AISI 4140.2012.128f.Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SERVSPARK - Industria de máquinas Ltda, Manual de operação da máquina EDM Eletroplus – 540/340, Hortolândia, São Paulo, 2011.

SHACKELFORD, James F. Ciência dos materiais.6.ed.São Paulo: Pearson,2008. 557p.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. Engineering tribology: Tribologia. 2aed. Butterworth Heinemann, Boston, 2014. p. 504-570; 872.

STEFANO, M. Cristina de; MONTES-SANCHO, María J.; BUSCH, Timo. A natural resource-based view of climate change: Innovation challenges in the automobile industry. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 139, p.1436-1448, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.023>.

STEVENS, L. Improvement of surface quality in die-sinking EDM. 1998, 181 f. Thesis (Doctoral of Mechanical Engineering) - Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.

STRAFFELINI, G.; TRABUCCO, D.; MOLINARI, A.. Oxidative wear of heat-treated steels. **Wear**, [s.l.], v. 250, n. 1-12, p.485-491, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(01\)00661-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(01)00661-5).

TAN, Engin et al. Influence of repeated tempering on the machinability and microstructure of an AISI 52100 steel. **Materials Testing**, [s.l.], v. 57, n. 11-12, p.947-953, 16 nov. 2015. Carl Hanser Verlag. <http://dx.doi.org/10.3139/120.110805>.

TOTTEN, George E. (Ed.). Steel heat treatment: metallurgy and technologies. crc Press, 2006.

TUNNA, J; SINCLAIR, J; PEREZ, J. A review of wheel wear and rolling contact fatigue. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, [s.l.], v. 221, n. 2, p.271-289, 1 jan. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1243/0954409jrrt72>.

UPADHYAY, Ram Krishna; KUMARASWAMIDHAS, Lakshmi Annamalai. A Review On Tribology Of Surfaces And Interfaces. Advanced Materials Letters, [s.l.], v. 5, n. 9, p.486-495, 1 set. 2014. VBRI Press AB.

VIÁFARA, Cristian C.; SINATORA, Amilton. The effect of hardness of sliding bodies on the wear regime transition of steels. Lubrication Science, [s.l.], v. 25, n. 2, p.123-138, 20 jun. 2012.

VILLARES METALS. **Aços especiais para aplicação mecânica: 52100**. 2005. Disponível em: <<http://www.proacos.com.br/images/stories/catalogos/V52100.pdf>>. Acesso em: 04 maio 2017.

XIA, Yanqiu et al. Remarkable friction stabilization of AISI 52100 steel by plasma nitriding under lubrication of alkyl naphthalene. **Wear**, [s.l.], v. 268, n. 7-8, p.917-923, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2009.12.024>.

WANG, S. Q. et al. Transition of Mild Wear to Severe Wear in Oxidative Wear of H21 Steel. **Tribology Letters**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.67-72, 8 out. 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11249-008-9361-y>.

WATSON, S.w. et al. Methods of measuring wear-corrosion synergism. **Wear**, [s.l.], v. 181-183, p.476-484, mar. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90161-2](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(95)90161-2).

WEI, M. X. et al. Analysis for Wear Behaviors of Oxidative Wear. **Tribology Letters**, [s.l.], v. 42, n. 1, p.1-7, 7 jan. 2011. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11249-010-9741-y>.

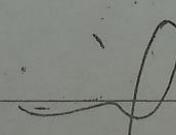
ZARETSKY, e V. Rolling bearing steels – a technical and historical perspective. **Materials Science And Technology**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.58-69, jan. 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/1743284711y.0000000043>.

ZUM GAHR, K,-H. Microstructure and wear of materials. Amsterdam: Elsevier, v.1, p1-6, 80-115, 559, 1987.

## 7 ANEXOS

## 7.1 ANEXO A

## Certificado de qualidade do aço SAE 52100.

 <b>AÇOS ROMAN LTDA. COMÉRCIO DE AÇOS ESPECIAIS</b> <small>ISO 9001:2000</small> <small>AÇOS EM BARRAS - LAMINADOS - FORJADOS - TREFILADOS</small> <small>RETIFICADOS - AÇO PRATA - CARBONO - CROMO E TUNGSTÊNIO</small> <small>CHAPAS 1045/1070/1080 - AÇOS 52100/5160/6150/9254/8620/4140</small> <small>DIVISÃO CONSULTORIA - LABORATÓRIO METALGRÁFICO</small>		<b>AÇOS ROMAN LTDA</b> <small>Rua Henrique Ongari, 156 - Água Branca</small> <small>CEP 05037-150 - São Paulo - SP - Brasil</small> <small>Tel.: (0xx11) 3613-2211 - Fax: (0xx11) 3613-2212</small> <small>www.aco.com.br - aco@aco.com.br</small>	
<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE DO MATERIAL Nº</b>			
		NF.: 067.083/1	
CLIENTE: <b>AÇOMEF FERRO E AÇO LTDA 00.899</b>			
Dados do Produto	Nossa Referência:	08.300.007.839	09.400.007.960
	Referência do cliente		
Análise Química	Quantidade (am/pc)	20,00 KG	21,00 KG
	Material	APCR SAE 52100 5,00 HNS	APCR SAE 52100 8,00 HNS
	Comprimento		
	Corrida	12.313.500	12.312.222
	Nº Certificado	02900 CERT. N. 373914	02900 CERT. N. 382408
Análise Química	Carbono (C)	1,000	1,010
	Manganês (Mn)	0,330	0,300
	Silício (Si)	0,260	0,180
	Fósforo (P)	0,014	0,017
	Enxofre (S)	0,005	0,008
	Cromo (Cr)	1,410	1,400
	Níquel (Ni)	0,110	0,080
	Molibdênio (Mo)	0,030	0,030
	Alumínio (Al)	0,004	0,003
	Cobre (Cu)	0,140	0,130
	Boro (B)		
	Titânio (Ti)	0,002	0,002
	Tungstênio (W)		
Vanádio (V)			
Dureza / Tração	Resistência à tração		
	Limite escoamento	197 HB	198 HB
Tratamento térmico	Alongamento		
	Redução de área		
Matéria-prima	Matéria-prima		
	Produto		
Especificações	Microestrutura	ESFEROIDIZADO 11	ESFEROIDIZADO 11
	Microestrutura		ESFEROIDIZADO 10
Não destrutivos	Part. Mag. resultado		
	Ultra-som resultado		
Líquido Pen. resultado	Líquido Pen. resultado		
Obs.			
Data emissão: SÃO PAULO, 28 DE MAIO DE 2.009			
			 Qualidade