

Monografia de Graduação

ESTUDO DO EFEITO DA NITRETAÇÃO A PLASMA NO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE ROLAMENTOS DE AEROGERADORES

Arthur Cid de Abreu

Natal, junho de 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARTHUR CID DE ABREU

ESTUDO DO EFEITO DA NITRETAÇÃO A PLASMA NO DESEMPENHO
TRIBOLÓGICO DE ROLAMENTOS DE AEROGERADORES

Monografia apresentada ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo 44.1 (PRH ANP – 44.1), na Universidade do Rio Grande do Norte como documento parcial conclusão do projeto de pesquisa.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Salete Martins Alves.

NATAL/RN 2024

Abreu, A. C. **ESTUDO DO EFEITO DA NITRETAÇÃO A PLASMA NO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE ROLAMENTOS DE AEROGERADORES**. 2025. 33 p. Graduação. PRH-44.1 - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2023.

Resumo

No Brasil, a indústria eólica registrou em 2022 o primeiro recorde de geração eólica instantânea, responsável por produzir 14.167 Megawatts (MW) de energia, que é suficiente para atender toda a região Nordeste durante um minuto e ainda restar um excedente de mais de 23,3% total de energia produzida segundo Operador Nacional do Sistema (ONS). Sendo assim, essa geração acaba sendo rentável aos investidores, por ser uma fonte de energia verde e sustentável mais viáveis, com isso há uma tendência de gerar uma ampliação desses parques eólicos nos próximos anos no país. Uma grande preocupação deste setor são os danos aos componentes mecânicos e as perdas de energia causadas por fricção e desgaste repetidos, que levam à redução da eficiência e vida útil desses componentes, assim como o aumento dos custos de manutenção. O uso do tratamento superficial termoquímico de Nitretação a Plasma promete fazer com que esses componentes consigam alcançar propriedades antidesgaste, e uma capacidade de redução do atrito, maiores que aquelas que eles o material já apresenta, podendo torna-lo de suma importância, garantindo uma melhora na vida útil assim como a melhoria da eficiência desses dispositivos mecânicos. Diante disso, foi realizado dois tipos de tratamento à nitretação a plasma em esferas de rolamentos de aço SAE 52100, com condições de proporção de gases diferentes (20%Ar + 80%N₂ e 20%H₂ e 80%N₂), afim de avaliar o comportamento dessas camadas superficiais criadas, em relação ao objetivo de melhorar suas características mecânicas. Com as esferas tratadas termoquimicamente, elas foram colocadas para realizar um trabalho de desgaste, utilizado um tribômetro pino sobre o disco, cujo seu objetivo é realizar uma simulação do trabalho que ocorre entre as esferas e a pista de um rolamento, e assim, avaliar suas propriedades tribológicas fundamentais (atrito e desgaste abrasivo/adensivo). E para isso, o par tribológico escolhido para a realização desses ensaios foram discos polidos de aço SAE 1045, que é aço médio carbono com propriedades que exigiram um trabalho satisfatório para as esferas. Esses ensaios de desgastes foram realizados à duas condições diferentes, com e sem a presença de um

lubrificante como agente intermediador, e para averiguar o comportamento das camadas, com o auxílio de equipamentos capazes de fazer varreduras de superfície, foram realizadas análises das trilhas formadas pelos desgastes realizados nos discos, assim como pela dureza das esferas tratadas utilizando um microdurometro.

Palavras-chave: Aerogeradores, Tratamento Superficial, Nitretação a Plasma, Aço SAE 52100.

Abstract

In Brazil, the wind industry set the first record for instantaneous wind generation in 2022, producing 14,167 Megawatts (MW) of energy, which is enough to supply the entire Northeast region for one minute and still have a surplus of more than 23.3% of the total energy produced, according to the National System Operator (ONS). Therefore, this generation ends up being profitable for investors, as it is a more viable source of green and sustainable energy, which means there is a tendency to generate an expansion of these wind farms in the coming years in the country. A major concern in this sector is damage to mechanical components and energy losses caused by repeated friction and wear, which lead to reduced efficiency and useful life of these components, as well as increased maintenance costs. The use of thermochemical surface treatment by Plasma Nitriding promises to enable these components to achieve anti-wear properties and a friction reduction capacity greater than those already presented by the material, which can make it of utmost importance, ensuring an improvement in the useful life as well as the improvement of the efficiency of these mechanical devices. In view of this, two types of plasma nitriding treatment were performed on SAE 52100 steel bearing balls, with different gas proportion conditions (20% Ar + 80% N₂ and 20% H₂ and 80% N₂), in order to evaluate the behavior of these created surface layers, in relation to the objective of improving their mechanical characteristics. With the thermochemically treated spheres, they were placed to perform a wear test, using a pin tribometer on the disc, whose objective is to simulate the work that occurs between the spheres and the raceway of a bearing, and thus, evaluate their fundamental tribological properties (friction and abrasive/adhesive wear). And for this, the tribological pair chosen to perform these tests were polished discs of SAE 1045 steel, which is a medium carbon

steel with properties that required satisfactory work for the spheres. These wear tests were performed under two different conditions, with and without the presence of a lubricant as an intermediary agent, and to verify the behavior of the layers, with the aid of equipment capable of performing surface scans, analyses were performed of the tracks formed by the wear performed on the discs, as well as the hardness of the treated spheres using a microhardness tester.

Key-words: Wind turbines, Surface Treatment, Plasma Nitriding, Steel SAE 52100

Lista de Ilustrações

Figure 2.1 - Componentes de típico HAWT upwind de três pás.....	12
Fonte: Dhanola, Gard (2020) [9].....	12
Figure 2.2 - Exemplo de Parques eólicos que tiveram problemas nas tubirnas, (a) complexo Eólico Mandacaru, das AES Brasil no Ceará, (b) Conjunto Eólico Santo Agostinho, da Engie, no Rio Grande do Norte. Fonte: Foto Divulgação [5].....	15
Figure 3.1 – Esquema do reator de nitretação a plasma.....	17
Fonte: Tradução de Serra et al., 2020.....	17
Figura 3.2 – Representação do ensaio tribológico Pino sobre o Disco.	18
Figure 4.2 – <i>Coefficiente de atrito pelo tempo (a) sem lubrificante (b) com lubrificante.</i>	23
Figure 4.3 – <i>Larguras das Trilhas de desgastes, vista por MEV.</i>	24
Figure 4.4 – <i>Perfilometria da superfície dos discos desgastados.</i>	25
Figure 4.5 – <i>Microscopia eletrônica de varredura do disco desgaste a seco, pela esfera tratado com o tipo 2.</i>	26
Figure 4.6 – <i>Microscopia eletrônica de varredura do disco desgastado a seco, pela esfera tratada do tipo 1.</i>	26
Figure 4.7 – <i>Microscopia eletrônica de varredura do disco lubrificado desgastado, pela esfera tratada do tipo 1.</i>	27
Figure 4.8 – <i>Microscopia eletrônica de varredura do disco lubrificado desgastado, pela esfera tratada com o tipo 2.</i>	28

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – <i>Coeficiente de Atrito médios dos ensaios realizados.</i>	23
Tabela 4.2 – <i>Desgastes das esferas</i>	25

Lista de abreviaturas e siglas

ONS	Operador Nacional do Sistema
MW	Megawatts
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HAWT	Turbinas eólicas de eixo horizontal
VAWT	Turbinas eólicas de eixo vertical
SAE	Society of Automotive Engineers
SCCM	Standard Cubic Centimeters Perminute
HV	Vickers
HRC	Rockwell C

Sumário

Resumo	3
Abstract	4
Lista de Ilustrações	6
Lista de Tabelas	7
Lista de abreviaturas e siglas	8
1. Introdução.....	10
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1 Turbina eólica e seus componentes	12
2.1.1 Operações de trabalho das turbinas eólicas.....	13
2.2 Tratamento Superficial	15
3. Materiais e Métodos	16
3.2 Ensaio Tribológico Esfera-Disco	18
3.3 Teste de Caracterização	19
3.4 Usinagem do aço SAE 52100	20
4. Resultados.....	21
4.1. Microdureza	21
4.2 Análise do Coeficiente de Atrito	22
4.3 Análise da Trilha de Desgaste.....	23
4.4 Mecanismos de Desgaste	25
5. Considerações finais	29
6. Referências	30

1. Introdução

Fonte limpa e renovável, a indústria eólica está cada vez mais ganhando destaque, segundo o Relatório Global Wind de 2024, ano passado foi o maior número de novas instalações na história da energia eólica onshore (mais de 100 GW) e o segundo maior para eólica offshore (11 GW), o crescimento tem sido excessivamente concentrado nos principais mercados de China, UE, EUA, Índia e Brasil [1].

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) a energia eólica no Brasil gera mais de 1.500 GW de potencial em eólicas onshore e offshore e ocupa o sexto lugar no Ranking Global de Capacidade Instalada onshore [2]. O Rio Grande do Norte é líder na produção de energia eólica no Brasil com 9,43 GW, o que representa quase 32% de toda a geração de energia eólica no País, segundo o Mapa das Energias Renováveis do Observatório da Indústria Mais RN [3].

O problema de falha de rolamento em turbinas eólicas é uma das principais razões para a vida útil das turbinas eólicas, o que não só leva à perda de geração de energia, mas também aumenta o custo de reparo e peças de reposição [4].

Entretanto, muitos dos geradores usados nas usinas eólicas têm sofrido com falhas prematuras, por exemplo, o caso da Engie, em julho de 2023, revelado pela Mover que a avaria ocorreu em uma das pás de um aerogerador de 6,2 MW de potência recém-comissionado e em fase de testes no Conjunto Eólico Santo Agostinho, Lajes e Pedro Avelino, no Rio Grande do Norte. O problema de falha de rolamento em turbinas eólicas é uma das principais razões para a vida útil das turbinas eólicas, o que não só leva à perda de geração de energia, mas também aumenta o custo de reparo e peças de reposição [4][5].

O impacto econômico do atrito e do desgaste é calculado com base nos custos do consumo de energia para superar o atrito, os custos da energia necessária para fabricar peças de reposição e equipamentos sobressalentes relacionados ao desgaste e o custo do trabalho de manutenção relacionado ao desgaste. É utilizado um preço médio global de 18 € para 1 GJ de energia ou 1 TJ = 18 k€ [6].

Os eixos principais são suportados por rolamentos autocompensadores de rolos e rolamentos de rolos cônicos que sofreram falhas prematuras associadas a "microcutting" e fadiga iniciada na superfície. As caixas de engrenagem também usam, principalmente, rolamentos de rolos cilíndricos e de rolos cônicos que apresentam

falhas infantis associadas à fadiga, microcorrosão e manchas (Tecnologia de Superfícies de Revestimento) [7].

Apesar de todos esses efeitos que podem acarretar diminuição da vida útil dos aerogeradores das torres eólicas, alguns tratamentos podem ser realizados para evitar tais problemas, como os tratamentos de superfícies. Os tratamentos superficiais podem ser realizados a fim de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste do material, os quais podem ser realizados a plasma, que corresponde a uma tecnologia recente, eficiente e não poluente utilizada para modificação de superfície de materiais [8]

Sendo assim, o tratamento superficial adotado foi o de nitretação iônica a plasma, que promete aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão do aço 52100, através da difusão do nitrogênio com o substrato de na superfície, formando um composto chamado de nitreto de ferro (FeN). O objetivo deste trabalho é realizar o estudo do efeito dos parâmetros, fluxo e proporção dos gases na microestrutura e resistência ao desgaste do aço SAE 52100 nitretado a plasma. Desta forma, é possível observar se a nitretação iônica a plasma pode indicar maior eficiência deste material em serviço quando aplicado em situações de desgaste, como aqueles que acontecem nos rolamentos de aerogeradores.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Turbina eólica e seus componentes

As turbinas eólicas podem ser classificadas como turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT) e turbinas eólicas de eixo vertical (VAWT). No entanto, várias configurações de turbinas eólicas estão disponíveis hoje em dia, em que principalmente o projeto de eixo horizontal contra o vento com três pás é usado devido à sua maior eficiência e potência.

Uma típica turbina eólica de eixo horizontal é mostrada na Figura 2.1 com componentes principais: um rotor (pás, cubo e sistema de inclinação), nacela (eixo do rotor, caixa de engrenagens/gerador, freio mecânico e sistema de guinada), torre, fundação, sistemas elétricos e de controle. O rotor inclui cubo e pás, o que ajuda a transmitir a energia mecânica através do eixo principal ou eixo de baixa velocidade (10–15 rpm) e a caixa de engrenagens para o eixo de alta velocidade (1200–1500 rpm) que se conecta ainda mais ao gerador [9].

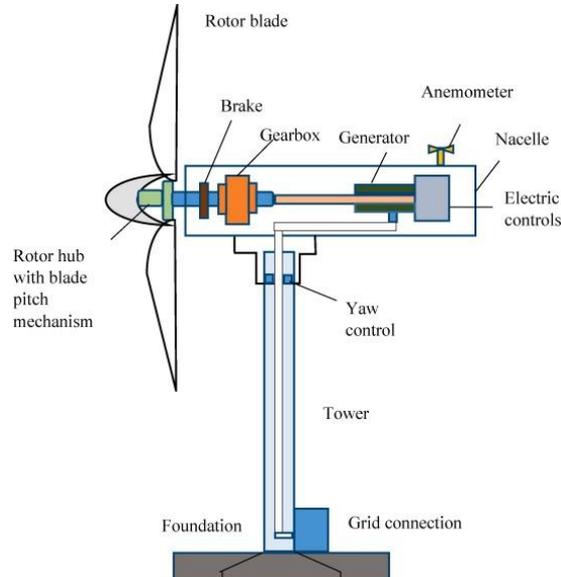


Figure 2.1 - Componentes de típico HAWT upwind de três pás

Fonte: Dhanola, Gard (2020) [9]

O sistema de passo é a tecnologia usada para controlar o ângulo da lâmina para obter a produção de energia ideal. Em contraste, o sistema de guinada mantém a área

de varredura do rotor apontada na direção do vento para receber a entrada de energia ideal. O anemômetro é usado para monitorar a direção do vento de entrada. Depois de coletar as informações, o controlador move os motores de guinada para girar a nacelle de acordo. Geralmente, gerador síncrono, gerador síncrono eletricamente excitado, gerador de indução tipo gaiola de esquilo, gerador de indução de rotor bobinado e gerador de indução duplamente alimentado. Os custos dos principais componentes da turbina eólica dependem em grande parte dos tamanhos e configurações da turbina eólica. No entanto, uma visão geral aproximada do custo associado a cada componente principal de uma turbina eólica típica de 2 MW [9].

2.1.1 Operações de trabalho das turbinas eólicas

As turbinas eólicas operam em um ambiente único, colocando desafios consideráveis na operação confiável dos componentes de rolamento e engrenagem do sistema. Ventos e rajadas instáveis causam altas tensões de contato, falhas no gerador e engate da rede, causando cargas de impacto e derrapagem de rolamentos, umidade ambiente causa ambientes corrosivos e degradação do lubrificante, e assim por diante [10].

Essas condições resultaram em problemas de desgastes, rachaduras nas superfícies, assim alguns tipos de desgastes, como o “scuffing”, que é um modo de contato deslizante de dano superficial tipicamente caracterizado por deformação plástica severa, normalmente causado pelo aquecimento por fricção local na superfície onde a espessura do filme de lubrificação é inadequada. Ocorre também o “micropitting”, que se caracteriza como um modo de desgaste que afeta tanto as engrenagens quanto os rolamentos, e está normalmente associado à tensão de cisalhamento tangencial causada pelo contato de rolamento-deslizamento, e é comumente um precursor de falhas de superfícies maiores, como a fadiga hertziana (também causada por contato sobrecarregado, inclusões de material e outros fatores) [10].

2.1.2 Defeitos nas Turbinas

A vida útil projetada do equipamento de energia eólica é de cerca de 20 a 25 anos, mas devido a fatores como condições ambientais instáveis e cargas variáveis no tempo, não pode atender ao padrão de vida útil. Os rolamentos como peças centrais, sua precisão, desempenho e vida útil têm um papel decisivo no desempenho e na confiabilidade das instalações de turbinas eólica. No entanto, as turbinas eólicas funcionam sob velocidades de vento extremamente instáveis, carregamento e situações de operação desafiadoras, resultando em rolamentos suscetíveis a danos durante o serviço. Estima-se que apenas 10% dos rolamentos operem adequadamente durante sua vida útil, enquanto 90% das falhas de rolamentos se devem a problemas como lubrificação deficiente (30%), manutenção inadequada (40%) e defeitos de fabricação (20%) operam de forma confiável durante seu ciclo de vida [4].

A empresa Siemens, por exemplo, encontrou problemas de qualidade em componentes como as pás e os rolamentos de seus aerogeradores onshore, especialmente no modelo 5X. A empresa tem 108 GW de turbinas onshore em operação e instalação e estima que entre 15% e 30% podem ser afetadas. As falhas foram percebidas durante uma revisão que detectou uma “vibração anormal de alguns componentes” e problemas no design dos produtos, que não foram especificados, segundo a Reuters. No Brasil, a AES Brasil e a Engie confirmaram avarias em turbinas eólicas da Siemens Gamesa. Os parques eólicos Conjunto Eólico Santo Agostinho, no Rio Grande do Norte, e eólica Santos, no Complexo Eólico Mandacaru, no Ceará tiveram problemas com esse fornecedor, por exemplo, o caso que ocorreu em 5 de julho 2023 revelado pela Mover. A avaria ocorreu em uma das pás de um aerogerador de 6,2 MW de potência recém-comissionado e em fase de testes no Conjunto Eólico Santo Agostinho [5].

O complexo em construção desde 2021 nos municípios de Lajes e Pedro Avelino, no Rio Grande do Norte, está parcialmente em operação, com 13 turbinas. Com investimentos de R\$ 2,3 bilhões, quando o complexo estiver concluído, terá capacidade instalada de 434MW, com 14 parques eólicos e um total de 70 aerogeradores. O incidente da AES Brasil aconteceu em maio de 2023, em uma das turbinas do parque eólico Santos, que faz parte do Complexo Eólico Mandacaru, no

Ceará. Uma turbina teria pegado fogo, ver os parques eólicos que tiveram problemas nas suas turbinas [5].



Figure 2.2 - Exemplo de Parques eólicos que tiveram problemas nas tubirnas, (a) complexo Eólico Mandacaru, das AES Brasil no Ceará, (b) Conjunto Eólico Santo Agostinho, da Engie, no Rio Grande do Norte.

Fonte: Foto Divulgação [5]

2.2 Tratamento Superficial

A nitretação iônica a plasma é um tratamento termoquímico em meio de plasma em que a superfície do metal é alterada devido a difusão de nitrogênio que se combina com os elementos já presentes no substrato, formando a camada nitretada constituída por uma região conhecida como camada composta e pela zona de difusão [11][12].

A camada composta é formada por nitretos que apresentam alta dureza, aumentando as propriedades mecânicas do metal como resistência ao desgaste e à fadiga, além de apresentar resistência à corrosão [11]. Quando há o bombardeamento de nitrogênio na superfície do aço, há um alto gradiente de concentração do elemento em difusão na superfície tratada, o que causa a formação dos nitretos de ferro, que se formam inicialmente pela fase rica em nitrogênio – FeN, que é instável. Esta fase então se decompõe em nitretos estáveis, em que o nitrogênio em excesso é liberado, podendo formar Fe₂N, Fe₃N e Fe₄N. As fases mais comumente encontradas nos tratamentos de nitretação são as Fe₄N e Fe₂-3N [13].

Segundo Brunatto, o tipo de nitreto formado está relacionado à proporção de nitrogênio introduzido na atmosfera de tratamento, em que de 15% a 30% de N₂ se forma preferencialmente o nitreto Fe₄N chamada de fase γ' , que possui estrutura cristalina CFC (Cúbica de Face Centrada), a qual fornece uma menor dureza e uma maior ductilidade a camada composta. Acima de 30% de N₂, pode-se dar origem à

formação do nitreto Fe_2-3N , denominado como fase ϵ , possuindo uma estrutura HC (Hexagonal Compacta), dura e frágil [14][15].

Já a zona de difusão consiste em uma solução sólida intersticial e supersaturada do nitrogênio na matriz de ferro, podendo haver precipitados de nitretos em formato de “agulhas”, localizando-se logo abaixo da camada composta. Esta estrutura causa uma deformação do reticulado cristalino do metal, que dificulta o movimento de discordâncias, aumentando a dureza, a resistência ao desgaste e a fadiga do material, mantendo a ductilidade da camada do material [16][17].

3. Materiais e Métodos

A primeira etapa da pesquisa consistiu em utilizar o par tribológico esferas lisas de aço SAE 52100 de 10 mm de diâmetro, e discos de aço SAE 1045 com diâmetro de 50 mm e 15 mm de espessura, que estes foram preparadas por meio de lixamento, até obter uma rugosidade média (R_a) de $0,2 \mu m$, aproximadamente. As esferas e discos foram escolhidos nessa primeira etapa por estar disponível no laboratório do Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural (GET), localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em seguida foi feito tratamento superficial de nitretação a plasma nas esferas que será detalhado no subitem 3.1.1.

3.1 NITRETAÇÃO A PLASMA

Os tratamentos de nitretação a plasma foram realizados no LabPlasma (Laboratório de Plasma) localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Utilizou-se dois tipos de tratamentos nas esferas de aço SAE 52100, em ambos os casos, elas foram alocadas sobre uma superfície de alumínio, para evitar o deslizamento para fora da plataforma no interior do reator, onde é realizado o ensaio de nitretação. Quando já posicionadas, foi feito um processo de limpeza superficial nas esferas denominado de pré-sputtering, cujo objetivo desse procedimento é remover as impurezas presentes na superfície do objeto a ser tratado, utilizando uma atmosfera composta de gases inertes a uma temperatura já estabelecida.

No tratamento tipo 1, os gases utilizados no pré-sputtering foram os gases argônio e hidrogênio, com parâmetros de 2 SCCM (Centímetro cúbico por minuto) de hidrogênio, e 8 SCCM de argônio, simultaneamente, a uma temperatura de 300 °C. O tempo da limpeza para o primeiro tratamento foi de 1 hora, a uma pressão próxima ao vácuo (0 milibar). Após realizado a limpeza a temperatura foi elevada, até atingir uma temperatura de superfície na faixa de 500 °C e 520 °C, fazendo com que fosse realizado a deposição do nitrogênio às superfícies das esferas, com intuito de criar um perfil de FeN (Nitreto de Ferro). Os ensaios foram realizados num período de 4 horas, com concentrações de gases de 2 SCCM de nitrogênio e 8 SCCM de argônio, para assim obter uma possibilidade de aumento nas propriedades mecânicas do aço

Para o segundo tratamento (tratamento tipo 2), o tempo de limpeza foi de apenas 30 minutos, e sua temperatura também foi aproximadamente 300 °C, com a mesma pressão e gases utilizados no primeiro tratamento. Depois foi acrescentado calor ao sistema também, até atingir a mesma faixa de temperatura do ensaio anterior. Entretanto, os parâmetros dos gases utilizados foram outros, comparando com o tratamento tipo 1, de tal modo que neste segundo ensaio, foram utilizados 2 SCCM de nitrogênio e 8 SCCM de hidrogênio, simultaneamente, a fim de depositar também o nitrogênio na superfície das esferas, no intuito de também formar as fases de FeN e assim aumentar também as propriedades mecânicas das esferas.

O reator utilizado está esquematizado na figura 3.1. Para melhor visualização dos parâmetros dos tratamentos 1 e 2, estão descritos na tabela 3.1.

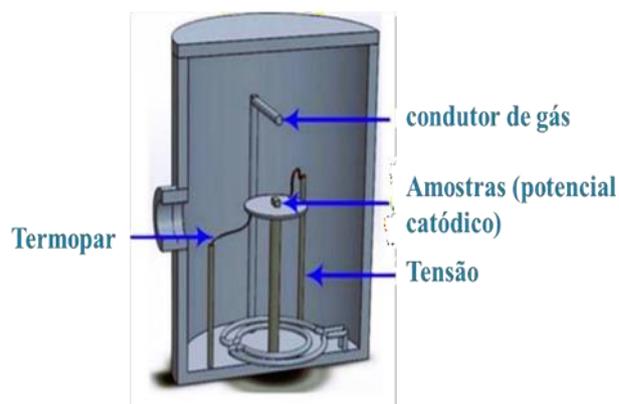


Figure 3.1 – Esquema do reator de nitretação a plasma

Fonte: Tradução de Serra et al., 2020

Tabela 3.1 – Parâmetros do tratamento de nitretação a plasma

Tratamento	Processo	Tempo	Temperatura (°C)
------------	----------	-------	------------------

80% Ar + 20% H ₂	Sputtering	60 min	300
80% Ar + 20% N ₂	Nitretação	4 horas	500 ± 20
80% Ar + 20% H ₂	Sputtering	30 min	300
80% H ₂ + 20% N ₂	Nitretação	4 horas	500 ± 20

3.2 Ensaio Tribológico Esfera-Disco

O ensaio tribológico foi conduzido com um tribômetro pino sobre disco modelo TE-165 LE-131/2014 com contato não conforme (esfera-disco). Em que a esfera foi fixada em um furo não passante, de área de sessão transversal losangular, que existe na junção de duas pequenas paredes de aços, tendo esse conjunto fixado ao equipamento [18]. Com o disco já fixado na plataforma de movimento circular constante, e as esferas fixadas ao equipamento, o ensaio tribológico foi iniciado, formando uma trilha de desgaste no disco, feito pela esfera, conforme ilustra a figura 3.2.

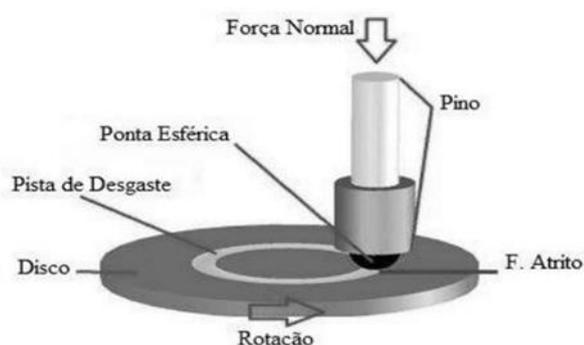


Figura 3.2 – Representação do ensaio tribológico Pino sobre o Disco.

Fonte: Cruz & Peruch (2018)

Todos os experimentos foram executados com duração de 30 min, velocidade de rotação do disco de 500 rpm, distância de deslizamento de 1094,1 m, raio da trilha de desgaste de 11,61 mm, carga de 60 N.

Ressalta-se que os ensaios foram realizados com esferas nitretadas, sob duas condições: com a presença do lubrificante óleo de motor 15W-40 e a seco. No ensaio com lubrificante, o óleo de motor 15W-40 foi aplicado na superfície do disco no início do ensaio e novamente na metade do ensaio, ambos os volumes de 1 ml dosados utilizando uma pipeta granulométrica. Essa metodologia visa manter um perfil

uniforme de camada de lubrificante ao longo do ensaio. Os parâmetros utilizados detalham-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados nos ensaios pino sobre o disco

Condições de ensaio	Seco	Com lubrificante
Volume de Óleo 15W-40	0 ml	2 ml
Carga normal (W)	60 N	60 N
Velocidade de deslizamento (V)	500 rpm	500 rpm
Distância de deslizamento	1094,1 m	1094,1 m
Raio da trilha de desgaste	11,61 mm	11,61 mm
Tempo de ensaio	30 min	30 min

3.3 Teste de Caracterização

As esferas sem tratamento, foram preparadas pra realização do ensaio de microdureza, sendo parte dela chanfrada no esmeril, lixada e polida. Elas foram fixadas no mesmo suporte do ensaio pino sobre o disco, ver figura 3.2, para que fosse possível a realização do ensaio e a comparação das microdurezas antes e após o ensaio termoquímico.

Este ensaio foi realizado utilizando o microdurometro digital do tipo MV2000A com os parâmetros de 9,96 kg de força que o indentador impôs na superfície da esfera, sendo 20 segundos de indentação.



Figura 3.2 – Esquema utilizado na esfera para o teste de microdureza
Fonte: Autor

Antes e após os ensaios tribológicos realizou-se a medição dos parâmetros de rugosidade dos discos utilizando um perfilômetro Surtronic 25 da Taylor Hobson Precision de acordo com a norma ISO 4288 (2008). Após os ensaios pino sobre disco as medições foram feitas na região da trilha de desgaste, a profundidade e largura de desgaste medida a partir da linha média, no início e final de cada área de desgaste.

Os mecanismos de desgaste e a largura das trilhas de desgastes foram visualizadas por meio de Microscópio Eletrônico de Varredura de bancada modelo TM3000, Hitachi, do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN

3.4 Usinagem do aço SAE 52100

Com o auxílio do técnico responsável do laboratório de manufatura da UFRN, foram realizados alguns processos de usinagem, para a obtenção da geometria final do aço SAE 52100, afim de simular uma pisca de rolamento do componente rolante do aerogerador.

Primeiramente, foi realizado o processo de corte, do tarugo do aço SAE 52100, com a intenção de obter discos do aço com espessura em torno dos 12 centímetros. Após isso, foi realizado um faceamento, e em seguida um torneamento

nesses discos, devido a crosta metálica do aço está envolvida de carepa, oriunda do processo de conformação que ela sofreu no processo de manufatura. Esses dois últimos processos foram realizados no torno mecânico, com auxílio do técnico responsável do laboratório, já o corte foi realizado na máquina de corte.

4. Resultados

4.1. Microdureza

Antes e após os tratamentos de nitretação mediu-se a dureza das esferas. Obtendo um resultado médio de 785 HV (em torno de 64 HRC) sem tratamento termoquímico, 635 HV (em torno de 57 HRC) com o tratamento de 80% Ar + 20% N₂, 655 HV (aproximadamente 58 HRC) para as esferas nitretadas 80% H₂ + 20% N₂ valores aos quais estão apresentados na figura 4.1, mostrando que, em vez do tratamento, teoricamente, formar uma camada superficial mais dura, os valores mostraram uma diminuição nessa dureza superficial.

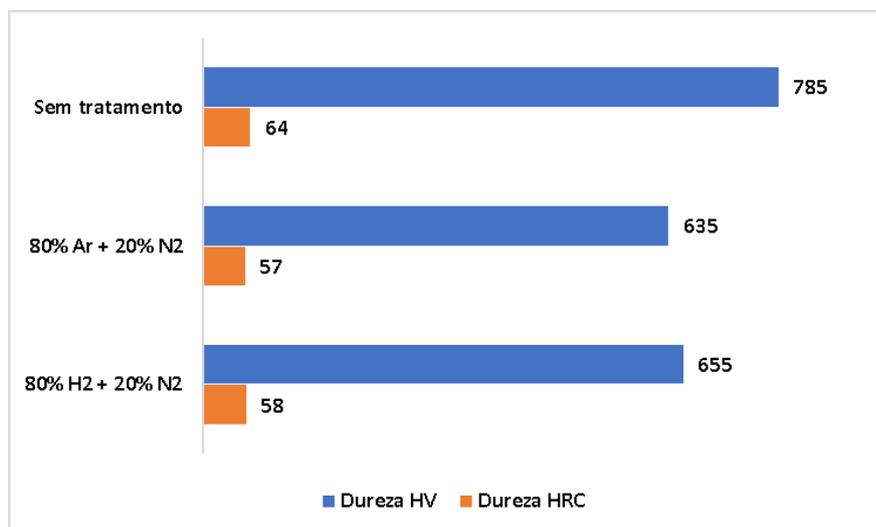


Figure 4.1 – Valores das Microdurezas das Esferas

Este resultado pode ter ocorrido devido a temperatura em que o ensaio de nitretação foi realizado, pois como a temperatura de recristalização do aço 52100 é em torno 750 °C, logo, o aço pode ter sofrido um processo de recozimento,

diminuindo suas características mecânicas, e assim influenciando no tipo de camada nitretada formada.

4.2 Análise do Coeficiente de Atrito

Os ensaios de desgaste do pino sobre disco obtiveram os seguintes gráficos tempo versus coeficiente de atrito (COF), apresentados na figura 4.1. O comportamento dos coeficientes de atrito no ensaio seco, tiveram um comportamento parecido e estável, onde é observado um aumento do COF no início do ensaio e uma diminuição após aproximadamente 90 s de duração do teste, de forma que o ensaio com a esfera nitretada com 80% Ar + 20% N₂ teve um COF médio de 0,36, enquanto que no ensaio utilizando a esfera tratada com 80% H₂ + 20% N₂ obteve um COF médio de 0,43, tendo um aumento de ~16%

Entretanto, ao adicionar lubrificante ao ensaio, observou-se uma grande instabilidade nos resultados e, o que apresentou menor COF foi o ensaio realizado com a esfera nitretada com 80% H₂ + 20% N₂, apresentando uma diferença de ~16% em relação ao ensaio com a esfera nitretada com o outro tratamento (80% Ar + 20% N₂).

Ao comparar os ensaios secos e lubrificados, observa-se que a lubrificação melhorou o desempenho antifricção do par tribológico em ~83% para a esfera tratada com 80% Ar + 20% N₂, e em ~88% para a esfera nitretada com 80% H₂ + 20% N₂. Os dados dos coeficientes de atrito médio e seus respectivos desvios padrões estão na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Coeficiente de Atrito médios dos ensaios realizados.

	COF	
	Sem lubrificante	Com lubrificante
80% Ar + 20% N₂	0,36±0,03	0,06±0,004
80% H₂ + 20% N₂	0,43±0,02	0,05±0,009

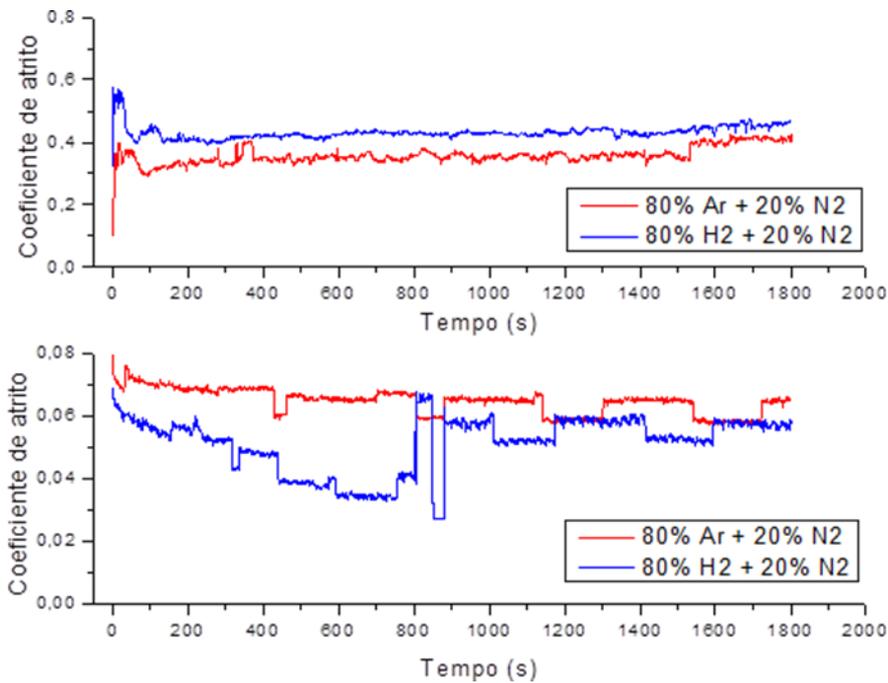


Figure 4.2 – Coeficiente de atrito pelo tempo (a) sem lubrificante (b) com lubrificante.

4.3 Análise da Trilha de Desgaste

Após realizados os ensaios, os discos tiveram suas superfícies limpidas, para serem analisadas no perfilômetro e no MEV de bancada, no intuito de analisar quais foram as dimensões dos vales e largura de desgaste provocados pelo atrito das esferas nos discos, para fazer uma comparação direta desses desgastes gerados pelas esferas tratadas, com e sem a presença do lubrificante. Foi notado que no ensaio a seco, os discos desgastados pelas esferas com tratamento tipo 1, apresentou maiores larguras, e profundidades, em relação a desgaste provocado pela esfera nitretada com tratamento do tipo 2, ver Figura 4.3 e 4.4, respectivamente. Já na análise feita no ensaio com a presença do lubrificante, o

resultado do ensaio foi obtido de forma semelhante, porém numa escala menor, o que pode afirmar que o tratamento tipo 2 melhor desempenho antidesgaste.

A Tabela 4.2 foi desenvolvida para fazer uma análise quantitativa dos resultados obtidos nos ensaios com as esferas nitretadas, com e sem a presença de lubrificante.

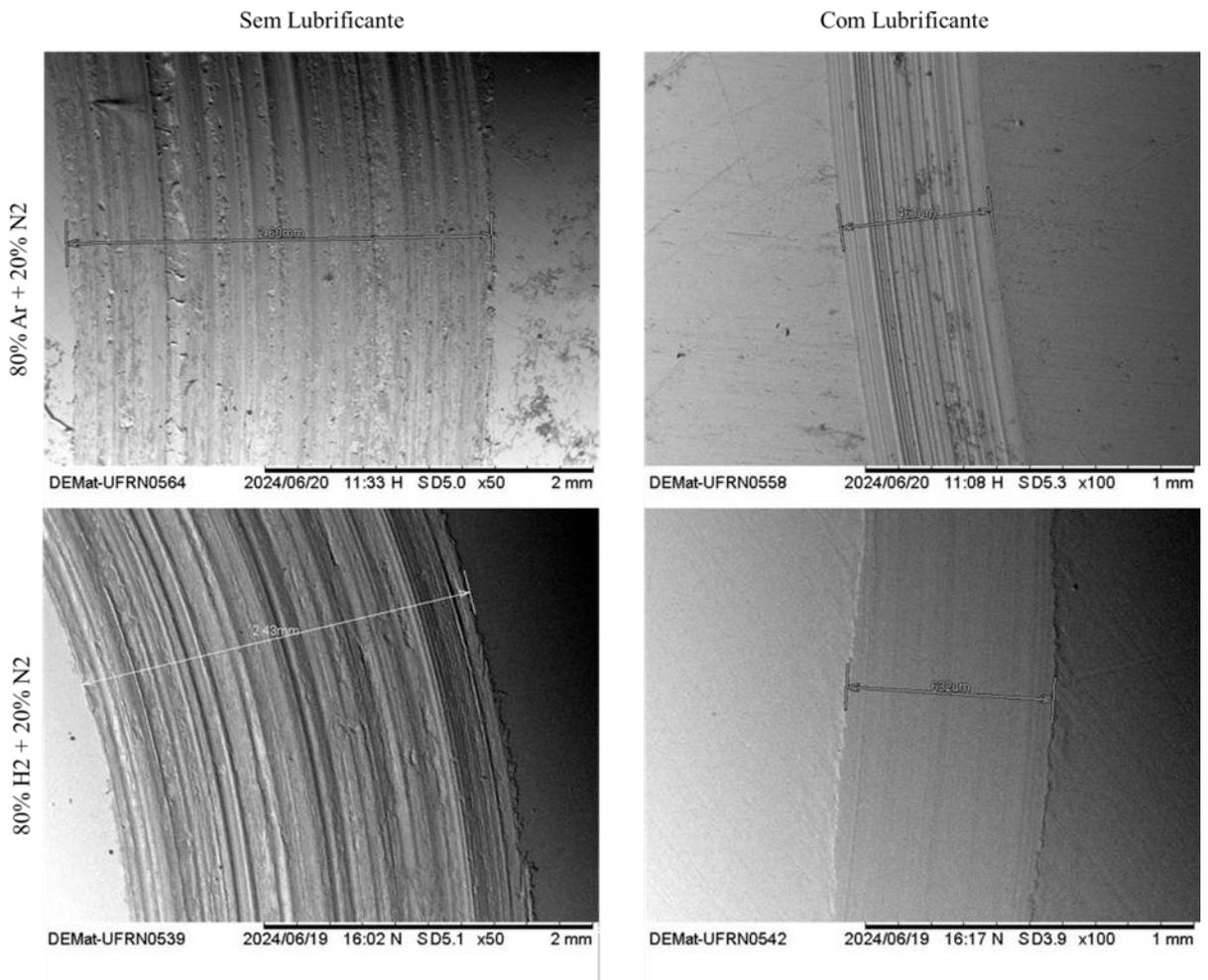


Figure 4.3 – *Larguras das Trilhas de desgastes, vista por MEV.*

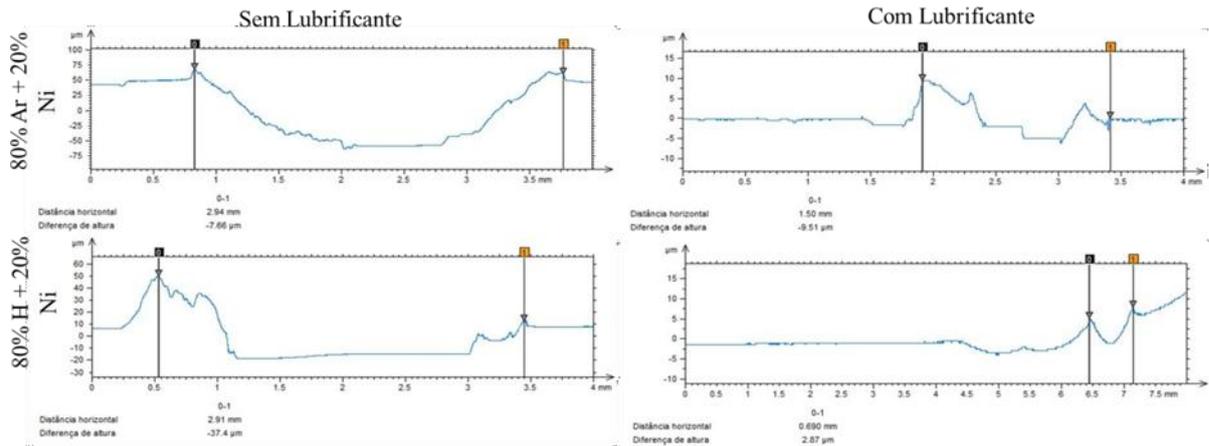


Figure 4.4 – Perfilometria da superfície dos discos desgastados.

Tabela 4.2 – Desgastes das esferas

	Sem lubrificante	Com lubrificante	Sem lubrificante	Com lubrificante
	Largura média da trilha de desgaste (mm)		Profundidade máxima (µm)	
80% Ar + 20% N₂	2,6 ± 0,13	0,461 ± 0,02	113,47 ± 5,67	4,79 ± 0,24
80% H₂ + 20% N₂	2,43 ± 0,12	0,631 ± 0,03	25,14 ± 1,26	2,50 ± 0,13

4.4 Mecanismos de Desgaste

Os mecanismos de desgaste analisados via MEV mostram que houveram muitas ocorrências de desgastes por adesão e abrasão nos ensaios sem a presença do lubrificante, sendo em sua maioria, o desgaste abrasivo. Como os materiais base do par tribológico já são de materiais duros, as partículas da camada superficial nitretada pelo tratamento do tipo 2 (80% H + 20% Ni), propiciou que nesse ensaio o desgaste abrasivo tomasse conta de boa parte da trilha. Entretanto, a medida que a trilha ganhava forma, o local mais profundo da trilha tem tido uma compensação da pressão aplicada pela esfera, devido o crescimento do contato entre esfera e disco, fazendo com que o desgaste adesivo tomasse lugar nesse espaço, sendo notável as marcas de deformação plástica.

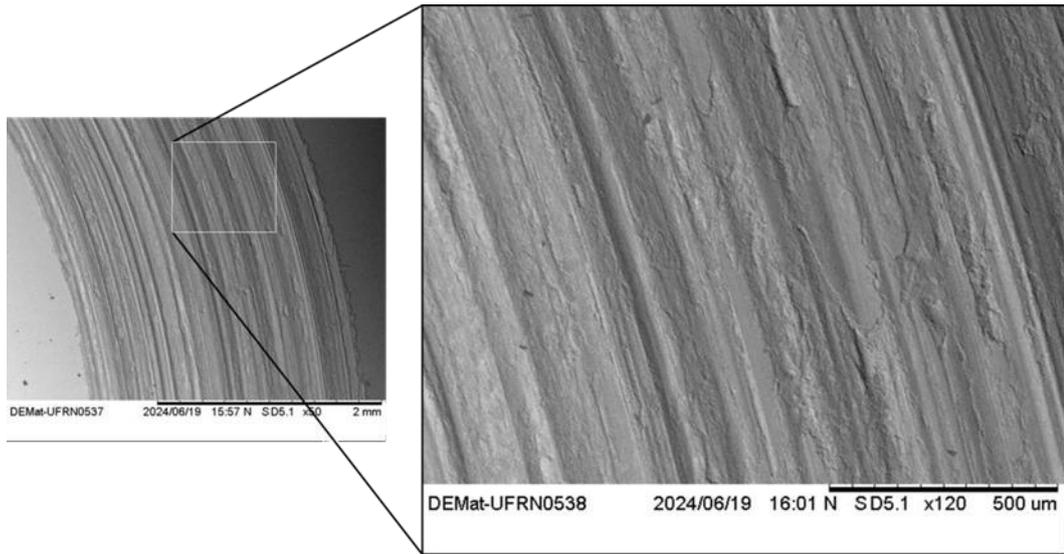


Figure 4.5 – *Microscopia eletrônica de varredura do disco desgaste a seco, pela esfera tratado com o tipo 2.*

Porém, para o tratamento do tipo 1 (80% Ar + 20% Ni), foi notado uma presença maior do mecanismo de desgaste adesivo, como visto na figura 4,4, podendo ser uma decorrência da qualidade antifricção que a camada teve, em relação ao tratamento do tipo 2.

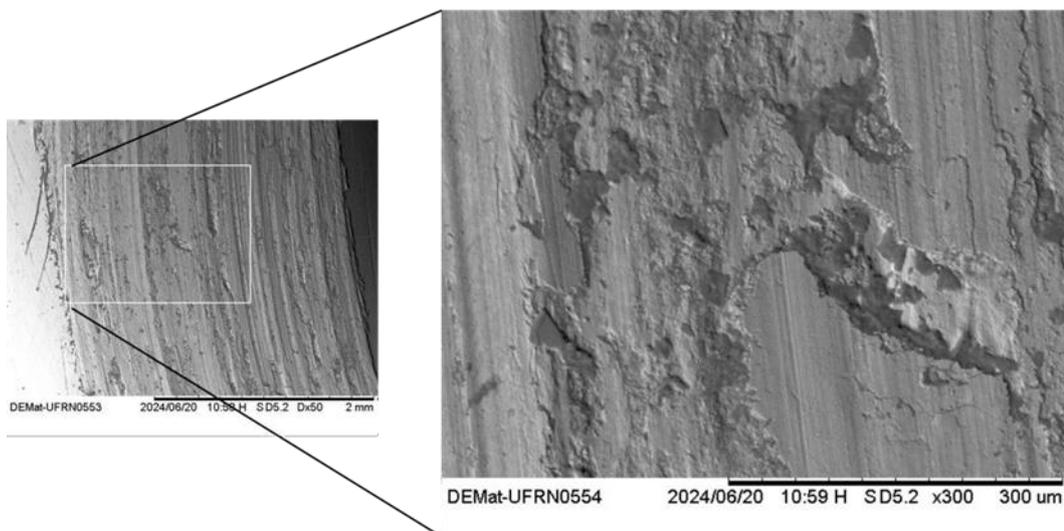


Figure 4.6 – *Microscopia eletrônica de varredura do disco desgastado a seco, pela esfera tratada do tipo 1.*

Para o ensaio com a presença de lubrificante, ambos os ensaios tiveram a presença dominante do mecanismo de desgaste por adesão, devido menor pressão de contato devido o lubrificante, porém em proporções diferentes, Houveram também poucos indícios de desgaste abrasivo, porém em menor proporção. O desgaste provocado pela esfera tratada com tratamento do tipo 1, representado na figura 4.5, apresentou muitas áreas de desgaste por adesão, assim também como áreas de deformações plásticas, como se é esperado nesse tipo de mecanismo de desgaste. Já para o desgaste provocado pelo tratamento do tipo 2, representado na figura 4,6, pouco se notou as marcas características do desgaste adesivo, contudo marcas evidentes de deformação plástica são visíveis, principalmente nas extremidades na trilha, caracterizando que ali, o desgaste abrasivo foi predominante também.

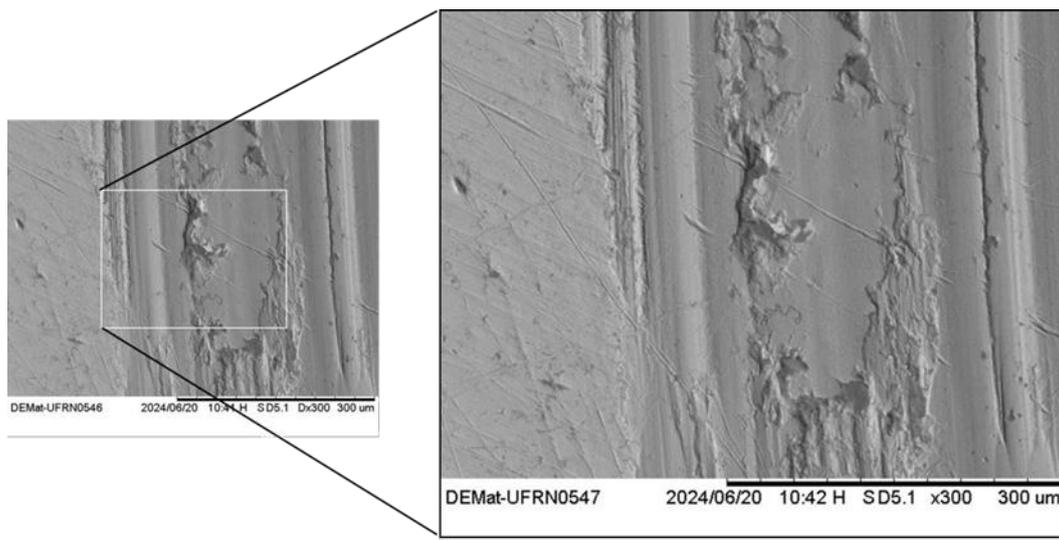


Figure 4.7 – *Microscopia eletrônica de varredura do disco lubrificado desgastado, pela esfera tratada do tipo 1.*

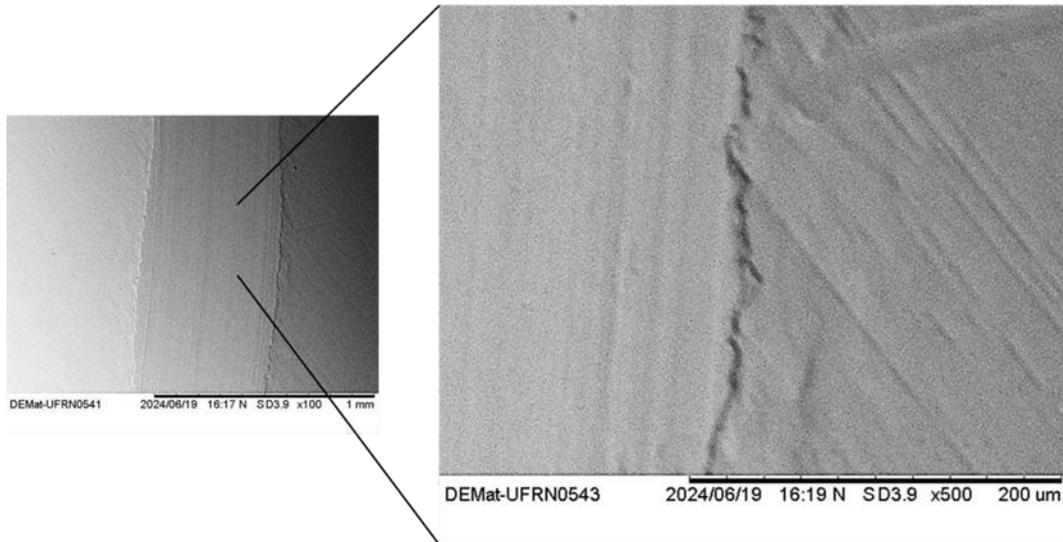


Figure 4.8 – Microscopia eletrônica de varredura do disco lubrificado desgastado, pela esfera tratada com o tipo 2.

5. Considerações finais

Os ensaios de nitretação a plasma nas esferas SAE 52100 proporcionou melhorias significativas nas características tribológicas do aço, reduzindo o coeficiente de atrito e a formação da trilha de desgaste nos discos SAE 1045.

Apesar da temperatura do processo ter causado um amolecimento do substrato do aço SAE 52100, o tratamento de nitretação a plasma foi eficaz em criar uma camada superficial que reduziu significativamente as taxas de desgaste nos ensaios pino sobre disco. A influência do gás inerte utilizado nos tratamentos modificou algumas características na superfície nitretada, fazendo com que a camada desempenhasse melhor serviço antidesgaste quando na presença o gás hidrogênio (tratamento tipo 2). Quando o lubrificante passou a fazer parte do ensaio, a diferença significativa no desgaste diminuiu entre os tratamentos realizados, porém ainda tendo o ensaio com hidrogênio como melhor resultado antidesgaste.

6. Referências

- [1] Global Wind Energy Council, Global Wind Report 2024, Brussels, Belgium, 2024. <https://gwec.net/global-wind-report-2024/> Acesso: 12 de julho de 2024
- [2] Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), Boletim Anual 2023, 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/> Acesso: 12 de julho de 2024
- [3] Núcleo de planejamento estratégico contínuo da Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Norte (Fiern), Mapa das Energias Renováveis do Observatório da Indústria Mais RN, Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiYjk3MDRiMzgtMTA5NS00ZWZjLWExN2EtYzllOTk4OGMzYzViliwidCI6IjhmMDYyNWl4LTkzM2YtNDM3Yi1iNDE4LTA5NTcxZTY5YmZINCj9&pageName=ReportSection8fd1f6f47c2ba0e50e8d>, Acesso: 12 de julho de 2024.
- [4] Peng, Han, et al. "Review of tribological failure analysis and lubrication technology research of wind power bearings." *Polymers* 14.15 (2022): 3041.
- [5] Entenda os problemas das turbinas eólicas da Siemens Gamesa no Brasil, 11 de julho de 2023 - Atualizado em 20 de setembro de 2023, em Empresas, Eólica, Disponível em: <https://epbr.com.br/entenda-os-problemas-das-turbinas-eolicas-da-siemens-gamesa-no-brasil/>. Acesso: 12 de julho de 2024.
- [6] Holmberg, K., Erdemir, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction* 5, 263–284 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- [7] McKenna R, vd Leye PO, Fichtner W. Key challenges and prospects for large wind turbines. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;53:1212–21.
- [8] R. Grün e H.-J. Günther, "Plasma nitriding in industry—problems, new solutions and limits", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 140, p. 435–441, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90459-Z](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90459-Z).
- [9] Dhanola A, Garg HC. Tribological challenges and advancements in wind turbine bearings: A review. *Eng Fail Anal.* 2020;118:104885.
- [10] Greco, A, et al. Material wear and fatigue in wind turbine Systems. *Wear*, Argonne National Laboratory, United States and National Renewable Energy Laboratory, United States, volume 302, issues 1–2, p. (1583-1591), Received 20

November 2012, Revised 17 January 2013, Accepted 18 January 2013, Available online 11 February 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.060>

[11] Alves Junior C. Nitretação a plasma: fundamentos e aplicações. Natal: EDUFRRN, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/1/11807>.

[12] Sousa RRM de, Moura YJL, Sousa PAO de, Medeiros Neto JQ, Costa THC, Alves Junior C. Nitriding of AISI 1020 steel: comparison between conventional nitriding and nitriding with cathodic cage. *Materials Research* 2014;17(3): 708-13. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000027>.

[13] Spalvins T. Plasma assisted surface coating/modification processes: an emerging technology. In: First International Ion Nitriding Conference consponsored by the American Society of Metals and NASA Lewis Research Center; 1986 Sept 15-17: Cleveland, Ohio. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870003275.pdf>.

[14] Brunatto SF, Muzart JLR, Klein AN. Nitretação por plasma de ferro sinterizado. In: 10 CBECIMAT; 1992; Águas de Lindóia, SP. Anais do 10 CBECIMAT, 1992. v. 1. p.847-850.

[15] Basso RLO, Figueroa CA, Zagonel LF, Pastore HO, Alvarez DWF. Effect of carbon on the compound layer properties of AISI H13 tool steel in pulsed plasma nitrocarburizing. *Plasma Processes and Polymers* 2007;4(S1):S728-S731. <https://doi.org/10.1002/ppap.200731806>.

[16] [Alves Junior C, Rodrigues JA, Martinelli AE. The effect of pulse width on the microstructure of d.c.-plasma-nitrided layers. *Surface & Coatings Technology* 1999;122(2-3):112-17. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00326-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00326-6).

[17] DANELON, Miguel Rubira et al. Estudo do efeito da nitretação iônica a plasma na resistência ao desgaste do aço SAE 1020 utilizado em matriz de conformação. 2020.

[18] Pacheco, A. P. (2021). Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de aço 1045.

[19] Cruz, W. R., & Peruch, F. (2018). ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO ENTRE AS LIGAS DE BRONZE SAE 67 E SAE 841. *Revista Vincici-Periódico Científico do UniSATC*, 3(1), 120–144.

[20] Serra, P. C., Barros Neto, J. R. de, Furtado, A. S. A., Sampaio, W. R. V., Feitor, M. C., Costa, T. H. de C., & Sousa, R. R. M. de. (2020). Estudo de nitretação a

plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido. Matéria (Rio de Janeiro), 25, e-12772.