

DEPOSIÇÃO DE FILMES DE NITRETO DE BORO PARA REDUÇÃO DO ATRITO EM COMPONENTE DE ARMAS

Brian Wenzel Cavalheiro - briancavalheiro@hotmail.com

Johnny Laires Adams - adamsjohnny10@outlook.com

Carlos Alberto Monezi de Oliveira (Orientador) - carlos.oliveira@mackenzie.br

RESUMO

Nesse artigo realizamos um estudo sobre deposição de Nitreto de Boro hexagonal por tecnologia de plasma e apresentamos os resultados obtidos das deposições realizadas no laboratório. Filmes finos de nitreto de boro foram depositados pelo método de deposição física de vapor sobre substratos de aço 4140 e silício com o objetivo de reduzir atritos e aumentar a resistência superficial para evitar falhas em componente de armas. Foram realizadas duas deposições alterando a potência da fonte RF, a primeira com 226W de potência e pressão de gás na câmara de vácuo de $8,0 \times 10^{-3}$ Torr. Para a segunda deposição a potência da fonte RF foi alterada para 135W e a pressão de gás na câmara de vácuo aumentou para $9,7 \times 10^{-3}$ Torr. A temperatura dos substratos variou de 32°C a 44°C. A razão de gases utilizada para ambas as deposições foi 75% de argônio e 25% de nitrogênio. O tempo para deposições foi de 60 minutos. Após as deposições foram feitos estudos da superfície como difratômetro de raio X, ensaio de tribologia e microscopia de força atômica, para identificar as novas propriedades metalográficas da superfície e se houve a deposição do nitreto de boro em sua forma hexagonal. Obtivemos um resultado satisfatório nas deposições e no ensaio de tribologia. No microscópio de força atômica não foi possível determinar a espessura do filme depositado. De forma geral, a deposição de hBN teve êxito ao reduzir o coeficiente de atrito e aumentar a resistência superficial.

Palavras-chave: Nitreto de Boro Hexagonal. Redução de atrito. Deposição física de vapor

DEPOSITION OF BORON NITRIDE FILM TO REDUCE FRICTION IN WEAPONS COMPONENT

ABSTRACT

In this article, it was investigated about the deposition of thin hexagonal boron nitride films by plasma technology. It presents all results obtained in the laboratory. Boron nitride thin films were deposited on 4140 steel and silicon substrates. The intention of the study is to increase wear resistance and decrease the friction coefficient in order to prevent failures in weapon components. Two different power sources were used at temperatures that ranged from 32°C to 44°C. The gas ratio used was 75% argon and 25% nitrogen. In the first deposition 226W of power was used in the RF source and the gas pressure in the vacuum chamber was kept at $8,0 \times 10^{-3}$ Torr. In the second deposition the power changed from 226W to 135W and the gas pressure kept at $9,7 \times 10^{-3}$ Torr. The deposition time took 60 minutes to be concluded. In order to identify the new properties from the deposition thin layer, the X-ray diffractometer, tribology test and AFM tests were performed on the samples. It obtained satisfactory results in the depositions and tribology tests. In the AFM test it was not possible to measure the thin layer of film. In a general way the deposition of hBN was a success in reducing friction coefficient and increasing wear resistance.

Keyword: Hexagonal Boron Nitride. Friction reduction. Physical vapor deposition.

1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, o interesse da indústria metalmeccânica aumentou consideravelmente sobre a deposição de diferentes nitretos de metais em finas camadas sobre equipamentos metálicos para o aprimoramento das propriedades mecânicas como o aumento da dureza, redução do atrito, aumento da condutividade e capacidade térmica, redução da rugosidade, assim também para objetivos de proteção como desgaste a corrosão.

O nitreto de boro, analisado neste trabalho, é um composto que apresenta quatro fases diferentes, são elas nitreto de boro cúbico (cBN), wurtzítico (wBN), hexagonal (hBN) e romboédrico (rBN), porém suas estruturas são diferentes. O nitreto de boro cúbico e wurtzítico têm estruturas similares ao diamante, sendo um material de alta

dureza, já o nitreto de boro hexagonal e romboédrico apresenta estruturas similares ao grafite.

O hBN por apresentar uma estrutura similar ao grafite também é utilizado como um lubrificante sólido, seu coeficiente de atrito se mantém entre 900°C e 1000°C e possui uma capacidade de lubrificar em um grande intervalo de temperaturas. Sua condutividade térmica é elevada, possui alta resistência mecânica, alta dureza, baixa expansão térmica, baixa rugosidade e seu ponto de fusão é próximo de 2600°C. Essas propriedades tornam o hBN um material ideal para ser depositado em superfícies de ferramentas para prevenir o desgaste.

O hBN pode ser depositado em finas camadas sobre diversos tipos de substratos a partir de um processo chamado PVD (Deposição física de vapor), baseada em um sistema à vácuo, onde se aplica uma tensão entre o cátodo (objeto alvo) e o ânodo (substrato), por meio de uma fonte, gerando uma descarga elétrica luminosa, o plasma. O material a depositar (alvo) é bombardeado por íons, os quais removem os átomos da superfície do alvo e depositam-se no substrato. É possível depositar camadas de espessuras entre 0,2 μ e 2 μ .

A indústria bélica nacional tem enfrentado problemas com mal funcionamento em equipamentos fornecidos às forças de segurança pública. Um método de solucionar esses problemas é o de manutenção preventiva de equipamentos. A pesquisa envolve um método de prevenção novo que visa por meio da aplicação do hBN, por PVD, nas superfícies que sofrem maior desgaste por atrito e sejam lubrificadas naturalmente com a camada de hBN.

Este trabalho tem a finalidade de apresentar um estudo sobre a deposição de finas camadas de hBN, em peças de armamentos leves, para auxiliar na prevenção de desgastes, panes e falhas, contribuindo à redução de custos de manutenções, aumento da confiabilidade e maior segurança dos equipamentos para a utilização das forças armadas e atiradores esportivos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS

Diversos estudos estão se desenvolvendo com vista à constante evolução dos materiais. A tecnologia de depositar finas camadas permite alterar as propriedades físicas e químicas apenas na superfície, visando o aumento de sua vida útil. A deposição constitui processos utilizados para desenvolver novos materiais e ligas que não são comumente encontrados na natureza, afirma Blando (2005, p. 25).

O termo “filme fino” refere-se a recobrimentos de até 300 μ m que devem ser aderentes à superfície (substrato), ser quimicamente estável no ambiente utilizado, ter espessura uniforme, deve ser puro ou ter composição controlável e deve ter baixa densidade de defeitos, segundo Mello (BROWN *et al.*, 2005).

Uma quantidade enorme de dispositivos modernos presentes em nossa vida carrega de alguma forma a tecnologia dos filmes finos, segundo Moura (2010). Assim também afirma Carvalho (2016), a substituição de materiais convencionais por outros mais eficientes é de enorme interesse das indústrias metal mecânicas e vem sendo utilizadas por diversos campos da engenharia e setores médicos. Observa-se que esta técnica utilizada é amplamente abrangente em diversos setores e o uso da deposição tende a ser cada vez maior.

Existem variedades de processos para produzir filmes finos, porém independente de qual for há duas etapas básicas de formação, a nucleação e o crescimento. Quando átomos colidem com uma superfície eles podem se difundir a ela ou não. Uma fração dos átomos adsorvidos pode iniciar a formação de uma ilha, que poderá crescer de tamanho e coalescer, formando um filme contínuo, afirma Tentardini (2004).

2.2 NITRETO DE BORO

O nitreto de boro é um composto entre boro e nitrogênio unidos através de ligações covalentes. Não é encontrado livremente na natureza e precisa ser produzido sinteticamente. Pode ser encontrado em pelo menos quatro fases cristalinas diferentes, são elas hexagonal (hBN), romboédrico (rBN), cúbico (cBN) e wurtzítico (wBN), apresentando cada uma dessas estruturas, características e propriedades diferentes. As

primeiras duas fases são compostas por ligações hibridizadas sp^2 , e as outras por ligações entre orbitais sp^3 .

A gama de possíveis aplicações técnicas e tecnológicas de filmes finos de nitreto de boro é vasta, afirma Langhi (2009). Segundo ele, é possível conseguir diversas propriedades combinando diferentes fases cristalinas do BN. Tal fato pode ser comprovado com os estudos desenvolvidos pela Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo (v.23, 2006), a qual demonstra que um filme misturando camadas de c-BN e h-BN pode ter funções de contra desgaste e deslizantes. Estudo de Santos (2014) afirma que o nitreto de boro possui por característica a propriedade de não conduzir bem a eletricidade, porém conduz o calor tão bem quanto os metais.

O nitreto de boro pode ser utilizado em diversas aplicações industriais. “É importante na fabricação e no revestimento de ferramentas, como, por exemplo, proteção em escudos e roupas à prova de balas; revestimento de peças industriais sujeitas à forte abrasão; protetor contra radiação e contra o choque de micrometeoritos, entre outras” (SANTOS, 2014, p. 15).

Os estudos apresentados sobre o nitreto de boro refletem as inúmeras vantagens de sua utilização. Uma análise a partir de testes em laboratórios nos permitiu indicar as vantagens da deposição sobre o material utilizado em armamentos os quais as manutenções preventivas são realizadas.

2.2.1 Nitreto de boro hexagonal

O nitreto de boro hexagonal (hBN) é uma substância com aspecto de pó, fino e branco, composto de uma estrutura de camadas semelhante ao grafite, possui estrutura hexagonal ocupadas por átomos de boro e nitrogênio ocupando vértices de hexágonos ligadas através de ligações covalentes sp^2 . Cada átomo de boro se liga a três átomos de nitrogênio por célula unitária.

O hBN possui propriedades físicas e químicas como condutividade térmica elevada, baixa densidade, alta resistência mecânica, dureza elevada, ponto de fusão próximo aos 2600°C , resistência à oxidação e é utilizado como lubrificante sólido pela alta capacidade de lubrificar em um longo intervalo de temperaturas, já que o seu coeficiente de atrito é mantido até os 900°C . Demais lubrificantes como o grafite e

dissulfeto de molibdênio queimam em temperaturas muito menores, assim demonstrando a eficácia do hBN.

2.3 DEPOSIÇÃO FÍSICA DE VAPOR

A técnica de revestimento de superfícies PVD surgiu pela primeira vez após os estudos e relatos de William Robert Grove em 1852, onde descreveu os métodos da desintegração catódica, que conseqüentemente levou ao início do estudo do processo de pulverização catódica, afirma Sarmiento (2013).

A técnica de pulverização catódica ou *sputtering* consiste num método de deposição de finas camadas de diversos materiais em qualquer superfície desejada. Para esse processo é usado um equipamento com uma câmara a vácuo onde contém os dois dielétricos, o alvo, o substrato e o gás inerte.

Para que ocorra o processo, uma fonte gera uma diferença de potencial entre os dois dielétricos transformando o gás inerte em plasma. Com o campo magnético gerado pela fonte os elétrons do gás aceleram colidindo entre si formando elétrons secundários, por conseguinte forma-se colisões em forma de cascata como afirma Carvalho (BLANDO, 2005; SESHAN, 2001; TENTARDINI, 2004).

Após os íons serem acelerados e obterem energia cinética superior que a energia de ligação dos átomos do alvo, começa o processo de arrancar átomos do alvo pela colisão dos íons no alvo, com isso átomos do alvo estarão livres para se depositarem no substrato desejado.

2.3.1 PVD por radiofrequência

Outro método de realizar a deposição é por meio de radiofrequência. Ao utilizar uma fonte de radiofrequência há a possibilidade de depositar qualquer material, condutores e não condutores.

Este método consiste no uso de uma fonte de corrente alternada que proporciona um sinal alternado de alta frequência. O qual ioniza o gás inerte, possibilitando o bombardeamento do alvo com esses íons energizados, conseqüentemente arrancando átomos que serão depositados no substrato.

Com este método utiliza-se ímãs perto do catodo para poder capturar elétrons livres, proporcionando uma mais rápida e melhor deposição do material desejado no substrato. Além disso, com a alternância de corrente há uma limpeza natural do substrato, podendo haver uma deposição mais uniforme.

O método de RF é considerado um dos melhores, por poder usar uma menor pressão, depositar mais uniformemente, economizar energia, além de poder utilizar qualquer material para depositar, como afirma Carvalho (MOURA, 2010; OHRING, 1992).

2.4 ARMAS DE FOGO E PARTES CONSIDERÁVEIS

O objeto arma de fogo é uma categoria de arma capaz de arremessar um projétil empregando a força da expansão de gases gerados pela combustão de um propelente confinado em uma câmara, ao mesmo tempo este projétil está alinhado a um cano que propicia a continuação da queima do propelente, a direção e estabilidade do projétil. As armas de fogo são normalmente produzidas com dois aços dependendo da empresa, são eles o SAE 1070 e o SAE 4140. Além deles dependendo do modelo pode ser utilizado outros aços da família do SAE 41XX além de componentes com outras ligas especiais, polímeros e madeira.

2.4.1 Ferrolho

O mecanismo do ferrolho é uma parte de suma importância do conjunto. Esta peça é responsável pelo carregamento da câmara com uma nova munição e de sua queima, propiciando o disparo da munição e o arremesso do projétil. Existem três variações de ferrolho, por ação de mola, por ação manual e por ação de gás.

2.4.2 Cano

O cano da arma de fogo é uma parte crucial do sistema, pois é responsável por direcionar o projétil e prolongar a queima do propelente.

2.4.3 Rampa de alimentação

A rampa de alimentação é responsável pelo direcionamento da munição do carregador para o cano e a câmara de combustão. Este componente pode ser fabricado de

duas maneiras distintas, acoplado diretamente ao cano, formando uma única peça, ou uma peça independente ao cano. Atualmente a maioria dos modelos possuem o cano e a rampa em uma única peça.

2.5 MANUTENÇÃO EM ARMAMENTOS PORTÁTEIS

Armas portáteis são equipamentos que seu operador consegue individualmente transportar o seu equipamento sem ajuda de nenhum outro equipamento, como pistolas, fuzis e carabinas.

Esses equipamentos precisam de um rigoroso controle de qualidade e manutenção. Como em todo curso de capacitação para uso de armas de fogo é ensinado a manutenção e limpeza do armamento. Tendo em vista isso, as forças de segurança fazem ao máximo para sempre estar em dia a manutenção preventiva dos equipamentos. Pois como qualquer peça mecânica, as armas precisam ser lubrificadas, limpas e verificadas.

Com todo esse ritual de controle é possível saber quais os equipamentos que possam estar desgastados pelo uso. O Batalhão de Manutenção e Suprimento de Armamento (BMSA) do exército brasileiro se tornou especialista em logística reversa, para poder realizar uma melhor manutenção dos equipamentos do exército, como afirma Junior (2019).

Embora o exército tenha um Batalhão especializado em manutenção de armamentos, as forças de segurança do país ainda sofrem com a falta de equipamentos de qualidade. Como vimos nos últimos anos, inúmeros departamentos de polícia têm procurado por equipamentos melhores visando a compra de melhores equipamentos, mas pecam na falta de manutenção.

2.5.1 Danos causados por falta de manutenção

Os equipamentos utilizados pelas forças de segurança no geral sempre têm desgaste acima do normal, por seu uso diário e excessivo. São armas que enfrentam o crime organizado e tentam manter a lei e ordem do país.

Tendo em vista que são equipamentos muito requisitados, sempre ocorrem falhas e inúmeros desgastes que fazem o governo gastar dinheiro com manutenção, ao invés de

fazer uma manutenção preventiva e inspeção de tempos em tempos. Com esses problemas ocorrem falhas fatais que podem colocar o operador em situação de morte.

Existem inúmeras maneiras de uma arma falhar, mas um problema pouco abordado é relacionado ao desgaste das peças e falhas causadas por atritos entre os mecanismos. Por causa da sujeira presa nas peças do armamento há o aumento de atritos internos, que são superiores a força da mola recuperadora, causando uma pane de alimentação por não conseguir fechar corretamente o ferrolho da pistola como afirma Berbecka (2018).

Por isso deve-se manter uma constante limpeza e manutenção os equipamentos usados pelas forças de segurança, pois além do desgaste ainda há em certos lugares do Brasil o compartilhamento de armamentos, os quais devem sempre estarem em condições de pronto uso como explica Berbecka (2018).

2.6 AÇO SAE 4140

O aço SAE 4140 é comumente utilizado na indústria mecânica para produção de equipamentos e peças que necessitem de um material com boa tenacidade e resistência. Um aço de liga de baixo carbono. Essa liga contém em torno de 0,40% de carbono além de ter Cromo ($\approx 1\%$) e Molibdênio ($\approx 0,2\%$) em sua composição, o que após tratamento térmico e revenimento alcança-se boas propriedades mecânicas como cita Rasma (2015).

A indústria bélica tem feito uso desse aço para a manufatura de peças de armas, as quais são exigidas muito esforço interno por causa das altas pressões dos gases. Com um preciso tratamento térmico e revenimento o aço fica com proporções ideais para as armas de fogo, mesmo assim por causa do atrito entre as partes há um desgaste nas peças. A tabela 3 mostra as propriedades mecânicas do aço SAE 4140.

3 METODOLOGIA

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Uma barra de aço SAE 4140 de 25 milímetros de diâmetro foi cortada em 5 amostras de 5 milímetros de espessura. Após o corte, as superfícies das amostras foram lixadas e polidas com o auxílio de uma politriz metalográfica. Os corpos de prova foram preparados seguindo os princípios da norma NBR 13284 para corpos de prova

metalográficos, garantindo a planicidade e superfície lisa, características fundamentais para a deposição do filme de hBN.

Antes de realizar a deposição, as amostras foram submersas em um sistema de limpeza por ultrassom durante 30 minutos, utilizando acetona e água deionizada em temperatura ambiente e frequência ultrassônica de 40 kHz.

3.2 DEPOSIÇÃO DOS FILMES FINOS

A deposição dos filmes finos de NB nas amostras foram realizadas no reator de plasma a frio da Kurt J. Lesker utilizando os processos de PVD (deposição de física de vapor) com uma fonte de radiofrequência. Ao total foram realizadas duas deposições.

O alvo utilizado foi de nitreto de boro hexagonal (hBN) sinterizado com 99,5% de pureza, com diâmetro de 2 polegadas e espessura de 0,25 polegada. Foi adotada ao processo a mistura de gases Argônio e Nitrogênio, sendo 75% Ar e 25% N₂. A tensão de polarização da amostra (BIAS) adotado foi de -30V. O tempo para ambas as deposições foram de 60 minutos. O parâmetro escolhido para ser alterado foi a potência da fonte, sendo 226W na primeira deposição e 135W na segunda deposição. Observamos que outros dois parâmetros alteraram após a mudança da potência da fonte, A pressão do trabalho do gás alterou de $8,3 \times 10^{-3} Torr$ da primeira deposição para $9,7 \times 10^{-3} Torr$ na segunda deposição. Já a temperatura, ambas começaram em 32°C, mas ao longo das deposições, com a potência a 226W a temperatura do substrato chegou a 44°C ao decorrer dos 60 minutos, enquanto com a potência da fonte a 135W a temperatura chegou a 35°C. Pudemos observar que houve um aumento da temperatura do substrato com o aumento da potência da fonte.

3.3 DIFRATÔMETRO DE RAIOS X

Para analisar a estrutura cristalográfica do material depositado, foi utilizado o difratômetro de raio X de bancada MiniFlex II. A análise foi realizada comparando o gráfico do padrão de difração coletado das amostras depositadas com os padrões de difração já existentes em uma base de dados. Essa análise foi realizada instantes após retirar o substrato de silício com o alvo depositado.

3.4 ENSAIO DE TRIBOLOGIA

Para realizar esse ensaio, foi necessário utilizar o tribômetro de pino sobre disco da Anton Paar, modelo TRB³. Esse ensaio foi necessário para poder identificar e comparar os coeficientes de atrito dos substratos, com e sem deposição.

O ensaio foi realizado em duas amostras, uma com deposição e outra sem. Nas duas amostras foram utilizados o modo linear recíprocante, com deslocamento de 10 mm, velocidade de 10 cm/s e 5000 ciclos. Para fazer a medição foi utilizado um pino de aço AISI de diâmetro de 6 mm com a carga de 1 N. Foi utilizado apenas um pino, pois tem uma melhor reprodutibilidade para verificar o coeficiente de atrito e desgaste das amostras.

3.5 MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA

Foram realizados quatro ensaios com a mesma amostra de aço SAE 4140, apenas mudando a área de ensaio, realizados em áreas definidas após a imagem preliminar do microscópio. Para realizar os ensaios foi utilizado um microscópio de força atômica da Anton Paar, modelo Tosca 400, o equipamento estava sobre uma mesa de isolamento de vibração, modelo Tosca ACCURION i4 Medium. O intuito dos ensaios foi realizar desenhos em 3D do relevo da amostra e do filme depositado.

No primeiro ensaio foi utilizado uma área de 100 μm^2 , onde aparentemente teria um degrau entre o filme depositado e o aço SAE 4140, onde seria possível medir a espessura do filme depositado.

O segundo ensaio foi realizado em uma parte da superfície onde não teve deposição. A área analisada foi de 45 μm^2 . Essa leitura serve para comparar a superfície do material sem recobrimento com a superfície após o recobrimento.

Os outros dois ensaios foram realizados em duas áreas distintas de 50 μm^2 , as quais visualmente aparentavam ter colorações diferentes. Além de poder comparar as duas áreas entre si, também foi possível compará-las com a área sem deposição.

3.6 NANOINDENTAÇÃO

O ensaio de nanoindentação foi realizado no nanoindentador NHT³ da Anton Paar, projetado para medir dureza, módulos de elasticidade, deformação e outras propriedades da superfície, desde a escala nanométrica até a micrométrica.

O ensaio foi realizado no modo SINUS, utilizando uma carga de 50 mN. Para base de cálculos foi utilizado o coeficiente de Poisson igual a 0,30.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico será abordado e discutido os resultados obtidos nos ensaios de deposição, análise de difratômetro de raio-X, ensaio de tribologia, microscopia de força atômica e ensaio de nanoindentação.

4.1 DEPOSIÇÃO DOS FILMES DE HBN

Foram realizadas duas deposições com diferentes parâmetros na potência da fonte RF. Em cada deposição foram usados dois substratos, sendo uma lâmina de silício e um substrato de aço SAE 4140.

A primeira deposição foi a mais satisfatória, a qual teve o melhor aderimento do filme no substrato de silício e no substrato de aço SAE 4140. Houve uma leve delaminação do filme na borda de cada amostra após alguns instantes ao retirar de dentro do reator de plasma, embora a maior parte do filme aderiu-se a ambos os substratos.

Na segunda deposição também houve um resultado satisfatório na deposição sobre o substrato de aço SAE 4140, o qual o filme se aderiu, porém para a lâmina de silício, houve uma delaminação crescente até o desaparecimento completo do filme após alguns dias da deposição, impossibilitando de realizar estudos mais profundos das características metalográficas.

Pela análise visual dos substratos após as deposições, pudemos observar que tivemos êxito na formação de finas camadas utilizando o alvo de nitreto de boro, apresentando na superfície uma coloração diferente, embora tenha delaminado parcialmente nas bordas dos substratos. Foi observado que houve uma diferença na quantidade de delaminação ao mudar os parâmetros de deposição. Portanto é

recomendado que mais estudos sejam realizados com diferentes parâmetros para melhor adesão dos filmes depositados à superfície.

Figura 1: Substrato de aço 4140 após deposição



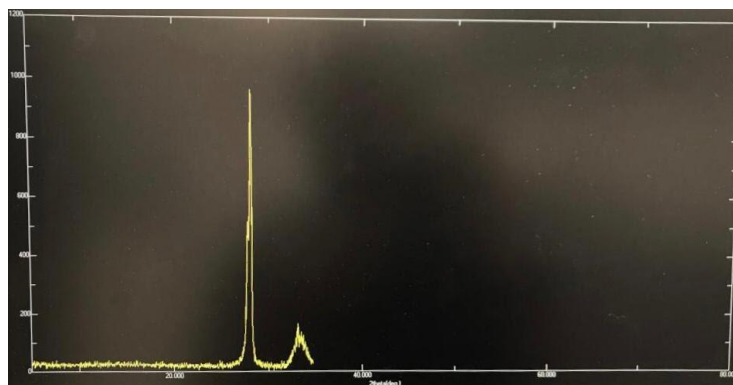
Fonte: Próprios autores

4.2 ANÁLISE DE RAIOS X

A análise de raios X da primeira amostra foi satisfatória. Foi identificado em torno de 30 graus um pico similar ao pico de hBN, com essa informação é possível caracterizar que pelo menos em uma parte do substrato foi depositado um filme fino contendo hBN. Embora que tenha essa similaridade gráfica, não é possível afirmar que houve realmente a deposição de hBN ou que houve deposição de hBN em algumas regiões da amostra.

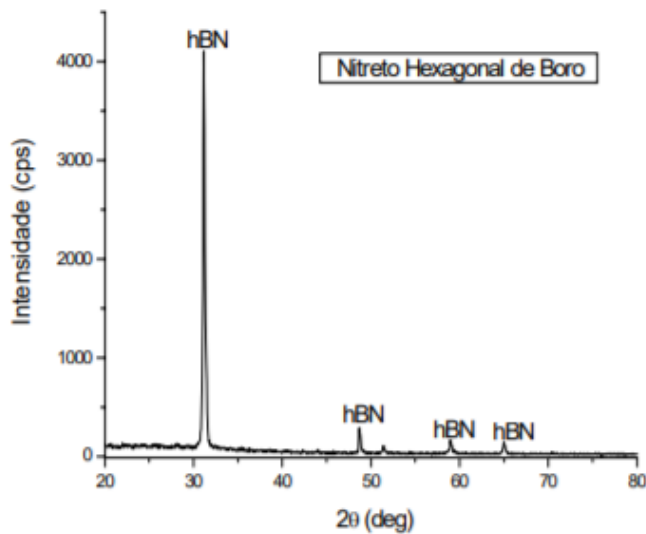
A análise de raios X da primeira amostra foi satisfatória. A figura 2 mostra que foi identificado em torno de 30 graus um pico muito similar ao pico de hBN mostrado na figura 3, sendo possível caracterizar que houve a deposição de um filme fino contendo hBN.

Figura 2 - Pico do hBN, Amostra 1



Fonte: Ensaio realizado no pelos autores no laboratório do MackGraph

Figura 3: Pico do hBN



Fonte: RAMALHO (*et al.*, 2007)

4.3 ENSAIO DE TRIBOLOGIA

Os ensaios de tribologia tiveram êxito. Através desse ensaio foi possível identificar o coeficiente de atrito da amostra polida sem recobrimento e da amostra com recobrimento. Além disso, foi possível identificar a taxa de desgaste das duas amostras.

Após encontrar os dois coeficientes de atrito, foi possível comparar e analisar que o objetivo de diminuir o atrito com a deposição de hBN foi atingido. A amostra sem recobrimento apresentou o coeficiente de atrito entre 0,69 e 0,70 enquanto a amostra com recobrimento apresentou o coeficiente de atrito menor, entre 0,64 e 0,65.

Os resultados referentes à taxa de desgaste também foram positivos. O substrato sem recobrimento teve uma taxa de desgaste médio de $2,44 \times 10^{-5}$, já o substrato com recobrimento teve uma taxa de desgaste médio de $2,09 \times 10^{-5}$. Isso mostra que houve redução do desgaste do substrato.

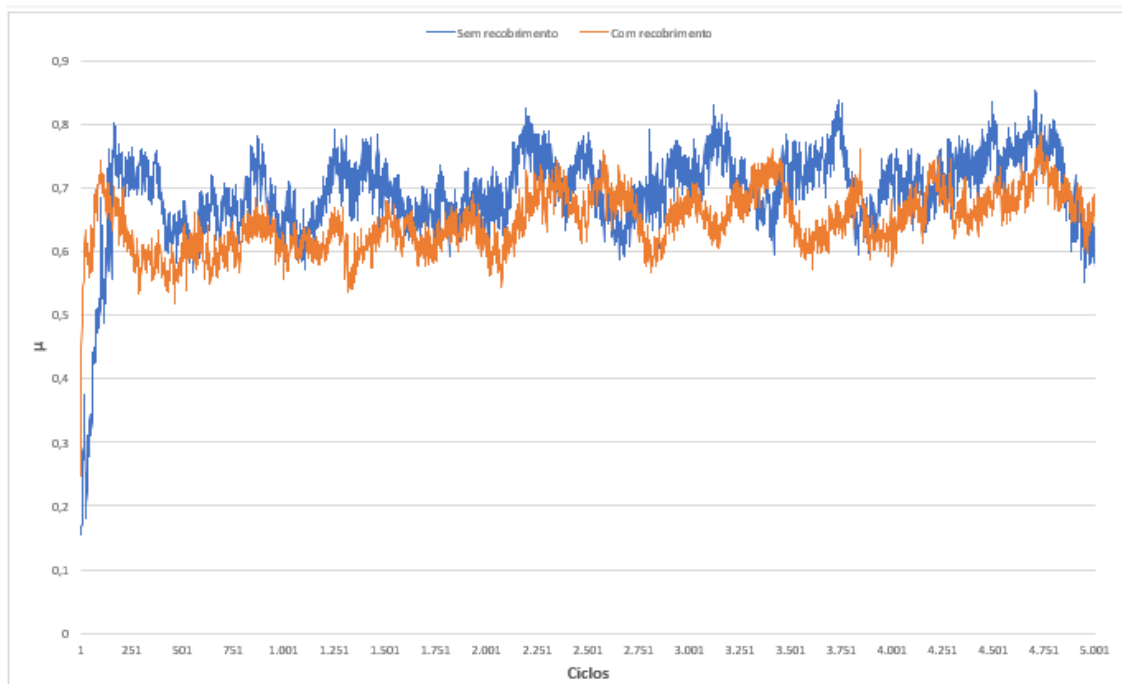
Analisando os dados é possível chegar a conclusão que o filme depositado cumpriu os objetivos de diminuir o atrito da superfície da amostra e também diminuiu a taxa de desgaste da mesma.

Tabela 1: Coeficiente de atrito e taxa de desgaste

	Coeficiente de atrito μ		Taxa de desgaste [mm ³ /(N·m)]	
	Sem Recobrimento	Com Recobrimento	Sem Recobrimento	Com Recobrimento
Medida 1	0,69	0,64	2,71E-05	2,13E-05
Medida 2	0,70	0,65	2,16E-05	2,05E-05
Média	0,69	0,65	2,44E-05	2,09E-05
Desvio Padrão	0,01	0,01	3,91E-06	5,33E-07

Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

Figura 4: Resultado do ensaio de tribologia

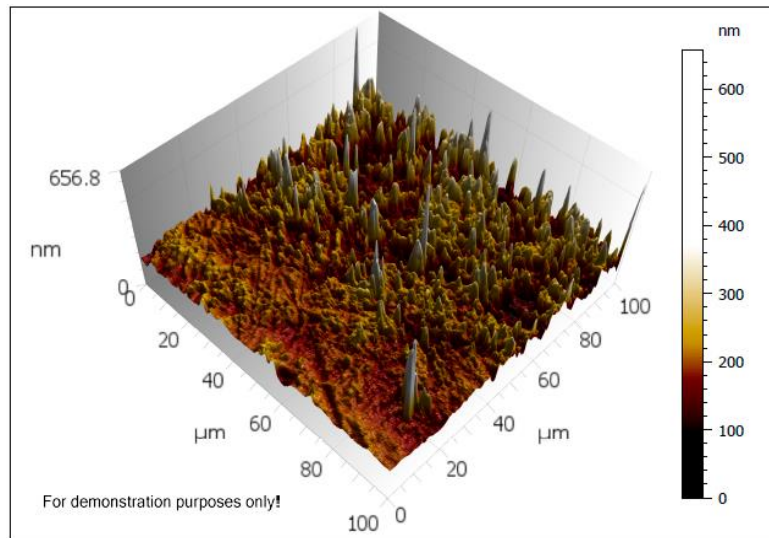


Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

4.4 MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA (AFM)

Os quatro ensaios realizados com o AFM foram realizados na mesma amostra. O primeiro ensaio foi realizado em uma área onde aparentemente teria um degrau, podendo facilmente identificar a espessura do filme. Infelizmente não houve um degrau para poder medir a espessura do filme, pois após realizar o ensaio identificou-se que tinha uma inclinação indesejada que não permitiu a medição da espessura do filme. O Pesquisador o motivo de não ter formado o degrau.

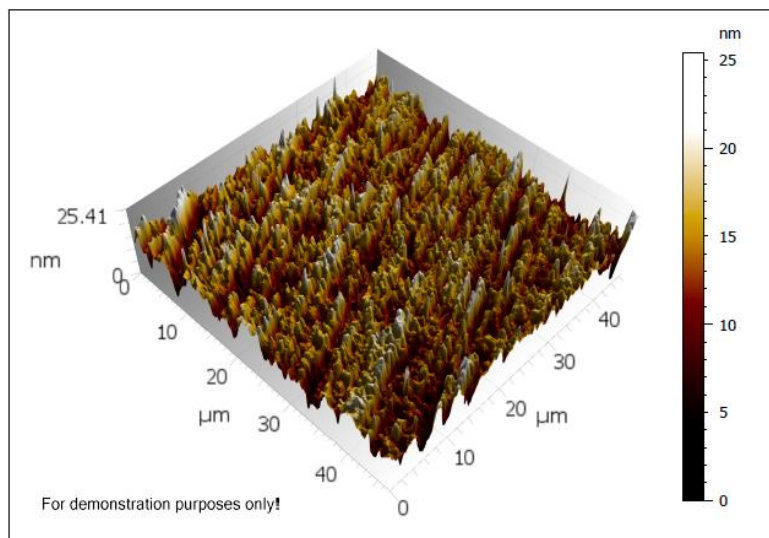
Figura 5: Imagem 3D da área de intersecção entre filme depositado e substrato



Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

O segundo ensaio foi realizado em uma área sem recobrimento, onde foi possível identificar, por meio de um desenho em 3D, a rugosidade da amostra. Além disso, é possível identificar os pequenos riscos da superfície.

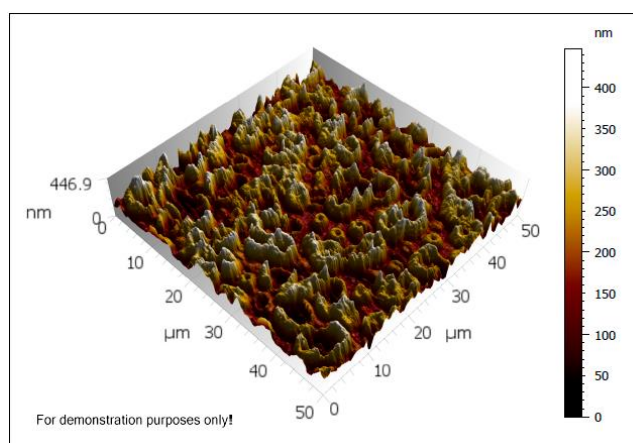
Figura 6: Imagem 3D da área do substrato sem deposição



Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

O terceiro ensaio mostra uma área de $50 \mu\text{m}^2$. Nesta área foi possível identificar pequenas estruturas em formato de vales e picos os quais mostram que aumentou a rugosidade do material, embora em outros ensaios mostram que o coeficiente de atrito diminuiu.

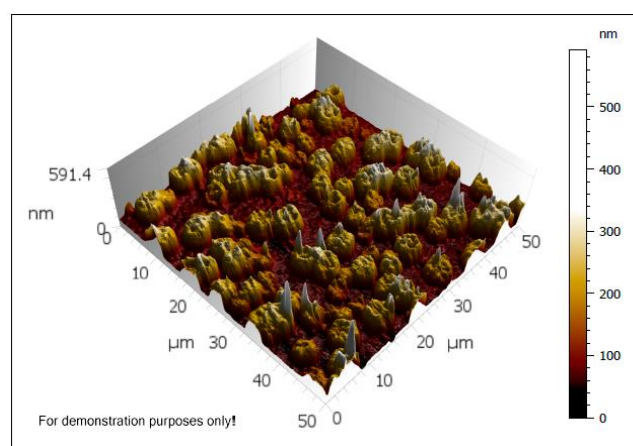
Figura 7: Imagem 3D da área 1 do substrato com deposição



Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

O quarto ensaio foi realizado em uma área de $50 \mu\text{m}^2$, nesta área foi identificado pequenas estruturas circulares dentro do filme, o que nos leva a conclusão de que elas são hBN.

Figura 8: Imagem 3D da área 2 do substrato com deposição



Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

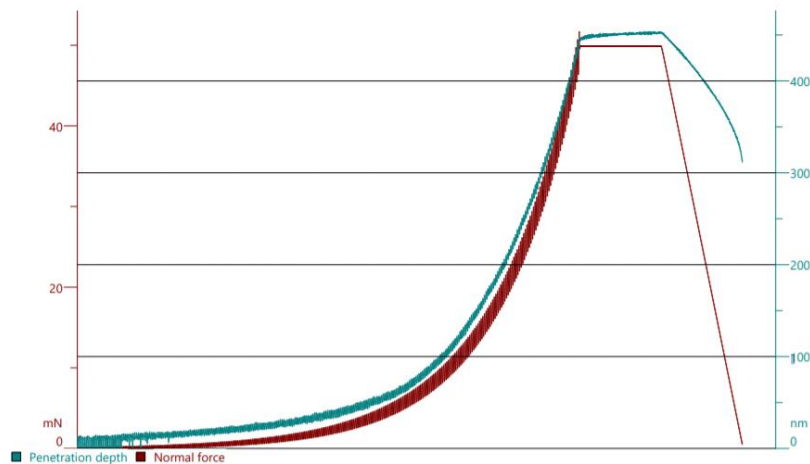
Após analisar os ensaios foi possível identificar que houve duas áreas distintas dos filmes, uma que possui maior rugosidade e estruturas mais próximas umas das outras. A segunda área possui estruturas circulares menores, mais espaçadas e com menor amplitude entre pico e vale. Além disso, foi possível observar que os riscos que já tinha previamente no substrato não influenciaram tanto nas camadas de filmes depositadas. Infelizmente não foi possível identificar a espessura correta do filme pois não tinha o degrau entre filme e substrato, impossibilitando a medição de sua espessura.

4.5 ENSAIO DE NANOINDENTAÇÃO

A realização do ensaio de nanoindentação foi um sucesso. Com esse teste foi possível medir a nanodureza em duas áreas diferentes. No ensaio 1, a figura 10 mostra o local em que o penetrador atingiu o filme. No ensaio 2, a figura 12 mostra que o penetrador não atingiu o filme.

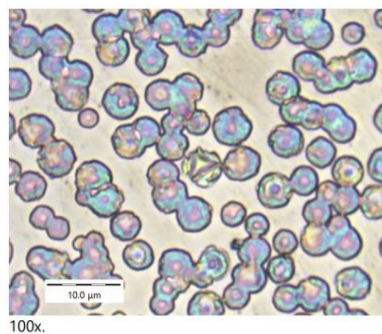
Outro recurso que nos auxiliou a identificar a dureza foram as figuras 9 e 11, que apresentam um gráfico da carga aplicada em função da profundidade de penetração, utilizando em ambos os ensaios a mesma carga de 50 mN. Para o ensaio 1 a profundidade máxima atingida foi de 450nm, já para o ensaio 2 a profundidade chegou a 600nm. Portanto concluímos que a região com filme depositado, ensaio 1, possui uma superfície mais dura.

Figura 9: Ensaio 1 - Profundidade máxima (nm) x Carga (mN)



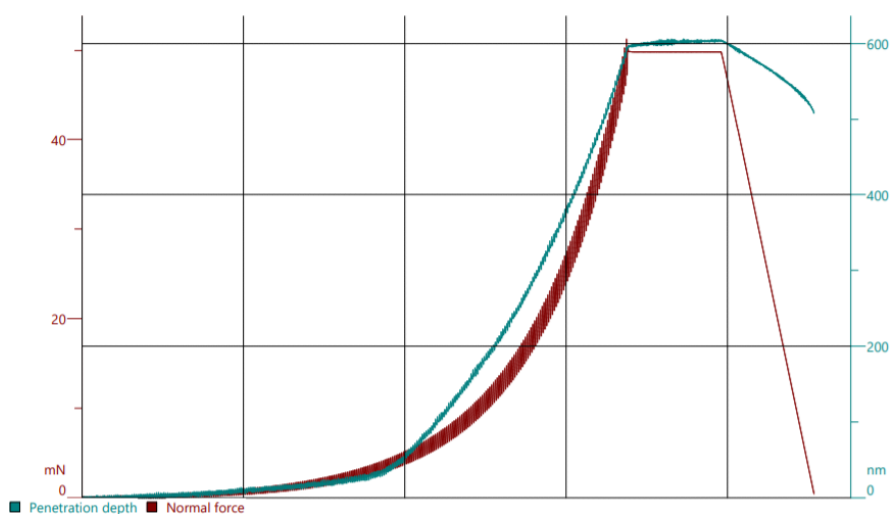
Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

Figura 10: Ensaio 1 - Local da nanoindentação



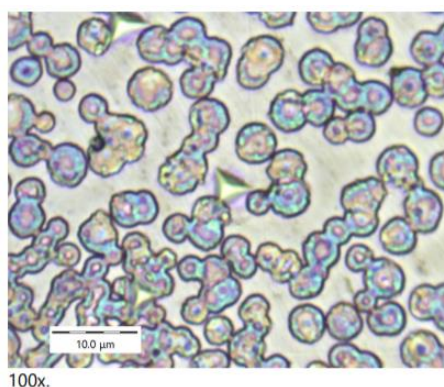
Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

Figura 11: Ensaio 2 - Profundidade máxima (nm) x Carga (mN)



Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

Figura 12: Ensaio 2 - Local da nanoindentação



Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

Tabela 2: Resultados nanoindentação

	E* [GPa] Oliver & Pharr Sinus	EIT [GPa] Oliver & Pharr Sinus	Er [GPa] Oliver & Pharr Sinus	HIT [MPa] Oliver & Pharr Sinus	HVIT [Vickers] Oliver & Pharr Sinus
Média	349.038	317.625	267.210	10987.749	1017.585
Desvio Padrão	37.812	34.409	22.157	3591.963	332.655
Ensaio 1	345.293	314.217	265.377	15066.030	1395.278
Ensaio 2	313.238	285.046	246.027	8294.454	768.157

Fonte: Ensaio realizado pelos autores no laboratório da Anton Paar

A dureza do ensaio 2 foi de 768,16 vickers, com penetração de aproximadamente 600 nm e com HIT de 8294,45 MPa. Já os dados do ensaio 2 foram superiores. A dureza

foi de 1395,28 vickers, com penetração de aproximadamente 450 nm e com HIT de 15066,03 MPa.

Após a análise dos dados obtidos nos dois ensaios, é possível concluir que para uma mesma carga aplicada, a superfície onde tem o filme teve a sua dureza aumentada em aproximadamente 81%, mostrando que o filme depositado melhora a dureza superficial do substrato.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realizar os ensaios de deposição e caracterização vistos neste trabalho é possível concluir que o assunto abordado precisa de uma pesquisa mais profunda. O objetivo deste trabalho foi cumprido com êxito. A deposição do filme fino de hBN teve êxito, embora tenha ocorrido algumas delaminações. Além disso, o objetivo de melhorar as propriedades da superfície do componente de armas de fogo foi muito satisfatório, pois houve a redução do coeficiente de atrito, diminuiu a taxa de desgaste da superfície e aumento dureza superficial.

Houve a limitação de não conseguir realizar ensaios de espectroscopia raman para ajudar a caracterização do filme depositado. Outra limitação foi não poder calcular a espessura do filme depositado, pois não houve um degrau nítido entre substrato e filme. Como sugestão a futuros trabalhos que precisarem medir a espessura do filme, recomendamos realizar um ótimo trabalho de preparação de corpo de provas, deixando o corpo de prova com a planicidade das superfícies. Além disso, recomendamos que seja utilizado a espectroscopia de raman e o perfilômetro para ajudar a caracterizar melhor o filme depositado.

Após realizar este estudo, recomendamos que pesquisas futuras continuem melhorando o estudo para que seja possível desenvolver novos processos e tecnologias que sejam capazes de melhorar os equipamentos utilizados por agentes de segurança pública e atiradores esportivos.

Referências

BERBECKA, Bryan Luidi. **Armamento: manuseio da pistola imbel mod 1911 e as medidas preventivas a serem adotadas**. 2018. 29 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Militares, Academia Militar das Agulhas Negras, Resende, 2018.]

BLANDO, Eduardo. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de revestimentos do tipo super-rede de dureza**. 2005. 137 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CARVALHO, Renata Gomes. **Deposição e caracterização de filmes finos de NbAlN por magnetron sputtering reativo**. 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

Filmes finos de nitreto de carbono e nitreto de boro preparados com método de deposição assistida por feixe de íons. Brasil: Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 23, 20 jun. 2006.

LANGHI JUNIOR, Mauro Pontes. **Estudo do mecanismo de deposição de filmes finos de nitreto de boro assistida por feixes de íons**. 2009. 97 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LIMA JÚNIOR, Cap Qmb João Batista Cineiro de. **Um estudo de caso sobre os procedimentos adotados pelo BMSA para a destinação final dos rejeitos ferrosos oriundos da manutenção do armamento leve**. 2019. 25 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências Militares Com Ênfase em Gestão Operacional, Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, Rio de Janeiro, 2019.

MELLO, Carina Barros. **Deposição de filmes finos baseada em implantação iônica por imersão em plasma com descarga luminescente e magnetron sputtering**. 2011. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Inpe, São José dos Campos, 2011.

MOURA, José Américo de Sousa. **Filmes nanométricos de FeN e AlN crescidos por sputtering e aplicações do efeito peltier**. 2010. 27 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Cap. 3.

RASMA, Eline Tourinho. **Caracterização estrutural e mecânica do aço AISI/SAE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais do Centro

de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

RAMALHO, Alan *et al.* **Transformação do nitreto hexagonal de boro em nitreto cúbico de boro com o catalisador magnésio.** Revista Matéria, Campos dos Goytacazes, v. 13, p. 258-266, 13 fev. 2007.

SARMENTO, Aldembar de Andrade. **Influência do acabamento superficial do substrato de metal duro no desempenho de ferramentas (pastilhas) com revestimento.** 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2013.

SANTOS, Renato Harley dos. **Propriedades estruturais e eletrônicas de interfaces de nitreto de boro cúbico e hexagonal.** 2014. 71 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-Graduação em Física de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

TENTARDINI, Eduardo Kirinus. **Obtenção e caracterização de filmes finos de (Ti,Al)N do tipo multicamadas para aplicação em matrizes.** 2004. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

YE, J. *et al.* **Conditions for the formation of cubic boron nitride films by R.F. magnetron sputtering.** Revista Sur

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por nos ter dado esta oportunidade de estudo e a nossos pais que sempre nos apoiaram ao longo de nossa trajetória acadêmica.

A Anton Paar, em especial ao funcionário Filipe Estevão, por ter ajudado a realizar os ensaios de caracterização, sendo assim possível.

A Universidade Presbiteriana Mackenzie por possibilitar o uso de equipamentos de primeira qualidade para nossa pesquisa.

[1] Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Mecânica, EE, UPM, São Paulo, 2021.