

ESTUDO DA HISTERESE DE UM ALVO DE TITÂNIO NO PROCESSO DE SPUTTERING REATIVO

Leonardo Tadashi Matsumoto (IC) e Marcos Massi (Orientador)

Apoio: PIBIC CNPq

RESUMO

Este artigo tem o objetivo de caracterizar o reator PVD, com maior relevância as características elétricas, assim como estabelecer as condições nas quais acontece o processo de envenenamento do alvo. Para isso foi utilizado um alvo de titânio e foi realizado alguns testes para correto manuseio do reator e foi estabelecido as condições nas quais foi operado o reator, tais como pressão de fundo, fluxo de Ar , fluxo de O_2 , pressão de trabalho, pressão de fundo e a potência na qual se encontra o plasma. Durante esse experimento foi estudando como as variáveis corrente elétrica, tensão e pressão de trabalho se comportavam conforme foi alterado o fluxo de O_2 , com determinada pressão de trabalho e potência elétrica. Assim quando ocorre o envenenamento do alvo os valores da pressão e tensão aumentam consideravelmente e a corrente elétrica decai.

Palavras-chave: Envenenamento, *Sputtering*, Alvo.

ABSTRACT

This article aims to characterize the PVD reactor, with greater relevance to electrical characteristics, as well as to establish the conditions under which the target poisoning process takes place. For this purpose a titanium target was used and some tests were performed for correct reactor handling and the conditions under which the reactor was operated were established, such as background pressure, air flow, O_2 flow, working pressure, background and the power of the plasma. During this experiment was studying how the variables electric current, voltage and working pressure behaved as the O_2 flow, with certain working pressure and electric power was changed. Thus, when target poisoning occurs the pressure and voltage values increase considerably and the electric current decays.

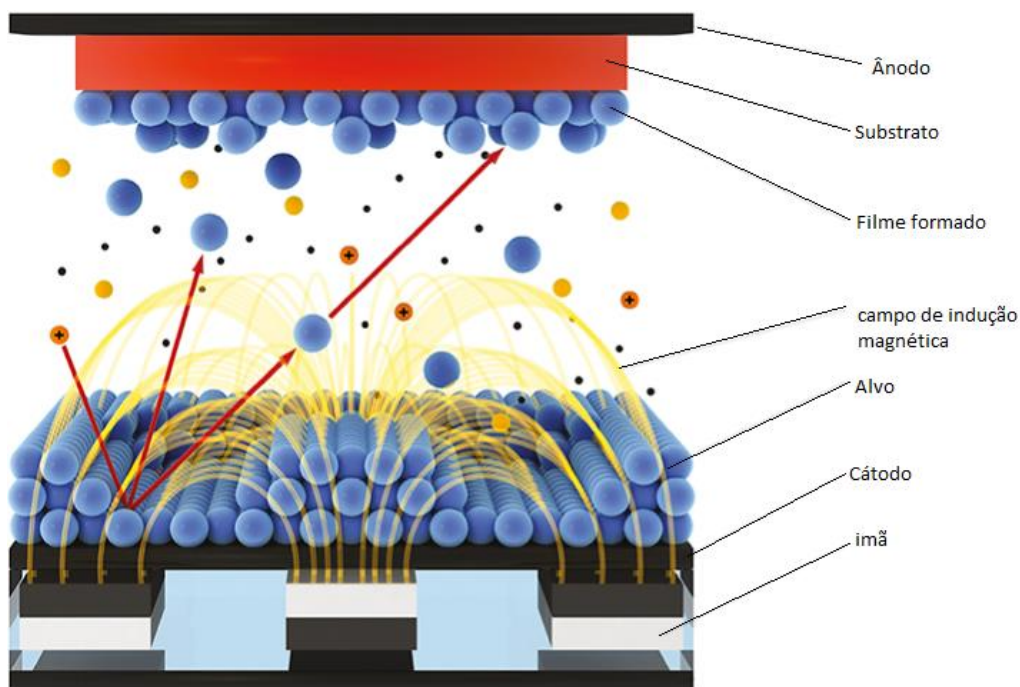
Keywords: Poisoning, *Sputtering*, Target.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros processos de deposição física de vapores (PVD - Physical Vapor Deposition) ocorreram em 1938 realizados por Berghaus [1]. Porém, apenas na década de 1960, com as novas deposições que foram desenvolvidas [2], esta técnica tornou-se mais intensamente pesquisada e empregada em vários setores industriais, com destaque para os processos de microeletrônica. Neste setor, reatores baseados em PVD foram otimizados a fim de reduzir as dimensões dos dispositivos microeletrônicos e microeletromecânicos (MEMS). Com sua consolidação, essa técnica começou a ser empregada em outros setores, como o automotivo, médico, aeronáutico, espacial, entre outros. Em reatores PVD é possível obter filmes com uniformes em ampla faixa de espessura, desde alguns nanômetros até dezenas de micrometros [3]. Além disso, a técnica opera em temperaturas baixas, quando comparadas com as técnicas CVD (Chemical Vapor Deposition), promove a produção de filmes de alta pureza e compatíveis com os setores acima mencionados. Atualmente, a Escola de Engenharia da UPM possui um equipamento PVD constituído por um reator a plasma, que pode operar com dois materiais simultaneamente ou separadamente, possibilitando a produção de filmes ultrafinos de materiais puros ou ligas. Quando se deseja depositar óxidos, nitretos, oxinitretos, carbetos, oxicarbeto e sulfetos, a partir de alvos metálicos com o uso de gases reativos, pode haver o envenenamento do alvo, o que altera de forma expressiva a taxa de deposição dos filmes em estudo. Este fenômeno é dependente dos parâmetros de processos, principalmente da pressão de trabalho e do fluxo dos gases. Para que este reator possa ser usado nas pesquisas em desenvolvimento na EE, é necessário que se faça sua caracterização quanto às condições nas quais esse envenenamento é evitado. Assim neste trabalho pretende-se realizar essa caracterização para o caso da deposição de filmes de dióxido de titânio a partir de alvo metálico.

1.1 Problema de pesquisa

O emprego da Tecnologia de Plasmas para a deposição de filmes finos possui três grandes áreas, que inclui processos físicos, químicos e térmicos. No caso dos processos físicos, a técnica que se destaca é denominada *sputtering* ou pulverização catódica, e se caracteriza pela ejeção do material que se deseja depositar a partir de um alvo de alta pureza. Essa ejeção é promovida pelo bombardeamento do alvo por íons provenientes de um plasma. A Figura 2 apresenta de forma esquemática esse processo.

Figura 1 - Esquema de pulverização catódica

Fonte: Adaptado de

<http://m.xincailiao.com/toupiao/hcl2018s2/stage2/zonghe_list.aspx?ptype=0&category_id=1811>

Quando se deseja produzir óxidos (dióxido de titânio, para o caso deste trabalho) a partir de alvos metálicos é necessário que se utilize uma mistura de argônio e oxigênio na produção do plasma. Os íons de argônio do plasma são atraídos pelo alvo, que fica polarizado negativamente, e por transferência de momento, arrancam titânio do alvo. O titânio arrancado reage com o oxigênio existente no plasma produzindo um filme de dióxido de titânio. Entretanto, íons de oxigênio também reagem com o alvo de titânio, produzindo uma camada de óxido, reduzindo drasticamente a taxa de deposição do processo. Este fenômeno é dependente dos parâmetros de processos, principalmente da pressão de trabalho e do fluxo dos gases.

A Escola de Engenharia da UPM acaba de instalar em um de seus laboratórios um reator à plasma, que possui dois catodos do tipo *magnetron*, onde é possível realizar o processo de pulverização catódica. Entre os trabalhos que se pretende realizar neste reator, pode ser citado a produção de filmes de dióxido de titânio (TiO_2) para o desenvolvimento de células solares de terceira geração. Para isso, foi caracterizado eletricamente o reator existente, e determinadas as condições nas quais ocorre o processo de envenenamento do alvo. Estes foram os objetivos deste projeto de iniciação científica.

1.2 Justificativa do tema

A pulverização catódica é uma técnica de deposição usada para revestir uma superfície. Essa técnica possui algumas vantagens que atribuem a sua grande versatilidade, uma vez que permite um grande controle dos parâmetros de deposição e uma ótima qualidade dos filmes produzidos. É importante destacar a facilidade que se passa dos resultados laboratoriais para um nível industrial. Além dessas características, existem outras que justificam a aplicação dessa técnica em filmes finos, como o fato de ser pouco agressiva ambientalmente falando e produzir filmes com homogeneidade de espessura em superfícies planas.

No que se refere aos trabalhos a serem desenvolvidos na UPM com esta técnica, destacam-se a produção de filmes de dióxido de titânio, que pode ser usado em vários setores industriais, como o de energia, na geração de energia fotovoltaica, e o eletrônico, na produção de dielétricos de alta constante dielétrica. Para que essas pesquisas sejam realizadas, foi necessário que se detalhe as condições de operação do reator no que se refere às suas características elétricas.

Assim, a caracterização do reator existente na UPM é de grande importância aos estudos nos quais ele será usado, dando suporte aos demais pesquisadores e alunos que o utilizarão.

1.3 Objetivos

O projeto tem como objetivo geral caracterizar o reator PVD existente na EE da UPM, principalmente quanto às suas características elétricas, assim como determinar as condições nas quais ocorre o processo de envenenamento do alvo.

Para que esses objetivos gerais sejam atingidos, os seguintes objetivos específicos foram atingidos:

- a) Estabelecer um procedimento de operação do reator, segundo normas de operação;
- b) Levantar curvas pressão versus vazão de oxigênio (curva de histerese) para diferentes valores de potência de plasma;
- c) Levantar curvas corrente versus tensão para diferentes valores de pressão de trabalho e fluxos de gases;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais temas envolvidos neste trabalho, a fim de proporcionar o embasamento teórico necessário para sua compreensão e execução.

2.1 Processos para deposição de filmes finos

A confecção de circuitos micro e nanoeletrônicos teve grande avanço tecnológico, entre outros fatores, graças ao emprego de:

- i) processos físicos na fase de vapor (PVD, do inglês *Physical Vapor Deposition*), tais como o *sputtering* (ou pulverização catódica), usados na deposição de filmes de materiais metálicos, dielétricos e semicondutores;
- ii) processos químicos na fase vapor (CVD, do inglês *Chemical Vapor Deposition*), usados por exemplo, na oxidação de lâminas de silício usadas como material base dos circuitos integrados;
- iii) processos químicos na fase vapor assistidos por plasma (PECVD, do inglês *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*), usados por exemplo, na produção de carbeto de silício (SiC) em temperaturas menores que as necessárias em processos convencionais.

Todos esses processos podem ser usados em vários outros setores industriais, tais como o automotivo, médico, aeronáutico, espacial, entre outros, pois possibilitam a produção de inúmeros materiais puros ou em forma de compostos.

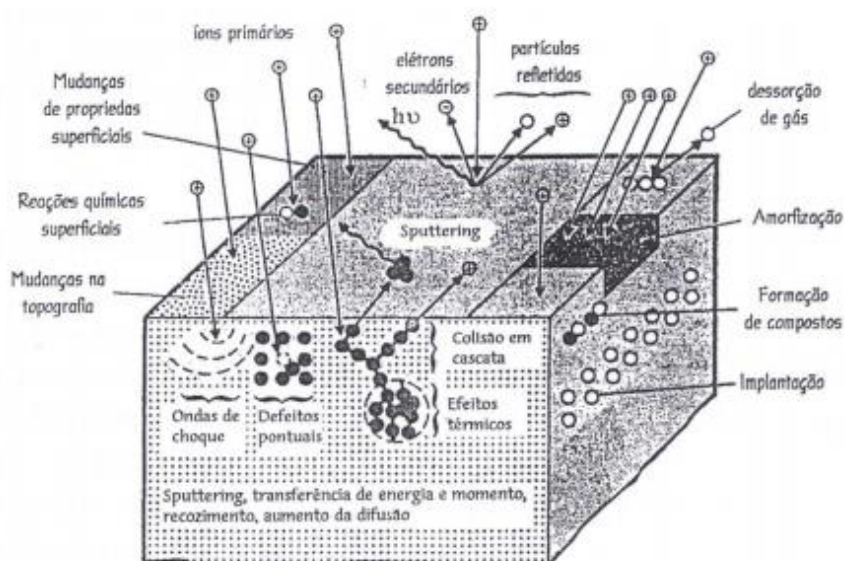
Como citado anteriormente, uma das técnicas do tipo PVD usadas pode ser citada a pulverização catódica, ou *sputtering*, que é amplamente usada tanto em laboratórios de pesquisa, quanto em indústrias. Esta será a técnica usada neste projeto, por isso será apresentada com mais detalhes nos próximos itens.

2.2 *Sputtering* convencional

O processo de evaporação térmica foi o primeiro método para deposição de filmes metálicos na microeletrônica [4]. Porém, devido ao aumento da complexidade dos circuitos desenvolvidos, esta técnica tornou-se de uso limitado e obsoleto. Para resolver problemas como a deposição de filmes dielétricos ou ligas metálicas, foi necessário que se recorresse à novas alternativas, onde o processo de *sputtering* destacou-se pela possibilidade de obtenção desses materiais, com boa uniformidade, reprodutividade, além de ser um processo limpo e compatível com os processos industriais de fabricação mais comuns.

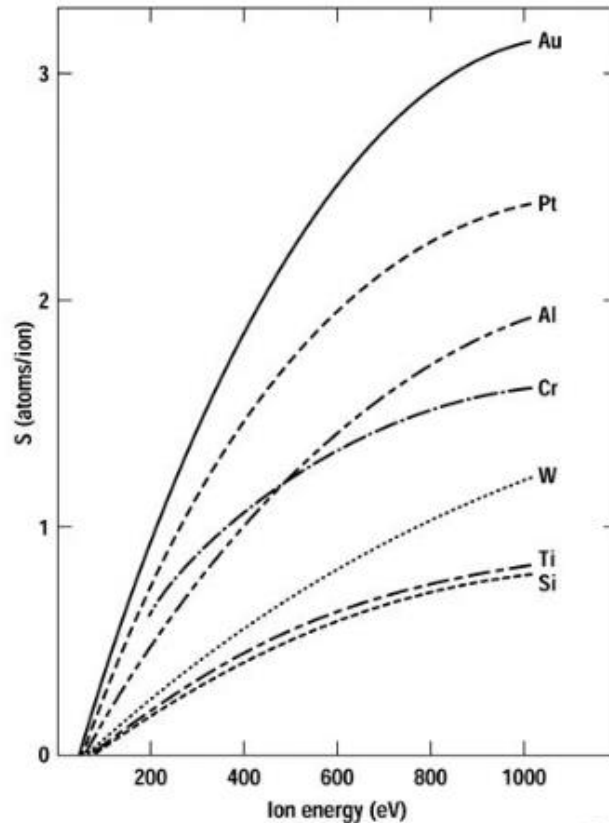
Na técnica de *sputtering* um plasma é formado entre dois eletrodos. Sobre o cátodo é posicionado o alvo, que é o material que se deseja depositar. Íons desse plasma são acelerados através da bainha catódica e colidem com a superfície do alvo, ejetando átomos do material por transferência de momento. Esses átomos ejetados percorrem direções aleatórias e são depositados na câmara e em substratos posicionados na frente do cátodo. Outros fenômenos também ocorrem no alvo, tais como reflexão de íon incidente, implantação iônica, defeitos na rede cristalina, ondas de choque e aquecimento do alvo. A Figura 3 mostra esquematicamente esses processos.

Figura 2 - Processos que ocorrem durante a técnica de *Sputtering*.



Fonte: Reproduzido de [5]

Uma das maneiras de observar a parcela de átomos ejetados do alvo, em processos de *sputtering*, é denominado “rendimento de *sputtering*”, cujo resultado indica quantos átomos são expelidos do alvo por íon incidente, e é função da energia do íon incidente, além do material do alvo. A Figura 3 mostra um exemplo desse fenômeno [6].

Figura 3 - Rendimento de *sputtering* para diferentes materiais de alvo [6].

Fonte: Thin Films: Sputtering (Jaeger capítulo 6 & Ruskā capítulo 7)

2.3 Magnetron sputtering

Com o objetivo de se aumentar o rendimento de *sputtering*, foi criado o sistema chamado *magnetron sputtering*. O que distingue o sistema *magnetron sputtering* do sistema *sputtering* convencional é a presença de um campo de indução magnético que pode ser estático ou variável. Comumente, o campo de indução magnético de sistemas magnetron é composto por um conjunto de ímãs permanentes que são posicionados de uma maneira estratégica atrás do alvo que será bombardeado. Essa composição magnética é formada por um ímã central e um ímã externo, de tal forma que a polaridade central seja inversa à polaridade externa, por conseguinte, desenvolvendo um campo de indução com geometria fechada. De maneira geral, o ímã central (cilíndrico) possui polaridade S (sul) e o ímã externo (anelar) possui polaridade N (norte), uma vez observado que os elétrons percorrem trajetórias helicoidais por meio das linhas no sentido N-S, minimizando sua difusão pelas paredes do reator, ou seja, aumentando seu tempo de residência no interior do plasma. Com isso, há um aumento na taxa de ionização do plasma, e consequentemente no número de íons que atingem o alvo, ou seja, na taxa de deposição dos filmes [7]. Devido a estes fenômenos, os valores de tensão catódica e corrente no alvo passam de 2500V-0,5A (*sputtering* convencional) para 500V – 5 A (*magnetron sputtering*) [4].

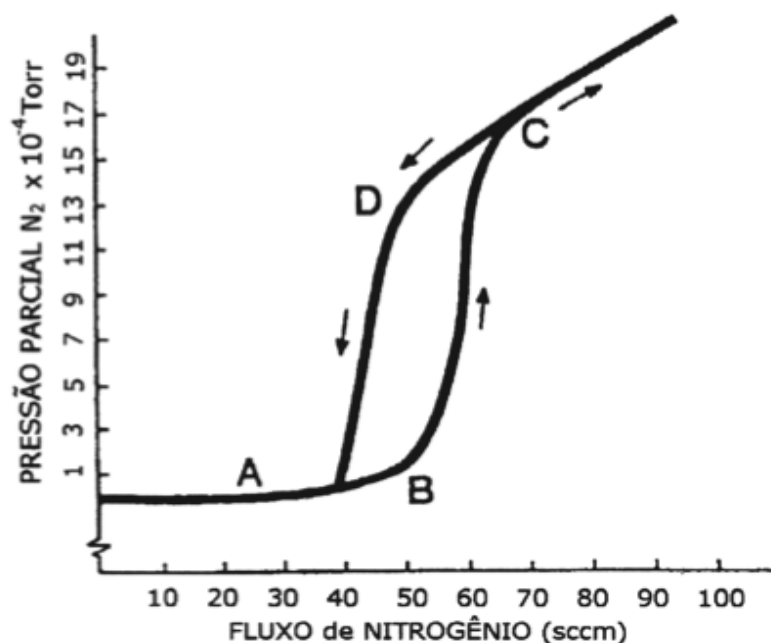
2.4 Sputtering reativo - envenenamento do alvo

Conforme mencionado anteriormente, quando se deseja produzir óxidos a partir de alvos metálicos, é necessário o emprego de oxigênio, que acaba por produzir uma fina camada de óxido sobre o alvo, ou seja, ocorre o envenenamento do alvo, alterando de forma significativa o rendimento de sputtering e consequentemente na taxa de deposição dos filmes.

Esse fenômeno é dependente da vazão do gás reativo inserido no reator de processos, e forma uma curva de histerese como mostra a Figura 4, onde o gás reativo usado é o nitrogênio.

Entre os pontos A e B da Figura 5, pode ser observado que o aumentando-se o fluxo do gás reativo, não há alteração da pressão, pois todo o gás é consumido em reações com o material do alvo. Entre os pontos B e C há um aumento significativo na pressão parcial do nitrogênio, isso ocorre pois ocorreu o completo recobrimento e envenenamento do alvo. Após este processo de envenenamento, ao se diminuir a injeção de gás reativo, a pressão não voltará pelo mesmo caminho que subiu (região D da Figura 4), pois as condições da superfície material do alvo agora são diferentes da inicial. Essa variação tem por consequência a produção d filmes com características totalmente diferentes, podendo ter características metálicas até a formação do óxido (ou nitreto) desejado.

Figura 4 – Ciclo de histerese típica para o processo de *sputtering* [8].



Fonte: Reproduzido de [9]

3. METODOLOGIA

3.1 ESTABELECIMENTO DE PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO DO REATOR

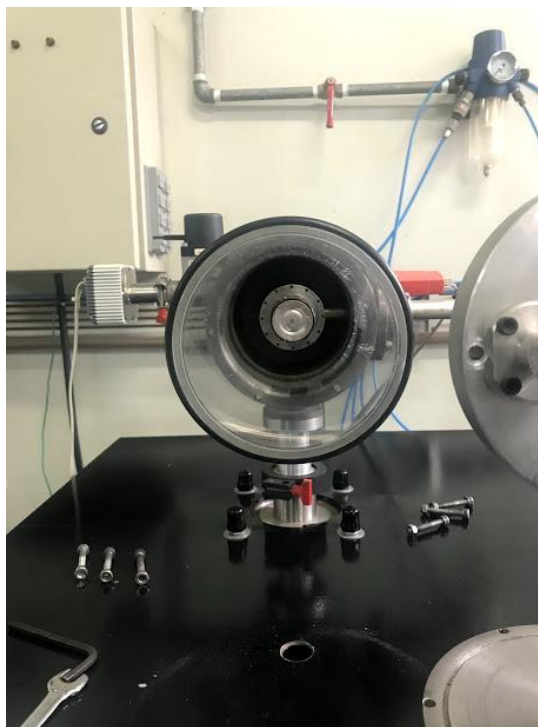
O reator de *Sputtering* reativo utilizado na pesquisa em questão é composto por um *shutter*, um sistema de aquecimento, um termopar, usado para efetuar a medição da temperatura, uma bomba mecânica, uma bomba difusora, sensor de pressão, uma fonte e medidores de pressão e fluxo de massa e um sistema de refrigeração.

Figura 5 – Interior da câmara de vácuo do reator de *Sputtering* Reativo.



Fonte: Autor.

Figura 6 – Câmara do reator com o alvo de titânio devidamente posicionado.



Fonte: Autor.

Logo após, foi ligada a bomba mecânica para retirar todos os gases que estavam dentro da câmara com a finalidade de obter uma baixa pressão, da ordem de 10^{-3} *mTorr*, e consecutivamente foi ligado o sistema de refrigeração e a bomba difusora para provocar o vácuo no interior da câmara.

Como na caracterização do reator foi necessário inserir gases como *Ar* e *O₂* na câmara para realizar o envenenamento do alvo, foi imprescindível a realização da purga da linha de gás, que basicamente é zerar completamente o fluxo de gás na tubulação para não correr o risco de contaminação no gás trabalhado, e assim ser permitida a entrada do gás na câmara.

3.2 OBTENÇÃO DE CURVAS CORRENTE VERSUS TENSÃO

Conforme foi coletado os dados de diferentes variações de fluxo de *O₂*, foram confeccionados gráficos de tensão versus corrente elétrica. Esses gráficos nos mostram que há uma enorme divergência em ambos os valores antes e depois do envenenamento do alvo.

3.3 OBTENÇÃO DE CURVAS PRESSÃO VERSUS VAZÃO DE OXIGÊNIO (CURVA DE HISTERESE)

Após ter sido realizado os procedimentos necessários, foi atingido o vácuo no interior da câmara do reator, com uma pressão de trabalho equivalente a *5 mTorr*, foi realizado a caracterização quanto as variáveis pressão de trabalho e fluxo de *O₂* durante o processo de envenenamento do alvo, para isso foram definidas algumas condições para cada experimento, como potência, o fluxo de *Ar* e a pressão de trabalho.

Feito isso, foi feita a variação do fluxo de *O₂* a partir do zero, aumentando de 0,2 a 0,2 sccm e coletado a pressão de trabalho indicada nos medidores em cada instante. Logo após

isso, foi analisado o ponto de transição do modo metal para o modo óxido e a partir dele, foi diminuído o fluxo de O_2 de 0,2 em 0,2 sccm até cessar completamente o fluxo de O_2 . Para evitar instabilidades quanto ao fluxo de O_2 , as medições foram feitas de 30 em 30 segundos, para que o fluxo se estabilizasse.

Com os dados coletados, foi confeccionado um gráfico de pressão versus fluxo de O_2 para que fosse feita a análise comportamental dessas duas grandezas, que tem uma curva característica no envenenamento do alvo (curva de histerese).

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Foram realizados cinco experimentos para o levantamento de curvas relacionadas ao envenenamento do alvo. Para todos eles, foi utilizado a pressão de fundo de $5 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$, e foram definidas algumas condições de trabalho para o levantamento de curvas fluxo-pressão e tensão-corrente como potência elétrica, fluxo de *Ar* e pressão de trabalho, respectivamente.

Após definidas essas condições, foi aumentado gradativamente o fluxo de O_2 de 0,2 em 0,2 sccm e depois de ter aumentado, foi analisada a transição da deposição do modo metal para o modo óxido, e a partir do fluxo de O_2 que indicava a transição, foi diminuído o fluxo até que o mesmo se cesse completamente.

Assim, com esses resultados, foram confeccionados dois gráficos, um que é o fluxo de O_2 versus pressão de trabalho e o outro que é tensão versus corrente elétrica.

No primeiro experimento, a potência utilizada foi de 30 W, o fluxo de *Ar* foi definido como 15 sccm, e a pressão de trabalho utilizada foi de 5 mTorr.

FLUXO O_2 (sccm)	I (mA)	V	P (mTorr)
0	102	291	5,0
0,2	103	290	5,0
0,4	102	292	5,0
0,6	102	291	5,0
0,8	102	293	5,1
1,0	83	355	5,4
1,2	83	354	5,3
1,4	84	354	5,4
1,6	84	353	5,5
1,8	84	353	5,6
2,0	84	353	5,6
3,0	85	351	6,1
1,0	84	355	5,4
0,8	83	355	5,3

0,6	83	356	5,3
0,4	83	358	5,2
0,2	83	358	5,2
0	100	299	5,0

Tabela 1 – Fluxo de O_2 , corrente, tensão e pressão de trabalho coletados no primeiro experimento.

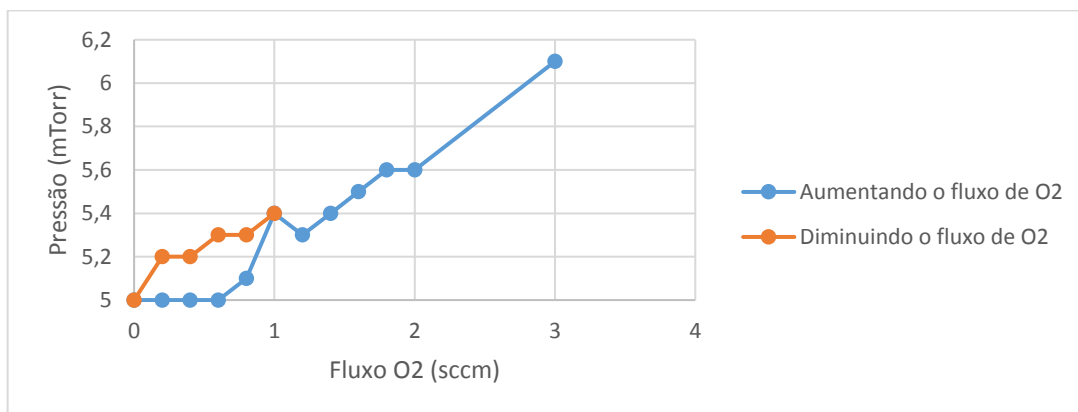


Gráfico 1 – Fluxo de O_2 versus pressão de trabalho para o primeiro experimento.

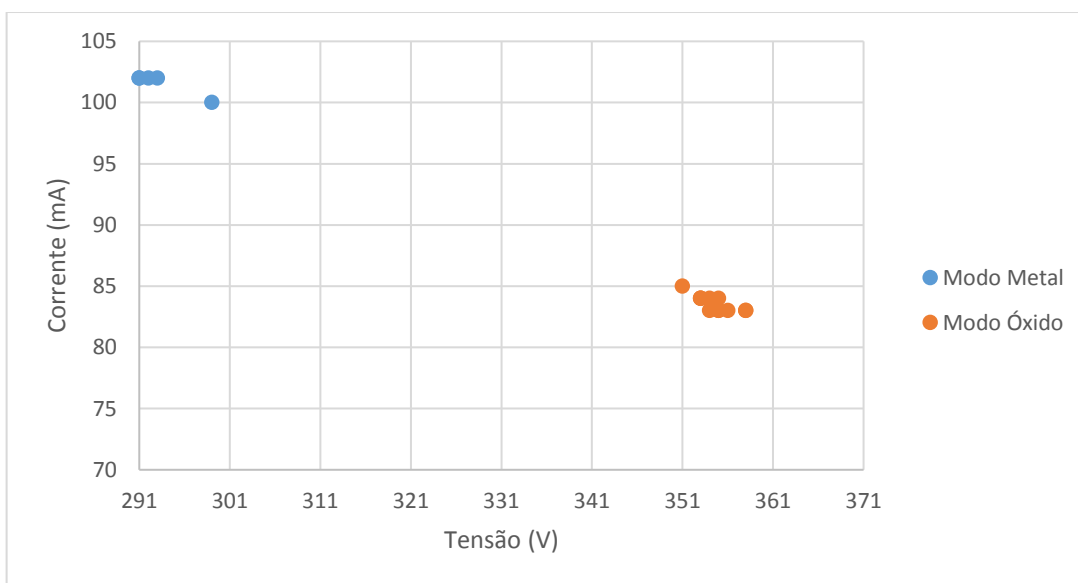


Gráfico 2 – Tensão versus corrente para o primeiro experimento.

No segundo experimento, a potência utilizada foi de 30 W, o fluxo de Ar foi definido como 20 sccm, e a pressão de trabalho utilizada foi de 10 mTorr.

FLUXO O_2 (sccm)	I (mA)	V	P (mTorr)
0	109	275	10,0
0,2	109	274	10,0
0,4	109	276	10,0
0,6	106	281	10,0
0,8	105	285	11,0

1,0	83	357	11,0
1,2	84	353	12,0
1,4	84	353	12,0
1,6	85	351	12,0
1,8	85	351	12,0
2,0	85	350	12,0
3,0	86	347	13,0
1,0	84	352	11,0
0,8	84	353	11,0
0,6	84	353	11,0
0,4	83	356	11,0
0,2	83	357	11,0
0	107	278	10,0

Tabela 2 – Fluxo de O_2 , corrente, tensão e pressão de trabalho coletados no segundo experimento.

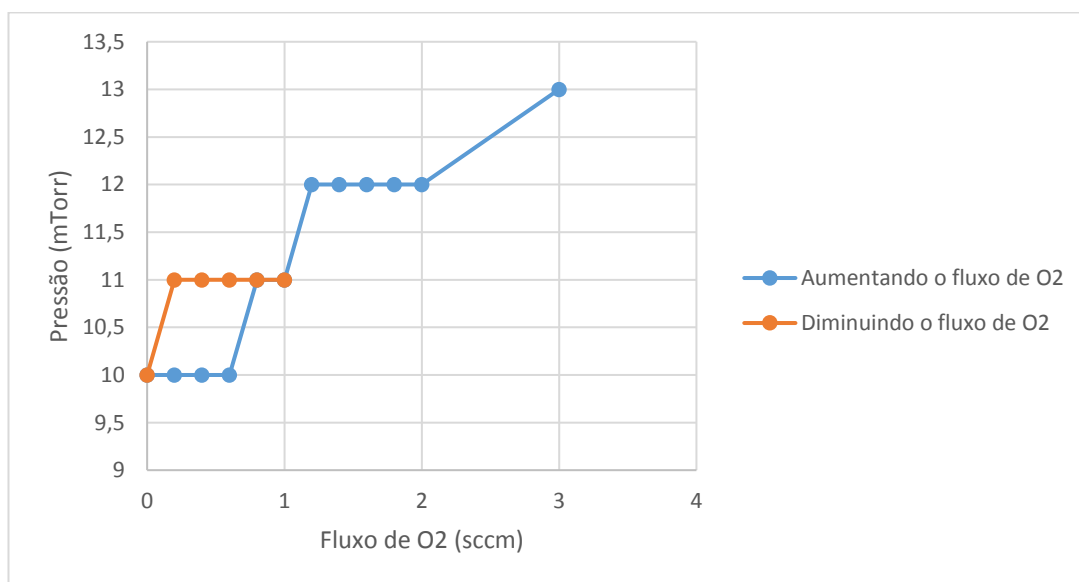


Gráfico 3 – Fluxo de O_2 versus pressão de trabalho para o segundo experimento.

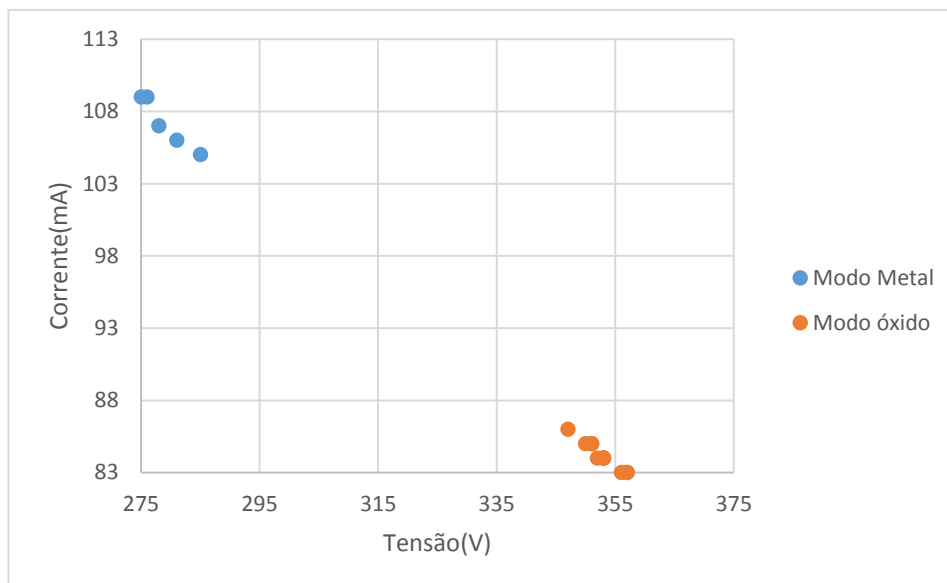


Gráfico 4 – Tensão versus corrente para o segundo experimento.

No terceiro experimento, a potência utilizada foi de 30 W, o fluxo de Ar foi definido como 12 sccm, e a pressão de trabalho utilizada foi de 2 mTorr.

FLUXO O_2 (sccm)	I (mA)	V	P (mTorr)
0	107	280	2,0
0,2	107	280	2,0
0,4	106	282	2,0
0,6	104	286	2,0
0,8	104	287	2,0
1,0	82	360	2,2
1,2	83	356	2,2
1,4	83	356	2,2
1,6	84	352	2,3
1,8	84	352	2,3
2,0	84	352	2,3
3,0	85	350	2,4
1,0	83	355	2,2
0,8	83	358	2,1
0,6	83	358	2,1
0,4	83	358	2,1
0,2	104	287	2,0
0	107	280	2,0

Tabela 3 – Fluxo de O_2 , corrente, tensão e pressão de trabalho coletados no terceiro experimento.

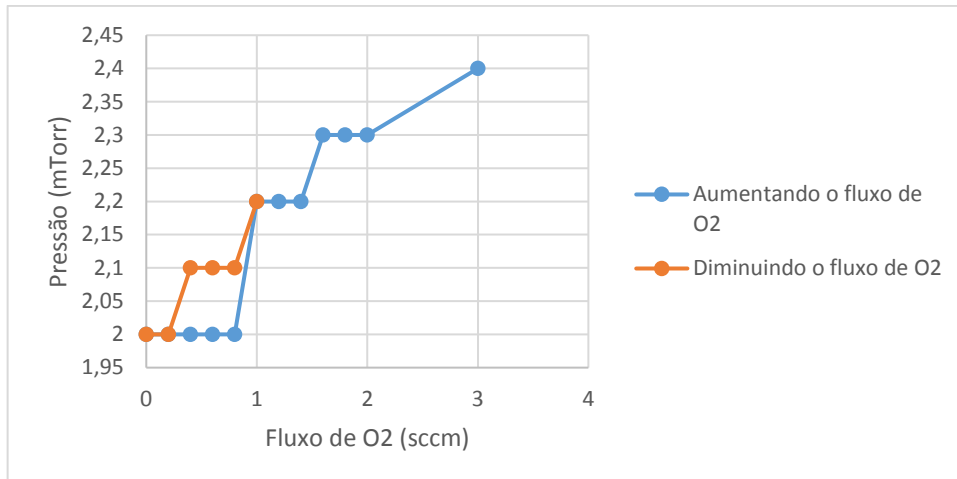


Gráfico 5 – Fluxo de O_2 versus pressão de trabalho para o terceiro experimento.

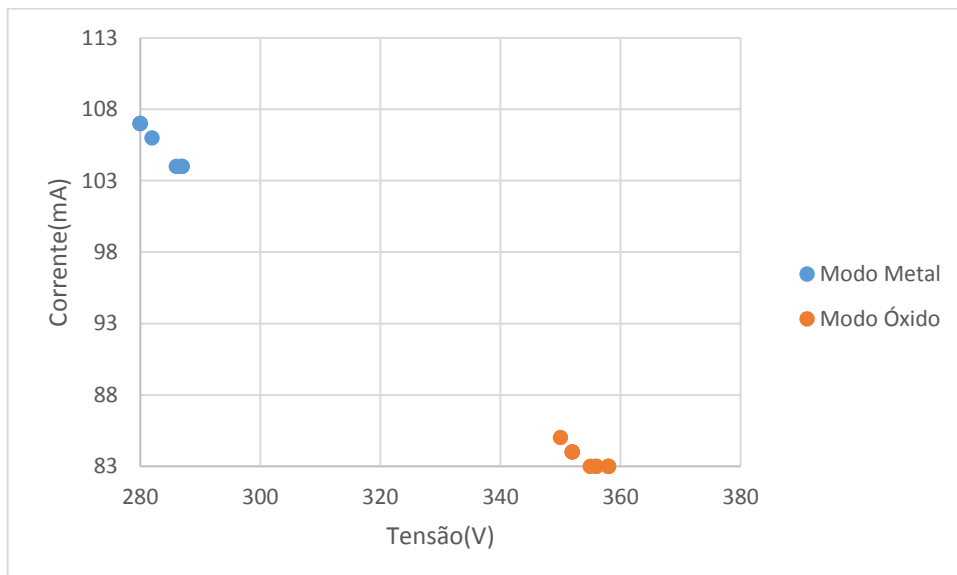


Gráfico 6 – Tensão versus corrente para o terceiro experimento.

No quarto experimento, a potência utilizada foi de 60 W, o fluxo de Ar foi definido como 16 sccm, e a pressão de trabalho utilizada foi de 5 mTorr.

FLUXO O_2 (sccm)	I (mA)	V	P (mTorr)
0	209	291	5,0
0,2	209	290	5,0
0,4	210	289	5,0
0,6	208	291	5,2
0,8	208	292	5,2
1,0	208	293	5,2
1,2	207	293	5,2
1,4	207	294	5,3
1,6	206	295	5,3
1,8	203	298	5,4
2,0	203	298	5,4
2,2	202	301	5,4

2,4	199	305	5,4
2,6	193	315	5,4
2,8	154	392	6,0
3,0	153	392	6,1
4,0	156	386	6,7
2,8	156	386	6,0
2,6	156	386	6,0
2,4	154	389	6,0
2,2	154	390	6,0
2,0	154	390	5,9
1,8	154	390	5,9
1,6	154	390	5,9
1,4	153	391	5,9
1,2	153	391	5,9
1,0	154	390	5,8
0,8	203	298	5,2
0,6	206	294	5,1
0,4	208	292	5,0
0,2	210	288	5,0
0	210	288	5,0

Tabela 4 – Fluxo de O_2 , corrente, tensão e pressão de trabalho coletados no quarto experimento.

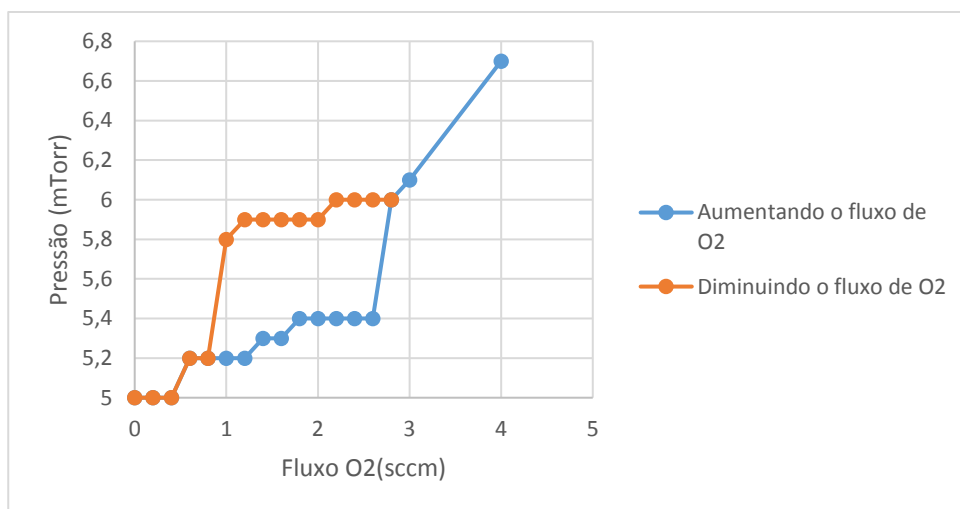


Gráfico 7 – Fluxo de O_2 versus pressão de trabalho para o quarto experimento.

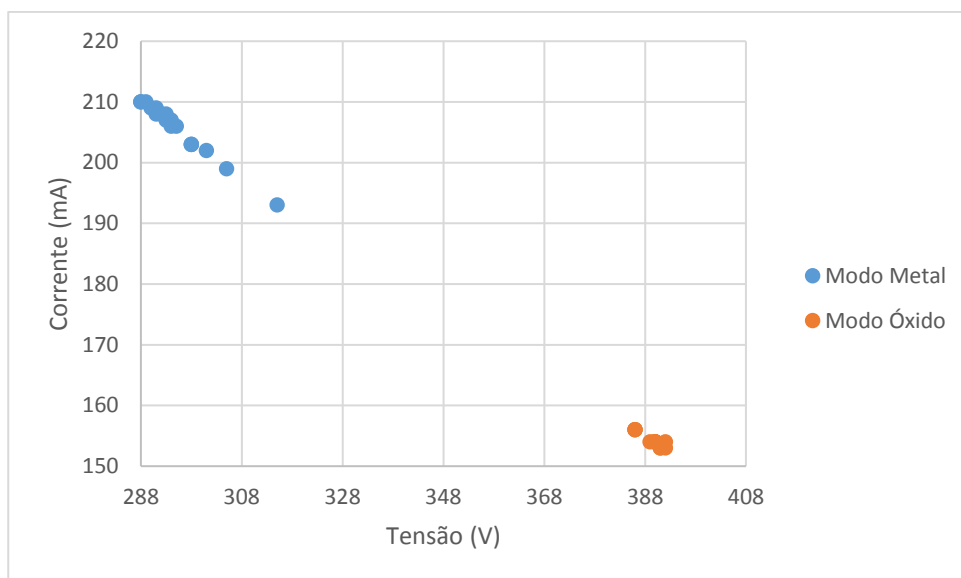


Gráfico 8 – Tensão versus corrente para o quarto experimento.

No quinto experimento, a potência utilizada foi de 90 W, o fluxo de Ar foi definido como 16 sccm, e a pressão de trabalho utilizada foi de 5 mTorr.

FLUXO O_2 (sccm)	I (mA)	V	P (mTorr)
0	301	302	5,0
0,2	300	302	5,0
0,4	299	304	5,0
0,6	300	304	5,0
0,8	300	304	5,0
1,0	300	304	5,0
1,2	300	304	5,0
1,4	300	304	5,1
1,6	298	304	5,1
1,8	298	306	5,2
2,0	299	306	5,1
2,2	298	306	5,2
2,4	297	306	5,2
2,6	297	307	5,2
2,8	297	308	5,2
3,0	297	308	5,2
3,2	296	308	5,2
3,4	294	310	5,2
3,6	292	312	5,3
3,8	290	313	5,3
4,0	288	315	5,4
4,2	287	316	5,4
4,4	221	407	6,2
4,6	221	407	6,3
4,8	221	408	6,4
5,0	221	408	6,4
6,0	222	406	7,0

7,0	223	404	8,0
4,4	221	407	6,3
4,2	221	407	6,3
4,0	221	408	6,5
3,8	221	408	6,5
3,6	221	408	6,4
3,4	220	409	6,3
3,2	220	409	6,3
3,0	220	410	6,2
2,8	220	410	6,2
2,6	220	410	6,1
2,4	220	410	6,0
2,2	220	410	6,0
2,0	221	409	6,0
1,8	221	409	6,0
1,6	222	407	6,0
1,4	300	302	5,2
1,2	301	301	5,2
1,0	302	301	5,2
0,8	303	300	5,2
0,6	304	299	5,1
0,4	304	298	5,1
0,2	305	298	5,0
0	306	298	5,0

Tabela 5 – Fluxo de O_2 , corrente, tensão e pressão de trabalho coletados no quinto experimento.

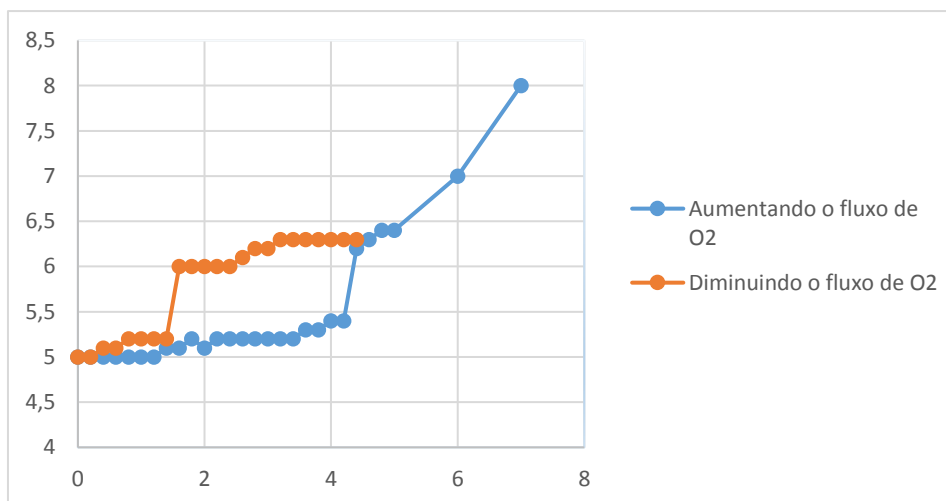


Gráfico 9 – Fluxo de O_2 versus pressão de trabalho para o quinto experimento.

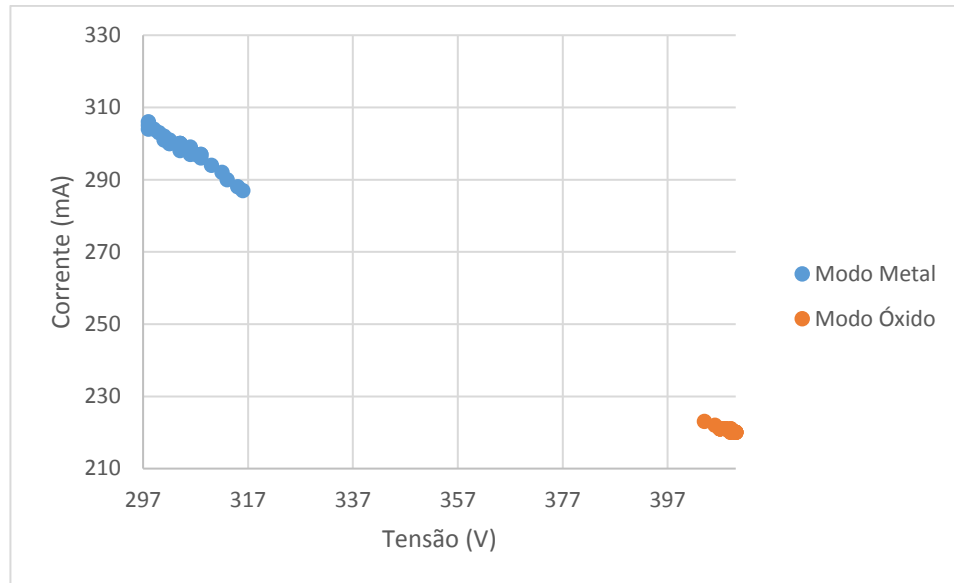


Gráfico 10 – Tensão versus corrente para o quinto experimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados anteriormente mostram que os gráficos de fluxo de O_2 versus pressão possuem a curva característica do envenenamento do gráfico, mostrada na figura 5.

Observando os gráficos de tensão versus corrente, é possível analisar que há uma grande divergência da corrente e tensão medidas nos pontos no modo metal e no modo óxido.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Brenner, A., **Electrodeposition of Alloys**, Academic Press, 713 p., 1991.
- [2] Mattox, D.M., **Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control**, Noyes Publications, 917p., 1998.
- [3] Burakowski, T., Wierzchaon, T., **Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies**. New York, CRC press LLC, 608 p, 1999.
- [4] Rossnagel, S. M. et al, **handbook of plasma processing technology: fundamentals, etching, deposition and surface interactions**. Noyes publications, New Jersey , 1990.
- [5] Rohde S. L.; Munz, W. D., **Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering**. Edited by D. S. Rickerby and A. Matthews, Blackie & Sons Limited Glasgow and London, p.93-129 (1991).

- [6] Thin Film Deposition, *Disponível em:* <http://slideplayer.com/slide/10325339/>. Acesso em 30/03/2018.
- [7] Chapman, B.; **Glow discharges and process**. New York, John Wiley & Sons, 1980.
- [8] RECCO, A. C. C. **Estudo da obtenção e das propriedades dos filmes de TiN e TiC depositados sobre aços ferramenta AISI H13 e D2 nitretados e não nitretados**. 2008. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.
- [9] FONTANA, L. C. **Estudo da deposição de filmes de Ti e TiN e desenvolvimento do sistema modificado triodo-magnetron-sputtering**. 1997. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.

Contatos: tadashi_matsumoto@outlook.com e marcos.massi@mackenzie.br