

# Confinamento de elétrons em um sistema de plasma de tela ativa e geração de potencial flutuante extremo no interior da gaiola catódica

## Electron confinement in active screen plasma system and extreme floating potential into the cage

Felipe Hilário Corrêa<sup>1</sup>, Daniela Becker<sup>2</sup>, Luís César Fontana<sup>2</sup>

### RESUMO

Neste trabalho foram realizadas medidas de potencial flutuante no espaço interno de gaiolas catódicas, com plasma de argônio, em função do percentual de área aberta da grade. O módulo do potencial flutuante apresenta valores da ordem de  $10^1$  V em gaiolas com alta porcentagem de área aberta (~70%), por outro lado, observa-se que o módulo de potencial flutuante é da ordem  $10^2$  V (próximo do potencial do catodo) para gaiolas feitas de grades com malha mais fechada (~40% de área aberta). Quando a malha da grade é suficientemente fechada, os elétrons são confinados no espaço interno da gaiola e sua densidade aumenta até atingir o potencial do catodo (grade). Quando a malha é suficientemente aberta, ocorre a formação de catodo oco aberto – COA – que conecta o interior da grade com o plasma e derruba o módulo do potencial flutuante para valores semelhantes ao da região luminescente do plasma. Foram realizadas medidas do potencial flutuante em função da tensão no catodo e da pressão do gás de trabalho para grades com diferentes percentuais de área aberta.

**Palavras-chave:** Plasma; gaiola catódica; potencial flutuante.

### ABSTRACT

The floating potential into Active Screen Plasma System (ASPS), with Ar plasma, was investigated in function of the grids mesh. The floating potential modulus shows values of the order of  $10^1$  V in cages with high percentage of open area (~70%), on the other hand, the floating potential modulus of the order of  $10^2$  V (close to the cathode potential) was observed for cages built with more closed mesh grids (~40% open area). When the grid mesh is sufficiently closed, the electrons are confined in the inner space of the cage and its density increases until reaching the potential of the cathode (grid). When the grid mesh is sufficiently open, occurs the formation of open hollow cathode – OHC –, that connects the inner space of the grid with the plasma space, than drops the floating potential modulus to low values, similar to the glow space of the plasma. Floating potential measurements were carried out as a function of the cathode voltage and working gas pressure for grids with different open area percentages.

**Keywords:** Plasma; cathodic cage; floating potential.

<sup>1</sup>Universidade do Estado de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – Joinville/SC – Brasil.

<sup>2</sup>Universidade do Estado de Santa Catarina – Laboratório de Plasma – Joinville/SC – Brasil.

**Autor correspondente:** Luís César Fontana | Universidade do Estado de Santa Catarina – Laboratório de Plasma | Rua Paulo Malschitzki, 200 | CEP 89.219-710 – Joinville/SC – Brasil | E-mail: luis.fontana@udesc.br

**Recebido:** 14 Mar. 2018 | **Aprovado:** 16 Abr. 2018

## INTRODUÇÃO

Plasmas gerados através de Gaiola Catódica são usados desde a década de 1990 para tratamentos superficiais de materiais, como nitretação, cujo nome em inglês é Active Screen Plasma Nitriding (ASPN). Na nitretação por plasma tradicional o componente a ser tratado é colocado como o cátodo da descarga e interage diretamente com a região luminescente do plasma. Portanto, sua superfície é bombardeada por íons energéticos acelerados através da bainha catódica. No caso da Gaiola Catódica, uma tela de metal que envolve a região da peça é o cátodo da descarga. Assim, uma vez que o plasma ocorre fora da gaiola, os componentes colocados dentro da gaiola não têm contato diretamente com a descarga luminescente do plasma e permanecem em potencial flutuante<sup>1</sup>. O sistema com Gaiola Catódica pode superar algumas limitações inerentes ao processo de nitretação por plasma tradicional, como efeitos de borda, pulverização superficial e nitretação não uniforme devido ao gradiente de temperatura<sup>2</sup>.

O método de geração de plasma em Gaiola Catódica tem sido usado para o tratamento de uma grande variedade de materiais, principalmente, diferentes tipos de aço. Recentemente, seu uso foi estendido para outros tipos de materiais, como a funcionalização superficial de materiais poliméricos e fibras de carbono<sup>1,3-5</sup>. Nos tratamentos com Gaiola Catódica são minimizados os danos devido à minimização do bombardeamento por íons energéticos do plasma, mantendo as espécies ativas geradas na região luminescente, as quais podem se difundir e reagir com as superfícies das peças dentro da gaiola<sup>5</sup>. Os efeitos dos parâmetros de tratamento com gaiola catódica, como o tamanho da malha, a distância entre a amostra e a tela, a pressão do gás de trabalho, a composição do gás, a geometria da peça a ser tratada, o potencial aplicado e, mais recentemente, a área aberta da tela, já foram estudados por diferentes autores<sup>3,6-19</sup>. No entanto, esses estudos se concentraram principalmente nas propriedades das camadas tratadas. Não encontramos estudos sobre as características

elétricas no espaço interno da gaiola (principalmente o potencial flutuante) em função do tamanho da malha, pressão do gás de trabalho e tensão do cátodo. Portanto, neste trabalho, investigamos o potencial flutuante no interior da gaiola catódica através de uma sonda eletrostática posicionada dentro da mesma.

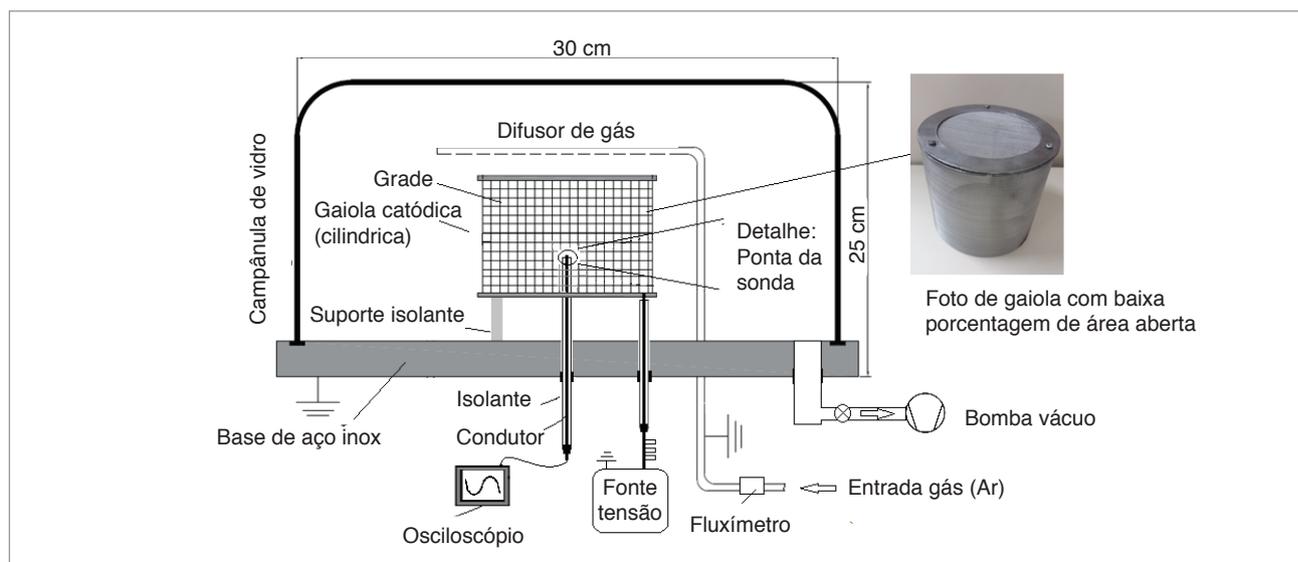
## MATERIAIS E MÉTODOS

A Fig. 1 mostra um diagrama esquemático da montagem experimental que consiste em uma base aterrada de aço inoxidável com uma campânula de vidro de boro-silicato na parte superior. Tanto o tubo difusor de gás como a base metálica consistem no anodo da descarga (base aterrada), enquanto a gaiola é o cátodo (polarizado com tensão pulsada) da descarga elétrica no gás. O lado direito da Fig. 1 mostra uma foto de uma gaiola construída com uma tela de pequena área aberta. Quatro diferentes malhas da grade de aço inoxidável foram usadas para construir gaiolas cilíndricas ( $\varphi = 11$  cm;  $h = 11$  cm) com porcentagem de área aberta mostrada na Tabela 1.

Para a caracterização elétrica da gaiola catódica, foi produzido um plasma de argônio energizado com uma fonte pulsada, ajustável em frequência e tensão (Pinnacle Plus – Pulsed DC, do fabricante Advanced Energy). Essa fonte se caracteriza por produzir pulsos negativos de alta intensidade (centenas de volts),

**Tabela 1:** Porcentagem de área aberta para cada tamanho de malha de grades de aço inoxidável usadas para construir as gaiolas, nomeadas de acordo com a área aberta correspondente.

Malha da grade	Área aberta (%)	Nomenclatura das gaiolas
5	74	G74
10	60	G60
16	55	G55
35	42	G42



**Figura 1:** Esquema da montagem experimental usada neste trabalho para as medidas de potencial flutuante em gaiola catódica.

sendo que cada pulso negativo é seguido de um pulso positivo fixado em 10% do valor da tensão negativa, cujo objetivo é suprimir possíveis arcos voltaicos durante a descarga. O plasma fica ativo apenas durante o pulso negativo. No presente trabalho, os períodos de pulso positivo e negativo foram de 4,0  $\mu$ s e 6,0  $\mu$ s, de modo que o ciclo de trabalho (plasma ligado) foi de 60%. O potencial flutuante foi medido através de uma sonda – um arame de aço inoxidável, encapsulado por um tubo cerâmico – com a ponta posicionada no centro da gaiola. A ponta da sonda, com área de 1,6 mm<sup>2</sup>, fica exposta ao ambiente contendo as cargas elétricas livres (por exemplo, elétrons no centro da gaiola) onde as medidas são realizadas. Para a medida do potencial flutuante, a sonda foi conectada a uma ponteira para medidas em alta frequência da marca Tektronix, com atenuação de 100  $\times$ , ligada a um osciloscópio (TDS 2024B, Tektronix).

A Tabela 2 apresenta as variáveis e parâmetros experimentais usados neste trabalho. O potencial flutuante dentro de gaiolas com diferentes malhas, foi medido em função da tensão no cátodo (pulsada na frequência de 100 kHz) e da pressão do gás de trabalho (Ar). A pressão base atingida na câmara, através do sistema de bombeamento, foi 10<sup>-2</sup> Torr.

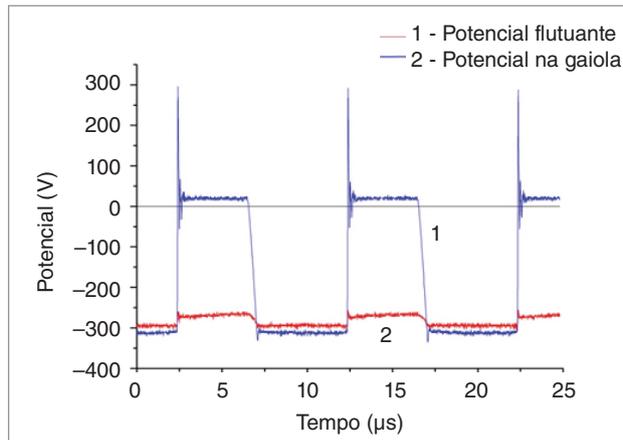
**Tabela 2:** Parâmetros e variáveis experimentais. A frequência da tensão pulsada foi fixada em 100 kHz, com 6,0  $\mu$ s de tempo ligado e o período de pulso off ou plasma desligado foi de 4,0  $\mu$ s (duty cycle = 60%).

Voltagem média (cátodo) (-V)	Voltagem de pico (-V)	Fluxo de Ar (sccm)	Pressão de trabalho (Torr)	Gaiolas
100 a 200	210 a 420	6,0	0,5	Todas
150	315	2,5 – 29,0	0,3 – 1,5	Todas
150	315	6,0	0,5	G42
150	315	6,0 e 18,0	0,5 e 1,0	G55

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

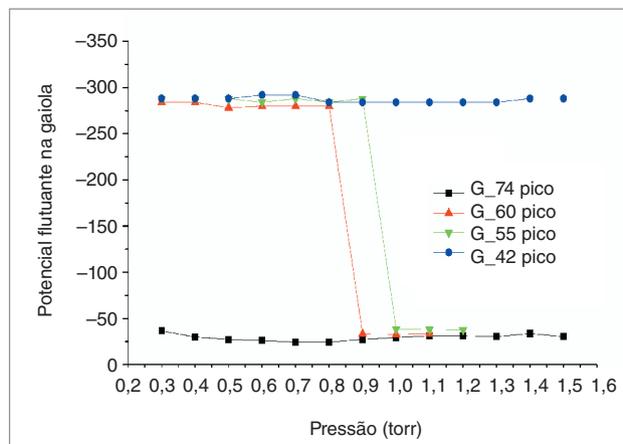
A Fig. 2 mostra a forma de onda do potencial pulsado aplicado ao cátodo da descarga, gaiola G42 (42% de área aberta), comparado com o potencial flutuante medido no centro da gaiola. Observa-se que o módulo do potencial flutuante dentro da gaiola é muito grande, com valores próximos do potencial do cátodo. Durante o período de pulso ligado, com tensão de pico  $V_p = -315$  V aplicada ao cátodo (período com plasma ativo na parte externa à gaiola), o potencial flutuante dentro da gaiola atinge o valor de -290 V e, durante o período pulso desligado (sem plasma ativo), o potencial flutuante tem uma queda diminuta em seu módulo para aproximadamente -270 V. Esses valores elevados de potencial flutuante só ocorrem quando a malha da grade tem baixa porcentagem de área aberta, ou seja, pequenos espaços abertos entre os arames, da ordem de 1 mm<sup>2</sup>. Quando a porcentagem de área aberta é alta e os espaços entre os arames são grandes (por exemplo 10 mm<sup>2</sup>), o módulo do potencial flutuante dentro da

gaiola torna-se comparável àquele obtido na região luminescente do plasma, que é da ordem de uma dezena de Volts.



**Figura 2:** Forma de onda do potencial pulsado aplicado ao cátodo da descarga, gaiola G42, comparado com o potencial flutuante medido no centro da gaiola. Gás de trabalho: Ar; pressão: 0,5 Torr; frequência: 100 kHz.

A Fig. 3 mostra o valor potencial flutuante médio no centro da gaiola em função da pressão do gás de trabalho. Para a gaiola com maior área aberta, G74, o potencial flutuante é aproximadamente constante com valor de aproximadamente -15 V, um valor semelhante àqueles obtidos na região luminescente de um plasma DC pulsado em baixa pressão.

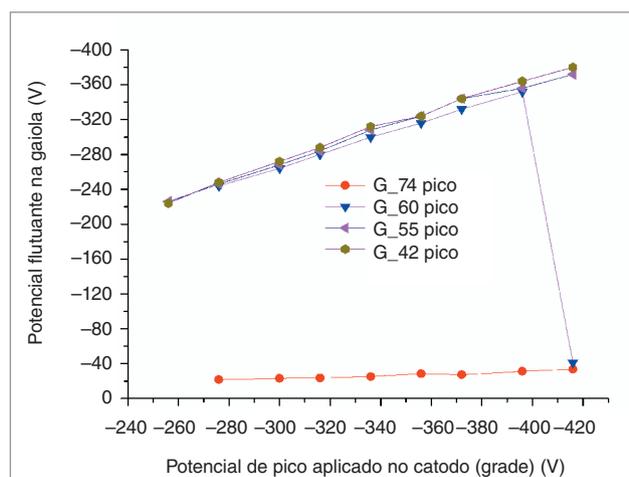


**Figura 3:** Efeito da pressão de trabalho sobre o valor médio do potencial flutuante dentro das gaiolas. Tensão de pico no cátodo  $V = -315$  V; frequência  $f = 100$  kHz.

Para gaiolas com área aberta intermediária, G55 e G60, observa-se uma mudança acentuada no potencial flutuante quando a pressão do gás de trabalho atinge valores de 0,9 Torr e 1,0 Torr, respectivamente. Para a gaiola com a menor área aberta, G42, observa-se que o potencial flutuante é maior, cerca de -270 V, em toda a faixa de pressão investigada (0,3 Torr a 1,5 Torr). Esse grande potencial flutuante negativo indica que o número de elétrons confinados na gaiola é muito grande. A mudança súbita observada no potencial flutuante para as gaiolas G60 e G55 ocorre

simultaneamente ao início de uma descarga tipo Cátodo Oco Aberto (COA) em um ou mais orifícios da grade, os quais são facilmente visualizados devido à sua intensa emissão de luz visível. Farnell et al.<sup>20</sup> mostrou que o potencial de plasma em um COA pode ser um potencial positivo com módulo elevado (até +80 V, dependendo do local da medição). A ocorrência de apenas um COA na superfície da grade já é suficiente para criar uma conexão entre a parte interna da gaiola e o plasma externo que permite a fuga de elétrons confinados na gaiola para o plasma, na região externa. Dessa forma, o potencial flutuante no interior da gaiola cai abruptamente para valores próximos de -20 V, similar ao valor encontrado na região luminescente do plasma. Isso mostra que a geometria da tela pode desempenhar um papel importante na densidade de partículas carregadas dentro da gaiola e, portanto, no desempenho da mesma para aplicações como tratamento de superfícies.

A Fig. 4 mostra o potencial flutuante dentro da gaiola em função da tensão de pico aplicada ao cátodo. Os resultados para a gaiola G74, com alta porcentagem de área aberta, mostram um baixo módulo para o potencial flutuante negativo (entre -21 V e -13 V). Por outro lado, como visto anteriormente, as gaiolas com menor área aberta apresentam um elevado módulo do potencial flutuante (dentro da gaiola), o qual aumenta à medida que a tensão no cátodo aumenta.



**Figura 4:** Potencial flutuante médio em função da tensão do cátodo no pico para diferentes gaiolas.  $P_{Ar} = 0,50$  Torr;  $f = 100$  kHz; e ciclo de trabalho duty cycle = 60%.

O efeito COA foi observado para a gaiola G60 quando a tensão de pico aplicada ao cátodo foi de cerca de -400 V. Isso mostra que existe um valor limite para o potencial aplicado ao cátodo, acima do qual ocorre a ruptura na barreira de potencial, formando uma descarga através de um orifício entre os arames da grade. Esse COA produz uma conexão elétrica entre o interior da grade e o plasma externo, promovendo a drenagem dos elétrons e diminuindo drasticamente o valor do potencial flutuante dentro da grade para valores típicos do potencial na região luminescente, da ordem de  $10^1$  V.

Para uma distribuição de velocidade Maxwelliana dos elétrons, a corrente de partículas carregadas na sonda pode ser descrita pela Eq. 1<sup>21</sup>:

$$I_e = eAn_e \left[ \frac{kT_e}{2\pi m} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{e(V_s - V)}{kT_e}\right) \quad (1)$$

onde:  $A$  é a área exposta da sonda,  $m$  é a massa do elétron e  $k$  é a constante de Boltzmann. Vemos, na Eq. 1, que a corrente eletrônica depende da densidade espacial de elétrons  $n_e$ , da temperatura eletrônica  $T_e$ , do potencial espacial  $V_s$  e do potencial aplicado à sonda  $V$ . Quando a sonda está isolada (como no nosso caso), ela atinge rapidamente o potencial flutuante ( $V = V_f$ ) e a corrente eletrônica é suprimida até se tornar igual à corrente iônica. Nesse caso, a corrente total na sonda, obtida pela soma da corrente iônica com a corrente eletrônica, deve ser nula (Eq. 2):

$$I = I_e + I_i = 0 \quad (2)$$

É bem conhecido da literatura<sup>22</sup> que a corrente iônica é dada por (Eq. 3):

$$I_i \approx -\frac{1}{2} eAn_i \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \quad (3)$$

onde:  $n_i$  é a densidade de íons no meio e  $M_i$  é a massa iônica. Portanto, combinando as Eqs. 1, 2 e 3, obtemos uma relação entre o potencial flutuante, o potencial espacial e a temperatura dos elétrons (Eq. 4):

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{2(V_s - V_f)}{\ln\left[\frac{2M_i}{\pi m}\right]} \quad (4)$$

No caso do presente trabalho, podemos considerar que a densidade de íons positivos no centro de gaiolas com baixa proporção aberta (por exemplo, G42) é muito pequena, visto que o valor do potencial flutuante nessa região é praticamente igual ao potencial negativo aplicado ao cátodo. Portanto, podemos considerar que a temperatura dos elétrons também é baixa (da ordem de alguns eV), insuficiente para produzir ionização dentro da gaiola. Nesse caso, a Eq. 4 só é satisfeita se o potencial espacial  $V_s$  é muito próximo do potencial flutuante  $V_f$ . Portanto, qualquer objeto situado dentro de uma Gaiola Catódica com baixa proporção de área aberta ficará sujeito a um elevado potencial negativo. Além disso, esse tipo de dispositivo pode ser usado como uma fonte de geração de elétrons livres. Fontes de elétrons têm diversas aplicações tecnológicas, desde o uso como catalizadores de reações químicas até funcionalização de superfícies sólidas. Em trabalhos futuros, medidas através de uma sonda de Langmuir permitirão quantificar a temperatura e a densidade eletrônica

na gaiola. O mapeamento dessas grandezas em diferentes posições dentro da gaiola, desde a vizinhança da grade até o centro da gaiola, poderão fornecer subsídios para entender melhor o processo da geração dessa alta densidade de elétrons livres aprisionados em gaiola catódica.

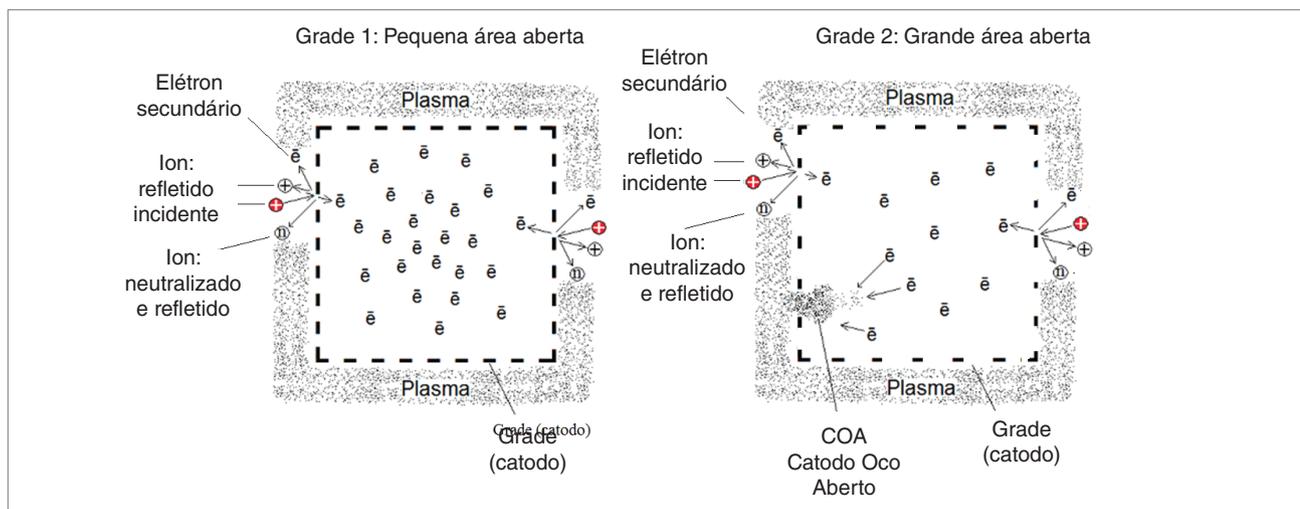
Uma hipótese para essa alta concentração de elétrons aprisionados na gaiola é a geração de elétrons secundários devido ao bombardeamento iônico nos arames da grade. Íons provenientes da região luminescente do plasma, no espaço externo à gaiola, são acelerados na bainha catódica e atingem a grade que está polarizada negativamente. A incidência de íons na grade promove a emissão de elétrons secundários, com rendimento entre 0,01 e 0,5<sup>23</sup>, dependendo da energia e materiais envolvidos no processo. Existe uma probabilidade de esses elétrons entrarem no espaço interno da gaiola e ficarem aprisionados nesta, devido à barreira de potencial negativo da grade. A Fig. 5 mostra uma ilustração da hipótese proposta no presente trabalho para o processo de geração e acumulação de elétrons livres em uma Gaiola Catódica. A Fig. 5a apresenta uma gaiola com pequena porcentagem de área aberta (por exemplo, 40%), para a qual não ocorre a formação de COA. Nesse caso, a densidade de elétrons  $e$ , conseqüentemente, o potencial flutuante dentro da gaiola são grandes. A Fig. 5b mostra o caso em que a área aberta da gaiola é grande (por exemplo, 70%), com a formação de um COA através do qual há uma drenagem de elétrons para o plasma externo à gaiola e, conseqüentemente, uma diminuição na densidade de elétrons e derrubada do potencial flutuante no interior da gaiola.

É possível que ocorra alguma ionização no interior da gaiola devido a elétrons secundários emitidos da grade. Isso será investigado em trabalhos futuros através de medidas de temperatura e densidade eletrônica, usando uma sonda de Langmuir.

## CONCLUSÃO

O potencial flutuante gerado no interior de gaiolas catódicas, usando plasma de argônio, pode ter um módulo similar ao potencial verificado na região luminescente do plasma ( $\sim 10^1$  V) ou pode assumir um valor extremo (da ordem de  $10^2$  V), próximo ao potencial do cátodo. Quando a gaiola é construída com uma grade de malha mais fechada ( $\sim 40\%$  de área aberta) e furos de pequenas dimensões (da ordem de  $\sim 10^0$  mm<sup>2</sup>), os elétrons são confinados na gaiola catódica e não passam pela barreira de potencial imposta pela voltagem negativa do cátodo (grade). Dessa forma, a densidade de elétrons na gaiola aumenta, até atingir o valor do potencial do cátodo. Quando a gaiola é construída com grade de alta porcentagem de área aberta (furos com área da ordem de  $\sim 10^1$  mm<sup>2</sup>) pode ocorrer a formação de Cátodo Oco Aberto – COA –, o qual conecta o espaço interno da gaiola com a região luminescente do plasma. Isso faz com que os elétrons confinados na gaiola migrem para a região luminescente do plasma (espaço de cargas positivo) através de um COA. Quando a grade tem furos com dimensões intermediárias, foi verificado que o surgimento de COA depende da pressão do gás de trabalho e da tensão no cátodo. Há um limite para os valores de pressão e/ou tensão catódica, acima do qual se forma uma descarga tipo COA e, portanto, ocorre uma diminuição abrupta do potencial flutuante.

O controle no módulo do potencial flutuante é muito relevante para os processos de tratamento de materiais em gaiola catódica. Além disso, um sistema de plasma com gaiola catódica, operando na condição de potencial flutuante extremo, gera um confinamento de elétrons livres que pode ser usado como uma fonte de elétrons. Existem várias aplicações tecnológicas que usam feixes de elétrons como parte importante do seu processo, o que abre oportunidade para novas aplicações da gaiola catódica.



**Figura 5:** Processo hipotético para a geração de elétrons secundários na grade devido ao bombardeamento de íons provenientes do plasma e conseqüente aprisionamento de elétrons no interior da gaiola: (A) grade com pequena proporção de área aberta sem formação de COA; (B) grade com alta proporção de área aberta e conseqüente formação de COA.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESC, pelo financiamento parcial deste trabalho através do projeto PAP/2007/TR 655, ao CNPq pelo projeto Universal/445242/2014-0 e à CAPES pela bolsa de estudos.

## REFERÊNCIAS

- Li CX. Active screen plasma nitriding – an overview. *Surf Eng.* 2010;26(1-2):135-141. Disponível em: <http://doi.org/10.1179/174329409X439032>
- Bell T, Li CX. Active screen plasma nitriding of materials. *Int Heat Treat Surf Eng.* 2007;1(1):34-38. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1179/174951407X169231>
- Ahangarani S, Mahboubi F, Sabour AR. Effects of various nitriding parameters on active screen plasma nitriding behavior of a low-alloy steel. *Vacuum.* 2006;80(9):1032-1037. <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2006.01.013>
- Li CX, Bell T, Dong H. A study of active screen plasma nitriding. *Surf Eng.* 2002;18(3):174-181. Disponível em: <http://doi.org/10.1179/026708401225005250>
- Gallo SC, Charitidis C, Dong H. Surface functionalization of carbon fibers with active screen plasma. *J Vac Sci Technol A.* 2017;35(2):021404. Disponível em: <http://doi.org/10.1116/1.4974913>
- Hubbard P, Doney SJ, Doyle ED, McCulloch DG. Influence of bias and in situ cleaning on through cage (TC) or active screen plasma nitrided (ASPN) steels. *Surf Eng.* 2006;22(4):243-247. Disponível em: <http://doi.org/10.1179/174329406X122937>
- Sousa RRM, Araújo FO, Ribeiro KJB, Mendes MWD, Costa JAP, Alves Jr C. Cathodic cage nitriding of samples with different dimensions. *Mater Sci Eng.* 2007;465(1-2):223-227. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.msea.2007.03.007>
- Nishimoto A, Tokuda A, Akamatsu K. Effect of through cage on active screen plasma nitriding properties. *Mater Trans.* 2009;50(5):1169-1173. Disponível em: <http://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008431>
- Sousa RRM, Araújo FO, Costa JAP, Dumelow T, Oliveira RS, Alves Jr C. Nitriding in cathodic cage of stainless steel AISI 316 : influence of sample position. *Vacuum.* 2009;83(11):1402-1405. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.04.054>
- Gallo SC, Dong H. Study of active screen plasma processing conditions for carburising and nitriding austenitic stainless steel. *Surf Coat Technol.* 2009;203(24):3669-3675. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.045>
- Ahangarani S, Sabour AR, Mahboubi F, Shahrabi T. The influence of active screen plasma nitriding parameters on corrosion behavior of a low-alloy steel. *Journal of Alloys and Compounds.* 2009;484(1-2):222-229. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.03.161>
- Nishimoto A, Nagatsuka K, Narita R, Nii H, Akamatsu K. Effect of the distance between screen and sample on active screen plasma nitriding properties. *Surf Coat Technol.* 2010;205:S365-S368. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.034>
- Hubbard P, Partridge JG, Doyle ED, McCulloch DG, Taylor MB, Doney SJ. Investigation of nitrogen mass transfer within an industrial plasma nitriding system I : the role of surface deposits. *Surf Coat Technol.* 2010;204(8):1145-1150. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.08.029>
- Hubbard P, Doney SJ, Partridge JG, Doyle ED, McCulloch DG. Investigation of nitrogen mass transfer within an industrial plasma nitriding system II : application of a biased screen. *Surf Coat Technol.* 2010;204(8):1151-1157. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.08.030>
- Nishimoto A, Nagatsuka K, Narita R, Nii H, Akamatsu K. Effect of Gas Pressure on Active Screen Plasma Nitriding Response. *J ASTM Int.* 2011;8(3):1-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/JAI103286>
- Asadi ZS, Mahboubi F. Effect of component's geometry on the plasma nitriding behavior of AISI 4340 steel. *Mater Des.* 2012;34:516-521. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.066>
- Sousa RRM, Araújo FO, Gontijo LC, Costa JAP, Alves Jr C. Cathodic cage plasma nitriding (CCPN) of austenitic stainless steel (AISI 316): influence of the different ratios of the (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) on the nitrided layers properties. *Vacuum.* 2012;86(12):2048-2053. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.05.008>
- Daudt NF, Barbosa JCP, Macêdo MOC, Pereira MB, Alves Jr C. Effect of cage configuration in structural and optical properties of TiN films grown by cathodic cage discharge. *Mater Res.* 2013;16(4):766-771. Disponível em: <http://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000065>
- Nishimoto A, Matsukawa T, Nii H. Effect of screen open area on active screen plasma nitriding of austenitic stainless steel. *ISIJ International.* 2014;54(4):916-919. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.916>
- Farnell Casey C, Williams JD, Farnell Cody C. Comparison of hollow cathode discharge plasma configurations. *Plasma Sources Sci Technol.* 2011;20(2):025006. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/2/025006>
- Allen JE. Probe theory – the orbital motion approach. *Physica Scripta.* 1992;45(5):497-503. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/45/5/013>
- Chen FF. Lecture notes on langmuir probe diagnostics. Mini-course on plasma diagnostics. In: IEEE-ICOPS Meeting. Jeju, Korea; 2003.
- Chapman B. Glow discharge processes: sputtering and plasma etching. New York: John Wiley & Sons; 1980.