

CARACTERIZAÇÃO DE MICROTOCHAS DE PLASMA VISANDO APLICAÇÃO TECNOLÓGICA

Janaína Correa do Nascimento (ITA)
Eduardo Cezar Barbosa de Barros Aragão (ITA)
Bogos Nubar Sismanoglu (ITA) bogos@ita.br

Resumo: *Este trabalho visa o estudo e a caracterização de microtochas de plasma para fins aplicativos. As microtochas são pequenas extensões de microplasmas produzidas em laboratório, da ordem de 200 μ m, em forma de jatos, que podem atingir comprimentos de alguns mm em ambiente atmosférico. Foram levantadas curvas de tensão-corrente e curvas de tensão de sustentação da descarga versus comprimento do jato (L). Também foram estimadas curvas de intensidade de campo elétrico na região do jato, da potencia dissipada e da densidade de elétrons em função de L. Estas análises mostram que a região do plasma estendido se comporta como a região da coluna positiva de um plasma de baixa pressão, apresentando campo elétrico praticamente constante.*

Palavras-chave: Microtochas de Plasma, Microplasmas, Densidade de Elétrons.

CHARACTERISATION OF PLASMA MICROTORCH AIMING TECHNOLOGICAL APPLICATION

Abstract: *This work aims both the study and characterization of plasma microtorches for applications purposes. The microtorches are small extensions of microplasmas produced in the laboratory, on the order of 200 μ m, in the form of jets, which can reach lengths of several mm in atmospheric pressure. Current-voltage curves and sustaining discharge voltage versus the length of the jet (L) were raised. Curves of electric field intensity were also estimated along the jet, as well as the dissipated power and the electron number density as a function of L. These results show that the region of the extended plasma behaves as the region of the positive column of a low-pressure plasma presenting nearly constant electric field.*

Keywords: Plasma Microtorches, Microplasmas, Electron Number Density.

1. INTRODUÇÃO

O termo plasma se aplica a um gás contendo espécies neutras e eletricamente carregadas como elétrons, íons positivos, íons negativos, átomos e moléculas [1 - 9]. Macroscopicamente, um plasma é eletricamente neutro, sendo que qualquer desbalanceamento de carga resultará em campos elétricos internos que tendem a mover as cargas de modo a restabelecer o equilíbrio. As microdescargas ou microplasmas correspondem a uma nova classe de descarga elétricas cujas propriedades são bastante parecidas com às das descargas luminescentes, podendo operar em pressões elevadas. Mesmo nestas condições de operação as microdescargas apresentam-se como plasmas fora do equilíbrio termodinâmico e, por isso, elas são referidas comumente como descargas luminescentes em alta pressão.

Ultimamente há um crescente interesse pela área de microplasmas. Estas são previstas para terem aplicações nos mais diversos ramos do conhecimento científico e nas diferentes disciplinas, como óptica, sistemas microeletromecânicos, crescimento de materiais, fabricação de microchips e aeronáutica. Dentre as aplicações mais importantes temos os reatores de plasma para descontaminação química e bacteriológica, dispositivos

cirúrgicos médicos e odontológicos baseados nas descargas de microplasma pulsado, microjato de plasma frio na pressão atmosférica, geração de radiação UV, processamento de superfícies, formação de exímeros, microoptoeletrônica, microreator de fluxo para decomposição molecular, deposição de filmes policristalinos de diamante por microjato de plasma, painel de tela plana, fotodetecção, microlasers, para citar alguns [1].

Estas descargas elétricas nas pressões moderadas e altas correspondem a um novo processo na área da física e da engenharia de plasmas. Além da facilidade de seu uso, já que não requer equipamento dispendioso de alto-vácuo, as descargas em pressão elevada geram partículas ativas em alta densidade, como radicais livres, elétrons energéticos e íons. O crescente interesse na geração de plasmas em alta pressão, nos modos corrente contínua e pulsado, é devido ao fato de que para aplicações em escala industrial, é muito importante alcançar uma operação confiável dessas descargas em tensões moderadas. Devido ao seu tamanho reduzido, pois o microplasma se origina e é mantido confinado em uma região pequena (geralmente um orifício circular cujo diâmetro varia de $100\mu\text{m}$ a $1000\mu\text{m}$), costuma-se referir essa descarga elétrica luminescente como microplasma ou simplesmente microdescarga. Através da associação de microdescargas em paralelo [1], obtém-se um plasma de alta densidade de elétrons, em pressão elevada, tensão de algumas centenas de Volts e baixa corrente elétrica.

Este trabalho objetiva o estudo e a caracterização de microplasmas através da modalidade de microjato ou microtocha de plasma. Nestes dispositivos, o microplasma é expulso de seu orifício catódico através da ação de um fluxo de gás, que arrasta o plasma para o ambiente atmosférico.

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A fonte de tensão de corrente contínua (CC) foi construída para poder fornecer uma tensão máxima de 5kV , operando uma corrente de descarga de até 200mA . Há nela um conjunto de 8 resistores de $47\text{k}\Omega$ cada, que podem ser associados em série e/ou em paralelo através de um sistema de chaveamento, para serem empregados como limitadores de corrente para as descargas. Também foram utilizados em nossos experimentos: jogo de capacitores a óleo da Cornell Dubilier de 200V de 1 a $20\mu\text{F}$; resistores de $47\text{k}\Omega$; multímetro digital Minipa; microamperímetro analógico Engro com escala de 1 a $500\mu\text{A}$; picoamperímetro analógico Keithley; fonte DC HP de 0 a 70V com variação de $0,2\text{V}$; fonte DC HP de 0 a 1kV com variação de 1V ; transformador corrente alternada (CA) de 60Hz 115V - 15kV ; osciloscópio digital HP 400MHz e analógico Minipa de 20MHz ; câmera digital Kodak 6.1 Megapixel modelo DX7630; microscópio óptico com câmera digital acoplada. A injeção de argônio de pureza 99,995% (White-Martins, Air Liquide) utilizado nos experimentos é controlada por um fluxímetro modelo MKS 247C, que possibilita um fluxo de 0 a 500sccm ($1\text{sccm} = 1,667 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{s}$). Os desvios e os erros experimentais encontrados nos gráficos deste trabalho são de natureza estatística (desvio padrão) levando-se em consideração a reprodutividade dos experimentos em pelo menos 5 eventos de cada situação experimental. Nestes gráficos, onde as barras de erro não aparecem, subentende-se que estes erros são de natureza intrínseca do próprio aparelho de medição, geralmente inferior a 5%.

Microtubos de metal podem ser usados como sistemas para gerar plasmas em forma de microtochas ou microjatos [4]. A vantagem na utilização de microtubos está na produção de microdescargas que se estendem na forma de microtochas, alimentados pelo fluxo de gás

que atravessa este tubo. O tubo capilar deverá ter um diâmetro interno que propicie a operação do jato na pressão atmosférica. Para a geração de microjatos de argônio em ar atmosférico nós utilizamos tubos capilares de aço inoxidável, com diâmetro interno (D) de $150\mu m$ e outro de $400\mu m$ e aproximadamente $4cm$ de comprimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 1 mostra o diagrama esquemático de um tubo capilar em operação e a fotografia digital ampliada de um microjato de plasma de argônio em ar atmosférico. A figura 2 mostra as fotografias digitais de diversas descargas elétricas em operação. A descarga foi gerada usando-se um gerador de tensão de CC e uma resistência de carga R múltiplo de $47k\Omega$ necessária para limitar a corrente elétrica até no máximo $10mA$. O tubo foi polarizado negativamente e uma chapa metálica (ou tela) de molibdênio serviu como anodo. A distância (L) entre a abertura do tubo e este anodo pôde ser variada através de dois micrômetros independentes, um atuando no catodo e o outro no anodo.

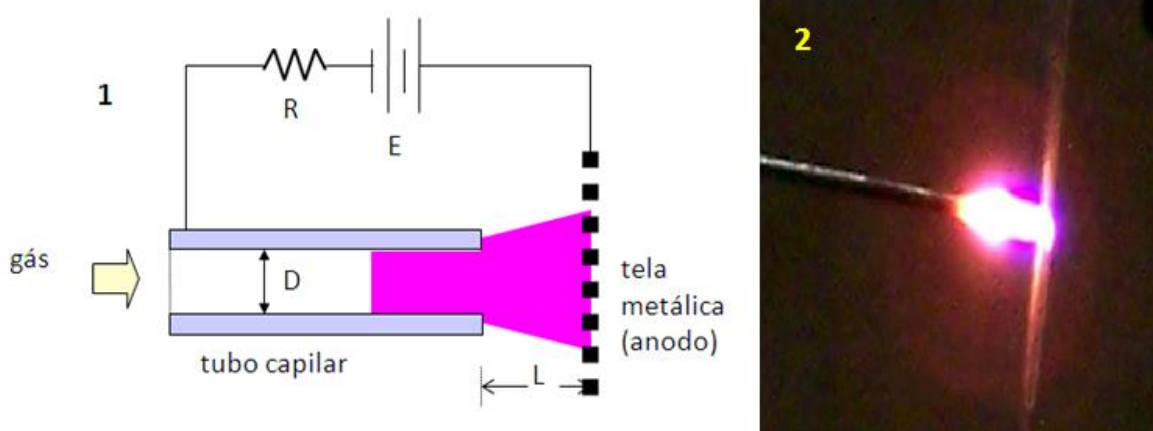


Figura 1: Diagrama esquemático de um tubo capilar (1) e a fotografia digital de um microjato (2).

Deste modo, estudaram-se as características desta microdescarga em função dos seguintes parâmetros: tensão de sustentação do plasma, corrente elétrica da descarga, distância L e fluxo do gás. A figura 3 mostra a curva de tensão-corrente de um microjato de argônio exposto em ar atmosférico. O diâmetro interno do tubo é de $400\mu m$ e o fluxo de argônio, de $200sccm$. Esta curva foi obtida para vários valores de L . Inicialmente, induziu-se a formação da descarga através de um faiscador, para um valor de $L < 0,2mm$ e, a partir daí, variou-se L lentamente, até o seu valor desejado. Para este tubo especificamente com diâmetro interno de $400\mu m$ observou-se o seu superaquecimento, e até mesmo a sua fusão, para operações com fluxo menor que $200sccm$. Nesta curva, inicialmente observa-se uma ligeira queda na tensão de sustentação da descarga à medida que a corrente se eleva.

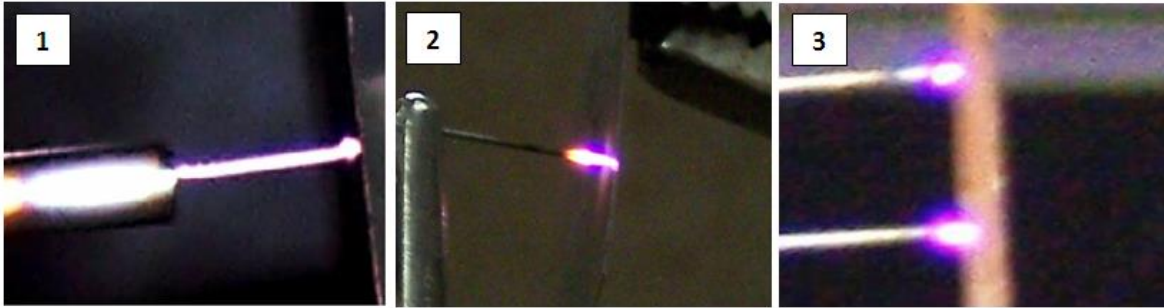


Figura 2: Fotografia digital de microjato de plasma de argônio operando em ar atmosférico: tubo capilar com diâmetro de $400\mu\text{m}$ (1) e com diâmetro de $150\mu\text{m}$ (2). Associação em paralelo de dois microjatos, tubos capilares com diâmetro interno de $150\mu\text{m}$, cada um acoplado a um resistor de $10k\Omega$ (3).

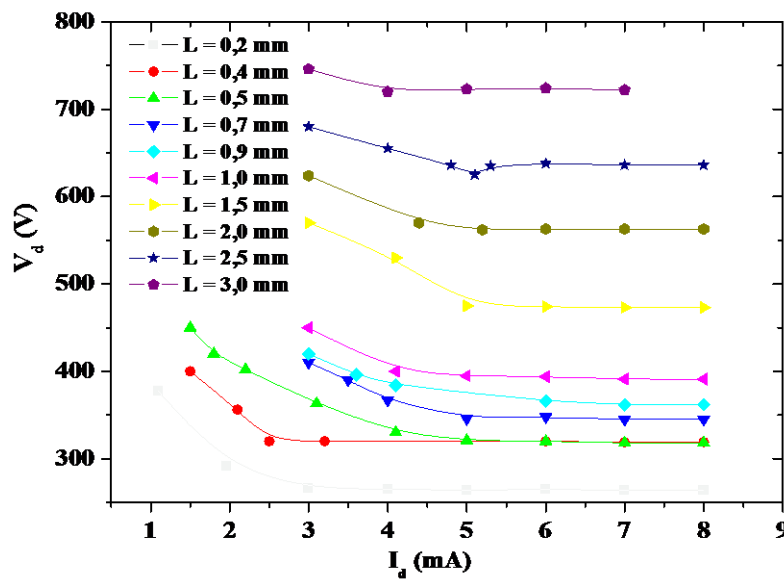


Figura 3: Curva característica de tensão-corrente de um microjato de plasma de argônio em ambiente atmosférico, tubo com diâmetro interno $D = 400\mu\text{m}$, fluxo de gás $\Phi = 200\text{sccm}$ e para várias distâncias de separação entre catodo e anodo (L).

Isto pode ser explicado pelo aquecimento da extremidade do tubo, acarretando a emissão termiônica de elétrons. Um fluxo mais elevado de gás refrigera a extremidade do tubo e evita seu superaquecimento. Aumentando-se L , aumenta-se a tensão da descarga, e esta dependência torna-se linear para grandes valores de L , superiores a 1mm . Na operação do microjato de plasma para grandes valores de L necessita-se de intensidades maiores de corrente elétrica. Estes comportamentos podem ser vistos na figura 4, para várias correntes elétricas de operação. A linearidade observada entre V_d e L (para grandes valores de L) sugere uma interessante comparação entre este tipo de descarga e a descarga luminescente clássica de catodo-anodo planos. Neste, o campo elétrico é praticamente constante na região da coluna positiva, para grandes valores da distância intereletrodos. Esta comparação foi observada anteriormente [4] e nós iremos explorar mais este fato, inclusive obtendo um cálculo aproximado da densidade de elétrons e sua variação em função de L .

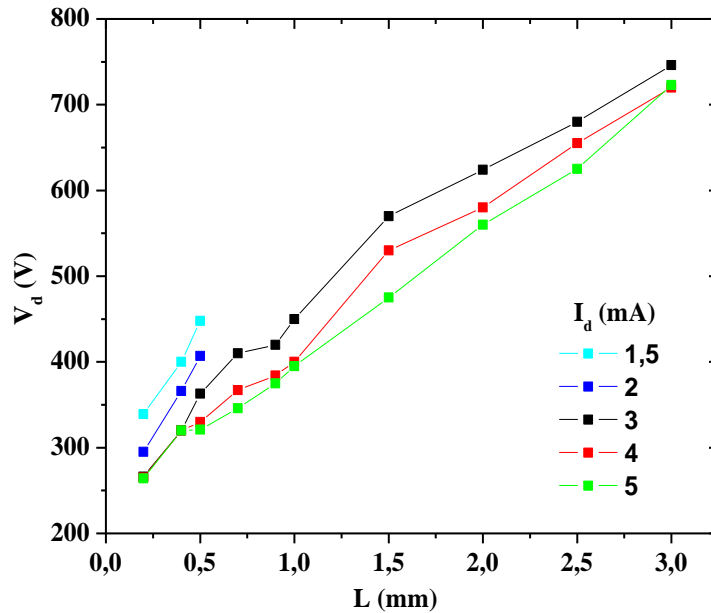


Figura 4: Curva da tensão de sustentação da descarga de microjato de plasma de argônio em ar atmosférico, em função da distância entre o catodo tubular e o anodo.

A figura 5 mostra a variação da intensidade do campo elétrico em função da distância L entre o catodo tubular e o anodo, para algumas correntes elétricas de operação da descarga. Observa-se que a intensidade deste campo diminui quando se aumenta a distância L entre catodo e anodo até aproximadamente $2mm$. Para $L > 2mm$ a intensidade do campo elétrico E é praticamente constante.

Nesta região para o qual E é constante, a densidade de elétrons n_e pode ser estimada, numa primeira aproximação, a partir dos parâmetros elétricos da descarga, do campo elétrico E , da densidade de corrente elétrica j e da mobilidade do elétron μ_e [4]: $j = n_e e \mu_e E$, onde e é a carga elementar. Mantendo-se a temperatura T do gás constante, a mobilidade torna-se inversamente proporcional à pressão P . A mobilidade reduzida para o argônio na temperatura ambiente é dada por $(\mu_e p)_{T_0} = 0,33 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ Torr/V.s}$ [4]. Em artigos recentes obtêve-se a temperatura do gás argônio $T \cong 1100K$, numa descarga luminescente na pressão atmosférica, para uma corrente de aproximadamente $5mA$ [4].

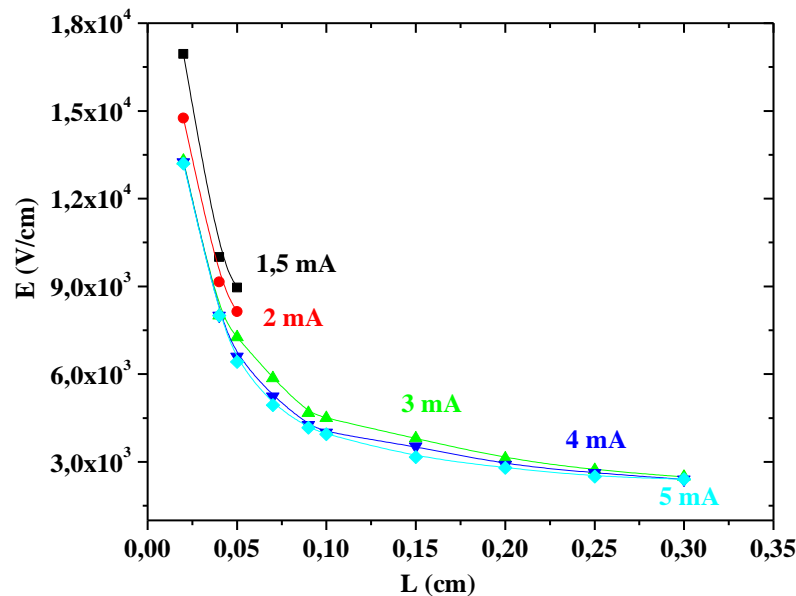


Figura 5: Intensidade do campo elétrico em função da distância intereletrodos, para descarga de microjato de plasma com $D = 400\mu\text{m}$, $\Phi = 200\text{sccm}$ e para várias correntes elétricas de operação.

Levando-se esta elevada temperatura do gás em consideração, iremos supor que a mobilidade reduzida dependa linearmente de T , visto que o livre caminho médio do elétron é diretamente proporcional a T e a mobilidade é diretamente proporcional ao livre caminho médio (demonstra-se que $\mu \cdot P$ é diretamente proporcional a $T^{1/2}$, mas observa-se também que esta relação não concorda com os resultados experimentais disponíveis [4, 5]). Portanto, para $T = 1100\text{K}$, obtemos $\mu_e = 1,59 \cdot 10^3 \text{cm}^2/\text{V.s}$. Para grandes valores de L , a intensidade do campo elétrico é de aproximadamente 2400V/cm , segundo valores observados na figura 5. Para uma corrente elétrica de 5mA , a densidade de corrente elétrica no microjato será de 4A/cm^2 e, finalmente, encontramos $n_e = 6,55 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$. A densidade de potência $P = jE$ para este caso pode ser calculada a partir destes dados experimentais, resultando em $P = 9,6\text{kW/cm}^3$.

A figura 6 mostra a variação da densidade de potência elétrica com a distância entre o catodo oco tubular e o anodo L , para uma corrente elétrica de operação de 5mA . Também para esta corrente construiu-se a curva da variação da densidade de elétrons em função de L (figura 7). Observa-se que a densidade de elétrons aumenta com L , para uma corrente elétrica mantida constante. Uma possível explicação está no aumento da tensão elétrica de sustentação de uma descarga mais longa.

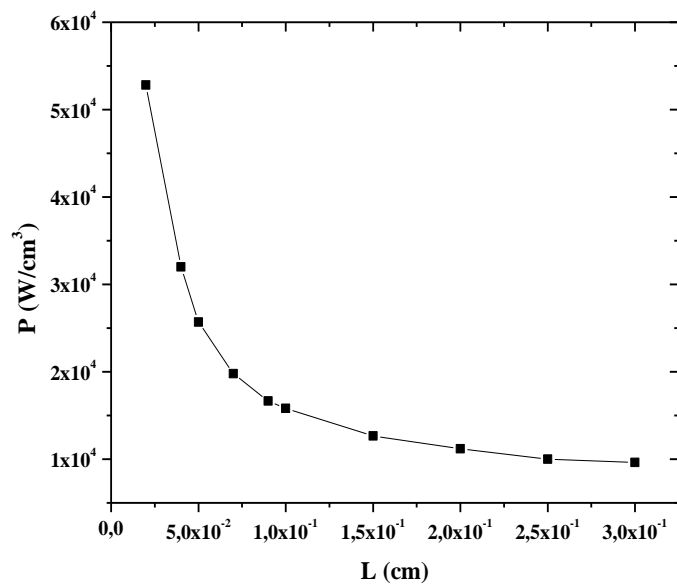


Figura 6: Curva da densidade de potência elétrica em função da distância intereletrodos, para descarga de microjato de plasma com $D = 400\mu\text{m}$, $\Phi = 200\text{sccm}$ e corrente de descarga de 5mA .

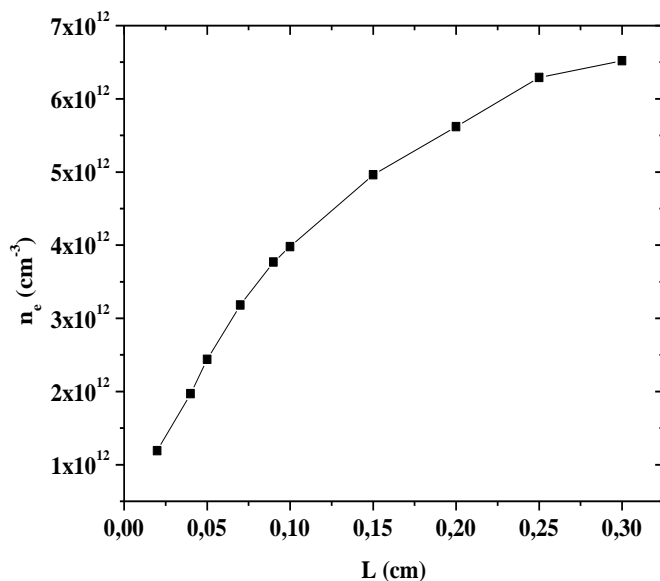


Figura 7: Densidade de elétrons em função da distância entre catodo e anodo no microjato de plasma de argônio operado em ar atmosférico, $D = 400\mu\text{m}$, $\Phi = 200\text{sccm}$ e corrente de descarga de 5mA .

A figura 8 mostra a variação do campo elétrico em função da corrente elétrica da descarga, de acordo com dados obtidos do gráfico da figura 3, para vários comprimentos do microjato de plasma, operado em ar atmosférico. Para todos os microjatos estudados, curtos e longos, verifica-se na figura 7 que para operações com correntes elevadas o campo elétrico permanece inalterado, levando a uma saturação deste. Para distâncias catodo-anodo (L) menores (jatos curtos), a intensidade do campo elétrico é maior. Jatos mais longos ($L > 2mm$) operam sob campos elétricos com intensidades comparáveis entre si.

A figura 9.1 mostra outro tipo de microdescarga extensa sustentada, brilhante e ruidosa, expandida através do uso do fluxo intenso de argônio que flui por um tubo com diâmetro interno de $3mm$. O tubo foi polarizado negativamente e uma folha de metal posicionada na frente do tubo foi usada como anodo. Pela abertura do tubo liberou-se um intenso fluxo de gás argônio, em ambiente atmosférico. Aproximando-se bastante o tubo do anodo, e fornecendo-se uma ddp de mais de $1000V$ entre eles, rompeu-se uma descarga com o auxílio de um faiscador.

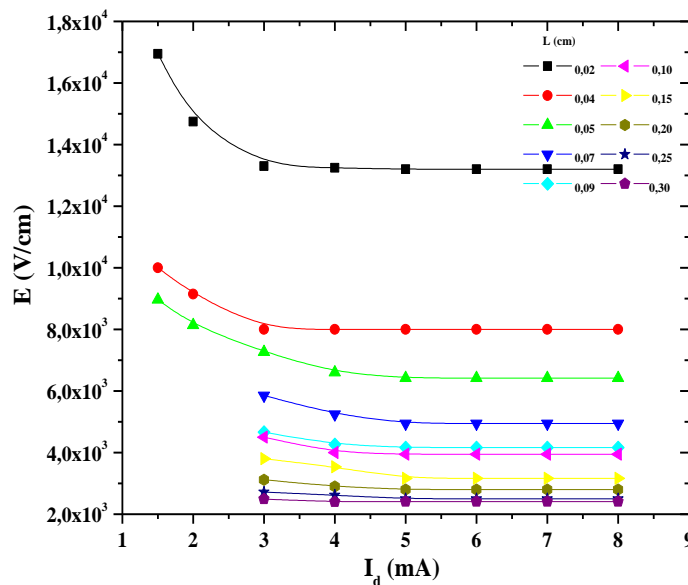


Figura 8: Campo elétrico em função da corrente da descarga para vários comprimentos (L) do microjato de plasma de argônio operado em ar atmosférico, $D = 400\mu m$ e $\Phi = 200sccm$.

A partir daí, afastou-se lentamente o anodo do tubo, através de um micrômetro acoplado a este, e aumentou-se lentamente a corrente da descarga, para mantê-la continuamente acesa. Agindo desta maneira, conseguiu-se estender a descarga brilhante, inicialmente com aproximadamente $100\mu m$ de comprimento, até $3,5cm$ de comprimento, conforme mostra a figura 9.1. Observou-se que devido ao diâmetro muito grande do tubo não havia descarga dentro do tubo e que, portanto, o efeito catodo oco não ocorria. O tubo servia apenas como elemento direcionador do fluxo de gás.

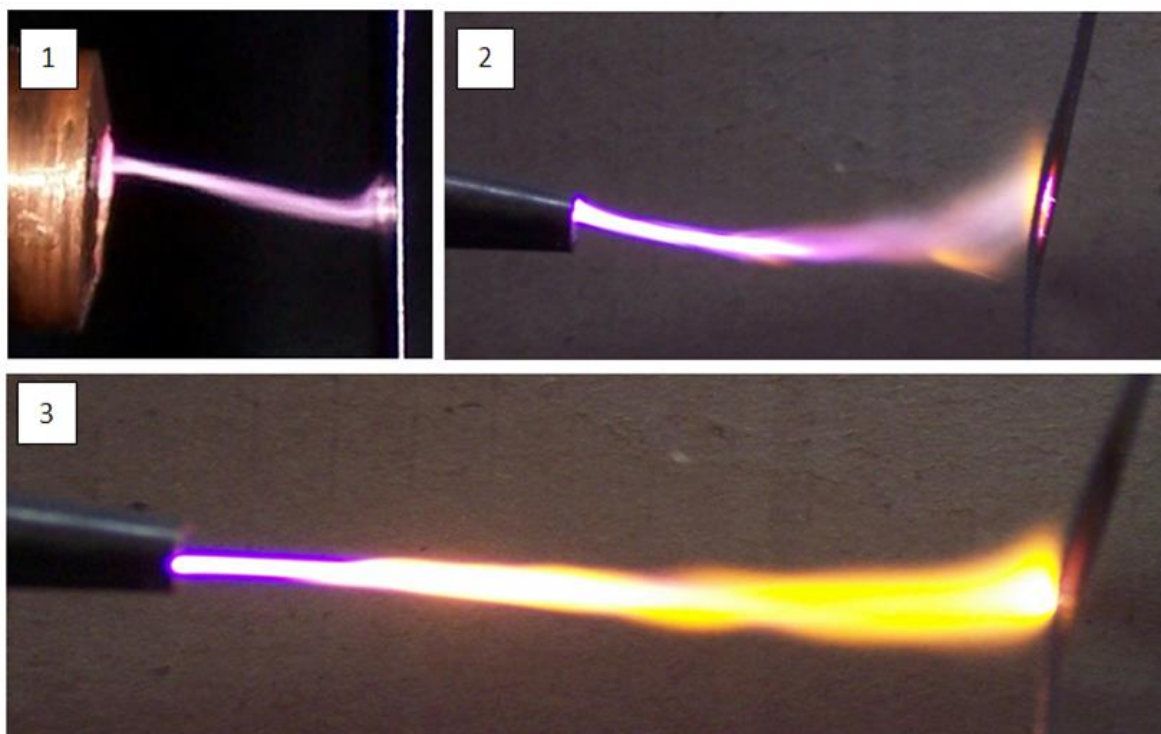


Figura 9: Descarga estendida no modo CC mantida por fluxo de argônio em ar atmosférico (1). Descargas brilhantes idênticas ao caso (1), mas agora operando em corrente alternada, nas tensões de $5k$ (2) e $15kV$ (3) com $10cm$ de comprimento.

Operando-se no modo corrente alternada (CA), obteve-se um plasma sustentado estendido de $10cm$ de extensão, na tensão de aproximadamente $12000V$, e verificou-se o aquecimento e fusão da grade metálica de aço (figura 9.2, 9.3). Devido ao fluxo de gás, neste caso, a extremidade do tubo não sofreu aquecimento.

Usando-se o princípio de funcionamento do microjato de plasma, substituiu-se o microtubo pelo dispositivo de microcatodo oco. Fixou-se o dispositivo dentro de um tubo de poliacetal (isolante elétrico) e introduziu-se gás argônio no sentido do anodo para o catodo (figura 10). O diâmetro do furo foi de $250\mu m$, com eletrodos de molibdênio (espessura de $100\mu m$) e mica como dielétrico ($250\mu m$ de espessura).

Esta descarga não ocorre em ar na pressão atmosférica, no modo estático (sem fluxo de gás), para este diâmetro. Contudo, observou-se a formação de um plasma estável, no modo catodo oco e normal, quando se operou com um fluxo de $200sccm$, ou mais. Quando o fluxo de gás flui no sentido oposto, ou seja, do catodo para o anodo, não se observa uma descarga estável. Isto se explica pelo fato do fluxo de gás, neste caso, dificultar a aproximação dos íons à região catódica, dificultando a colisão íons-catodo e subsequente emissão de elétrons secundários. Então, não se estabelece a descarga no modo catodo oco, não se observando o efeito de catodo oco.

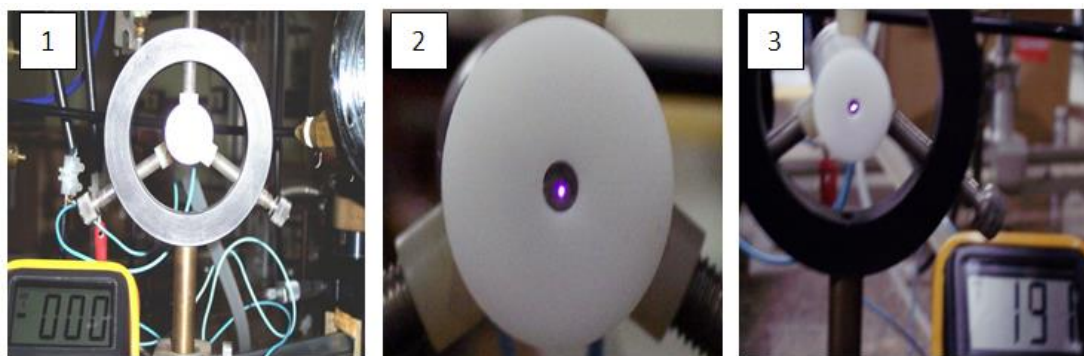


Figura 10: Descarga de microcatodo oco operando em ar atmosférico (1), para furo com diâmetro $D = 250\mu\text{m}$ (2), eletrodos de molibdênio com $100\mu\text{m}$, fluxo de gás argônio $\Phi = 200\text{sccm}$ e tensão de descarga de 191V (3), para uma corrente elétrica de $2,5\text{mA}$.

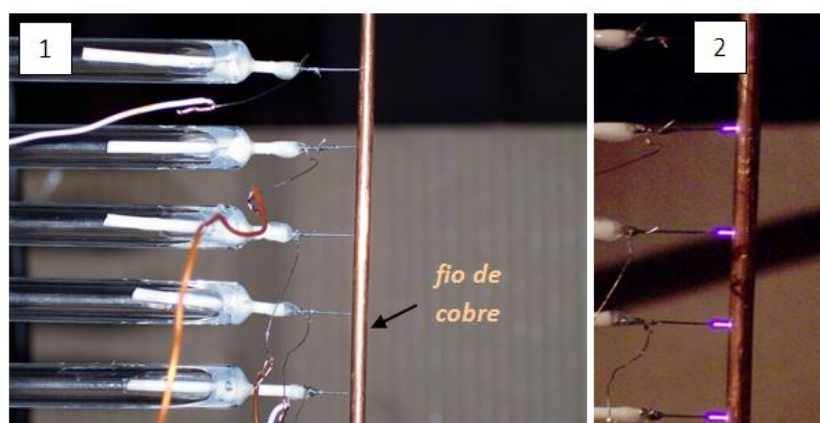


Figura 11: Associação de 5 microjatos de plasma de argônio em ar atmosférico (1). O diâmetro interno do tubo é de $150\mu\text{m}$ e cada um foi ligado a um resistor de $470\text{k}\Omega$. A figura (2) mostra as descargas acesas.

Podemos utilizar estes microjatos de plasma em diversas aplicações como, por exemplo, a deposição de DLC (diamond like carbon) em substratos aquecidos, com o uso de microjatos de gás composto por metano e hidrogênio, a produção de gás ozônio (O_3) através da mistura O_2/Ar e a microcorrosão de metais e semimetais. Para aumentar a área útil do plasma nestes microjatos, com vistas a essas aplicações, deveremos associá-los em paralelo, utilizando resistor em cada microtubo, já que a curva de tensão-corrente não apresenta comportamento resistivo positivo. Na figura 11 apresentamos um conjunto de 5 microjatos associados em paralelo com resistores individuais idênticos e de valor igual a $470\text{k}\Omega$. O tubo de aço que serviu como catodo tem diâmetro interno de $150\mu\text{m}$, o fluxo de gás argônio foi de 200sccm e o microjato foi gerado em ar atmosférico em CC. Nesta figura, um fio condutor de cobre serviu como anodo. Estas associações bastante estáveis são operadas em correntes baixas, de poucos miliampéres. Neste processo, o próprio fluxo de gás refrigera o tubo, podendo-se assim operá-lo por longos intervalos de tempo.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos um estudo completo de caracterização elétrica de microtochas de plasma em corrente contínua e uma introdução ao estudo destes microplasmas em corrente alternada. As microtochas ou microjatos podem ser produzidas facilmente utilizando-se microagulhas metálicas de aço-carbono ou molibdênio, resistentes à variação de temperatura. A fim de evitar o superaquecimento destes tubos, um fluxo de gás deve atravessá-los, formando o prolongamento do microplasma em forma de microjato, que se estende até o segundo eletrodo. A curva característica tensão-corrente apresenta uma operação no modo normal, onde a intensidade de corrente elétrica aumenta para uma determinada tensão mantida constante. Deste modo, a operação do microjato fica reduzida a uma operação do tipo descarga fria, onde o campo elétrico se mantém constante na região de operação. Diversas aplicações podem se feitas com microjatos, como a deposição de DLC (diamond like carbon) em substratos aquecidos; o uso de microjatos de gás composto por metano e hidrogênio; a produção de gás ozônio (O_3) através da mistura O_2/Ar e a microcorrosão de metais e semimetais. Para aumentar a área útil, nestas aplicações, deveremos associá-los em paralelo, utilizando resistor em cada microtubo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio à pesquisa no Laboratório de Mecânica e no Laboratório de Óptica e Espectroscopia do Depto de Física do ITA (processo 12/13064-4), ao CNPq (processo 406035/2013-0) e à CAPES (processo 88881.030340/2013-01)

REFERÊNCIAS

- [1] PESSOA, R. S.; SISMANOGLU, B. N.; AMORIM, J.; PETRACONI, G.; MACIEL, H. S., *Hollow cathode discharges: low and high-pressure operation, in Gas Discharges, Fundamentals and Applications*, Transworld Research Network, India, 2007.
- [2] SISMANOGLU, B. N.; AMORIM, J., *European Physical Journal: Applied Physics* 41 (2008) 165-172.
- [3] GOMES, M. P.; SISMANOGLU, B. N.; AMORIM, J., *Brazilian Journal of Physics* 39 (2009) 25-30.
- [4] SISMANOGLU, B. N.; AMORIM, J.; SOUZA-CORRÊA, J. A.; OLIVEIRA, C.; GOMES, M. P., *Spectrochimica Acta Part B* 64 (2009) 1287-1293.
- [5] OLIVEIRA, C.; SOUZA-CORRÊA, J. A.; GOMES, M. P.; SISMANOGLU, B. N.; AMORIM, J., *Applied Physics Letters* 93 (2008) 041503 (3 pages).
- [6] SISMANOGLU, B. N.; CAETANO, R., *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo* 29 (2010) 25-30.
- [7] SISMANOGLU, B. N.; GRIGOROV, K. G.; CAETANO, R.; REZENDE, M. V. O.; HOYER, Y. D., *European Physical Journal D* 60 (2010) 505-516.
- [8] SISMANOGLU, B. N.; GRIGOROV, K. G.; SANTOS, R. A.; CAETANO, R.; REZENDE, M. V. O.; HOYER, Y. D.; RIBAS, V. W., *European Physical Journal D* 60 (2010) 479-487.
- [9] SISMANOGLU, B. N.; CUNHA, C. L. A.; GOMES, M. P.; CAETANO, R.; GRIGOROV, K. G., *Brazilian Journal of Physics*, 40 (2010) 459-463.