

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM REATOR DE DESCARGA POR BARREIRA DIELÉTRICA E APLICAÇÃO NO TRATAMENTO DE MADEIRAS

A.L.R. Santos; R.Y. Honda^{*}; D.C.R. Santos; K.G. Kostov; R.P. Mota; C.E.S. Amorim; M.E. Kayama
UNESP, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 Pedregulho, 12516-410,
Guaratinguetá, SP, Brasil

Recebido: 10 de setembro, 2007; Revisado: 3 de dezembro, 2007

Palavras-chave: plasma, descarga por barreira dielétrica, madeira.

RESUMO

Este trabalho descreve a caracterização elétrica de um reator de descarga por barreira dielétrica quanto à sua viabilidade econômica e operacional, visando o tratamento superficial de madeiras quando expostas ao plasma reativo gerado nestas descargas. Foram realizadas medidas de corrente, potência e capacitância do reator, através de métodos apropriados, para diversas tensões e diferentes distâncias entre os eletrodos. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade operacional do reator e demonstraram seu baixo consumo de energia. Operando sob tensões pouco elevadas, demonstrou-se a potencialidade desse tipo de reator para o tratamento de superfícies de madeiras.

ABSTRACT

In this work we report the electrical characterization of a dielectric barrier discharge and its economical and operational feasibility in the surface treatment of wood. This treatment occurs when this surface is immersed in the reactive plasma produced by the discharge at atmospheric pressure. Measurements of the current, power and reactor capacitance were carried out for several values of applied voltage and gap distances. The results corroborate the operational feasibility of the reactor and demonstrate its low energy consumption. Operating with moderate voltages it indicates potentiality in the use of this type of reactor in wood surface treatments.

1. INTRODUÇÃO

Descarga por barreira dielétrica (DBD) pode ser usada para produzir um grande volume de plasma não-térmico à pressão atmosférica. Tais plasmas são fontes de espécies altamente reativas (radicais, ozônio, átomos e moléculas excitadas) que podem ser usadas no tratamento de superfícies poliméricas e lignocelulósicas, na redução catalítica de NO_x e CO_x em processos industriais, na oxidação de compostos orgânicos voláteis e na produção de ozônio [1,2,3]. Estas descargas têm demonstrado um grande potencial em aplicações industriais de larga escala, pois realizadas à pressão

atmosférica, apresentam baixos custos de operação e manutenção, devido à ausência de sistemas de vácuo. Além disso, a presença de um dielétrico na abertura da descarga permite operar em altas tensões alternadas, sem a ocorrência de arcos, tal fato é consequência do acúmulo de cargas na superfície do dielétrico, originando dessa forma, um campo elétrico contrário ao estabelecimento da descarga em arco. Contrariamente à situação onde ocorre a descarga em arco, onde toda a energia se concentra num volume muito restrito, na configuração DBD, a energia é transferida na forma de micro-descargas, distribuídas ao longo do volume inteiro do sistema. Este aspecto é extremamente atraente na utilização dessa configuração no tratamento de materiais. Neste contexto promissor das DBDs, aplicadas no tratamento de superfícies, foi projetado e construído no Laboratório de Plasmas do Departamento de Física e Química da Universidade Estadual Paulista (UNESP) – campus de Guaratinguetá, um reator de plasma denominado reator de descarga por barreira dielétrica (ou reator DBD), objetivando o tratamento e recobrimento superficial de madeiras e o estudo das alterações em coberturas convencionais como vernizes e tintas, quando expostos ao plasma reativo oriundo do ar atmosférico [4,5]. A madeira pertence à classe dos compósitos naturais, cuja microestrutura é semelhante à dos compósitos sintéticos. Ela apresenta algumas propriedades que a fizeram ocupar um lugar de destaque no desenvolvimento das civilizações. Ultimamente, o consumo desenfreado desta matéria prima tem tornado necessário o desenvolvimento de novas técnicas de conservação e também de novas aplicações para a madeira. É neste contexto que o uso das descargas por barreira dielétrica (DBD) pode contribuir significativamente para atenuar o problema. O plasma gerado em tais descargas tem se mostrado eficiente no tratamento superficial de madeiras podendo alterar a molhabilidade das superfícies e a propriedade de adesão, sem causar danos térmicos devido às baixas energias envolvidas. Baseado nesse caráter promissor das DBDs, realizou-se o tratamento de madeiras (pinus e mogno) em plasma gerado a partir do ar atmosférico e plasma de hexametildisiloxano (HMDSO) e ar, utilizando diferentes parâmetros de controle.

^{*} honda@feg.unesp.br

2. PARTE EXPERIMENTAL

A figura 1 traz um diagrama esquemático da montagem experimental utilizada no estudo elétrico do reator DBD e a figura 2 uma fotografia.

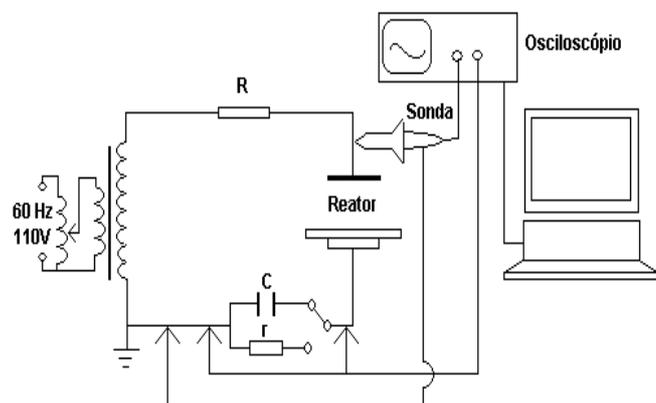


Fig. 1 - Diagrama esquemático da montagem experimental.



Fig. 2 - Fotografia da montagem experimental. Parte inferior, eletrodo circular aterrado. Parte superior bastidor com eletrodos filamentosos.

O reator é constituído por dois eletrodos submetidos a altas tensões alternadas (dezenas de kV) e permeados pelo ar atmosférico. A distância entre os eletrodos pode ser variada. O eletrodo superior é constituído por uma seqüência de 26 fios de Níquel/Cromo, de 0,06 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento, alinhados paralelamente e espaçados de 5,0 mm. O eletrodo inferior, aterrado, é constituído de uma mesa circular de Alumínio, de 28 cm de diâmetro por 1,0 cm de espessura, revestida com um filme dielétrico de poliéster (**Mylar**), de 1,0 mm de espessura e rigidez dielétrica de 394 kV/mm. Devido a presença do dielétrico, a descarga DBD é caracterizada por um grande número de rápidas microdescargas, distribuídas aleatoriamente no tempo e no espaço entre os eletrodos. A tensão empregada no reator vem de um gerador de tensão variável, operando a 60 Hz, constituído de um transformador de alta tensão, que eleva uma tensão de entrada de 110 V a uma tensão eficaz de saída de 13800 V (~39 kV pico-a-pico). Para limitar a corrente no circuito e

proteger o transformador, é usada uma resistência de aproximadamente $1k\Omega$.

2.1 MEDIDAS ELÉTRICAS

As medidas elétricas do reator DBD foram feitas usando um osciloscópio de dois canais (Tektronix TDS 320). A aquisição dos dados do osciloscópio foi realizada por meio computador PC e visualizada graficamente através de software adequado. Para medir a tensão aplicada ao reator foi usada uma sonda de alta tensão (Tektronix P6015A), que atenua o sinal enviado ao osciloscópio em 1000 vezes (Figura 1).

A corrente na descarga foi obtida medindo-se a queda de potencial sobre um resistor de $1200\ \Omega$, ligada em série ao circuito (Figura 1).

A determinação experimental da potência consumida em cada ciclo da descarga foi realizada pelo método da figura de Lissajous, obtida plotando a carga transportada nas microdescargas em função da tensão periódica aplicada. A área interna da figura formada em um ciclo corresponde à energia elétrica distribuída ao plasma num período (potência) [1,6]. A carga foi calculada experimentalmente medindo-se a tensão sobre um capacitor de $0,91\ \mu\text{F}$ ligado em série ao circuito. Assim a potência consumida em um ciclo foi obtida pelo produto entre a freqüência da tensão ac (60 Hz) e a área interna da figura de Lissajous.

A capacitância do reator foi calculada por dois métodos distintos, já que a geometria pouco simétrica do reator impossibilitava o cálculo direto pela expressão de um capacitor plano. Utilizou-se a figura de Lissajous (Figura 5), calculando a inclinação dQ/dV do segmento menos inclinado, e um circuito RLC, através das freqüências de ressonâncias.

2.2 TRATAMENTO DA MADEIRA

Quanto ao tratamento das superfícies das madeiras Pinus e Mogno, as amostras foram preparadas através da aplicação de uma seqüência de lixas (200, 400, 600 e 1200) sobre as superfícies, obtendo-se no final uma superfície uniforme. As amostras foram submetidas às descargas DBD com o espaçamento entre as placas do reator de 5mm e tensão aplicada de $26,4\ \text{kV}_{pp}$, $33,0\ \text{kV}_{pp}$. O tempo de tratamento foi mantido constante em 20 minutos para todas as amostras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

Na caracterização elétrica, a corrente foi medida para quatro valores de tensão: $5\ \text{kV}_{pp}$, $10\ \text{kV}_{pp}$, $15\ \text{kV}_{pp}$ e $20\ \text{kV}_{pp}$, utilizando-se duas distâncias entre os eletrodos: 5 mm e 10 mm. A figura 3 mostra os oscilogramas da tensão ac aplicada e da corrente elétrica associada, para a abertura de 5 mm.

Quando a tensão é de $5\ \text{kV}_{pp}$, figura 3.a, há apenas corrente de deslocamento entre os eletrodos, como pode ser notado pela defasagem de $\pi/2$ rad entre tensão e corrente. Isso indica que esta tensão é inferior a tensão de "breakdown", ponto em que inicia as microdescargas. Para tensão de $10\ \text{kV}_{pp}$, 15

kV_{pp} e $20 kV_{pp}$ (Figuras 3.b, 3.c e 3.d), a corrente apresenta picos acentuados, evidenciando a ocorrência das microdescargas pela atmosfera que preenche a abertura. O campo não uniforme do reator, devido à assimetria dos eletrodos (fios-plano), faz com que os pulsos de corrente das microdescargas gerem picos estáveis (positivos) e instáveis (negativos), onde os pulsos são indistinguíveis e distinguíveis, respectivamente. Além disso, ao aumento da tensão leva a um aumento da carga acumulada sobre a superfície do dielétrico em cada meio ciclo da tensão ac. Isso gera um campo elétrico oposto, que no meio ciclo subsequente, soma-se ao campo elétrico aplicado fazendo com que o “breakdown” ocorra numa tensão ligeiramente menor, como pode ser observado na figura 3 [7,8].

Analisada a corrente elétrica medida para uma distância de 10 mm entre os eletrodos, conclui-se que a tensão de “breakdown”, necessária para iniciar a descarga no reator, é diretamente proporcional à distância entre os eletrodos, devido a uma diminuição do campo elétrico quando se aumenta esta distância.

A potência elétrica depositada ao plasma num ciclo foi calculada para as mesmas tensões e espaçamentos entre os eletrodos estabelecidos para a medida da corrente. A tabela 1 traz os valores das potências calculadas através das figuras de Lissajous.

Tabela 1 - Capacitâncias calculadas para o reator.

	Capacitância p/ 5 mm (10^{-11} F)	Capacitância p/ 10 mm (F)
Fig. de Lissajous	6,0	3,0
Circuito RLC	0,16	0,15

Pelo gráfico da figura 4 fica evidente que para tensões menores que a tensão de “breakdown”, a potência consumida é aproximadamente zero, devido à ausência de microdescargas entre os eletrodos. A figura de Lissajous resulta numa linha reta, como pode ser observado nos gráficos da figura 4 [1]. Acima da tensão de “breakdown”, verifica-se que a potência aumenta rapidamente com o aumento da tensão (Figura 4), devido ao aumento do número de microdescargas, onde a energia é consumida. A figura de Lissajous cresce tendendo a um paralelogramo, como mostra a figura 5.

O aumento da distância entre os eletrodos, para uma tensão acima da tensão de “breakdown”, leva a uma diminuição da potência consumida, em decorrência da diminuição do campo elétrico e, conseqüentemente, do número de microdescargas que transpõe a abertura [8].

As capacitâncias do reator, calculadas para 5,0 mm e 10,0 mm de separação entre os eletrodos, encontram-se na tabela 1. Foram utilizados os métodos da figura de Lissajous e do circuito RLC.

Como se pode notar, a capacitância é inversamente proporcional à separação entre os eletrodos, validando ambos os métodos utilizados para este cálculo. Todavia, as capacitâncias obtidas das figuras de Lissajous são maiores do que as

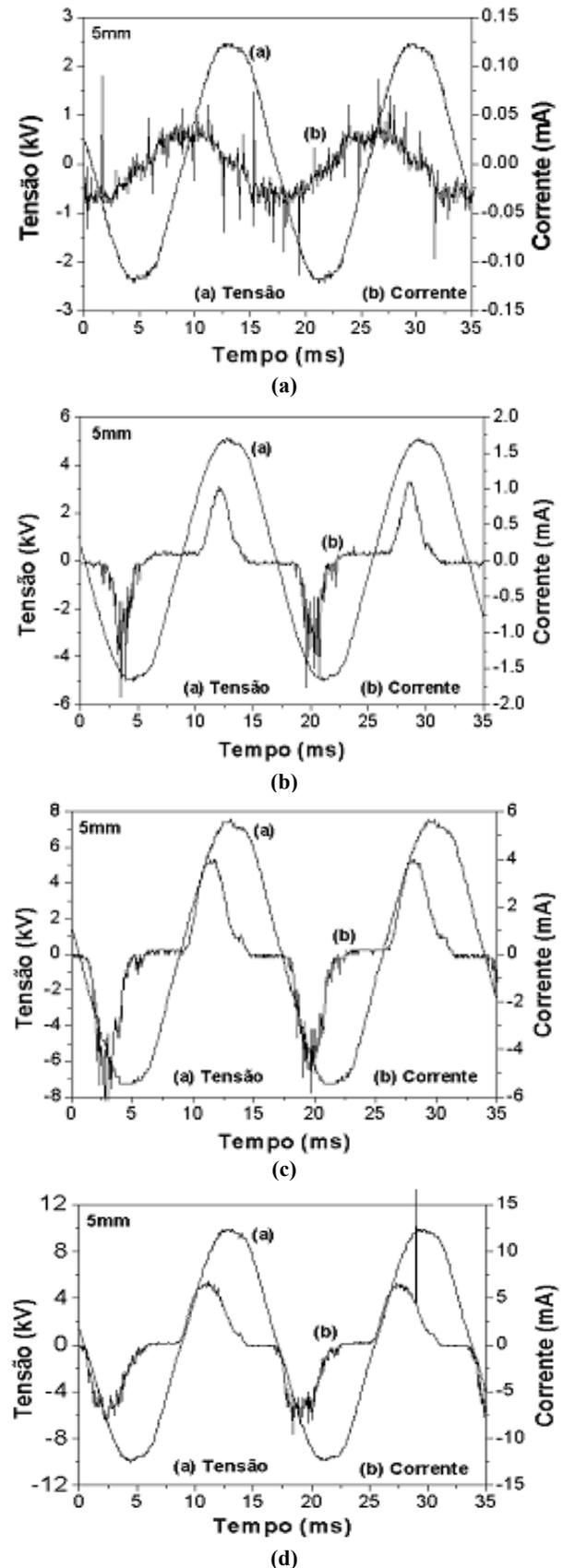


Fig. 3 - Oscilogramas da tensão ac aplicada e da corrente elétrica associada para a abertura de 5 mm: (a) 5 kV_{pp} , (b) 10 kV_{pp} , (c) 15 kV_{pp} e (d) 20 kV_{pp} .

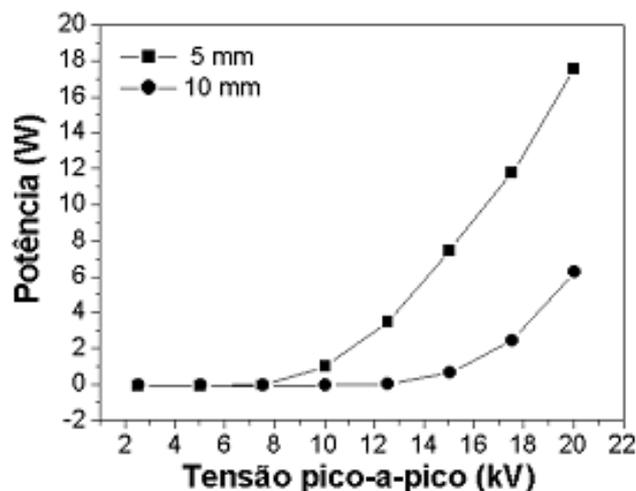


Fig. 4 - Gráfico da potência consumida por ciclo em função da tensão pico-a-pico.

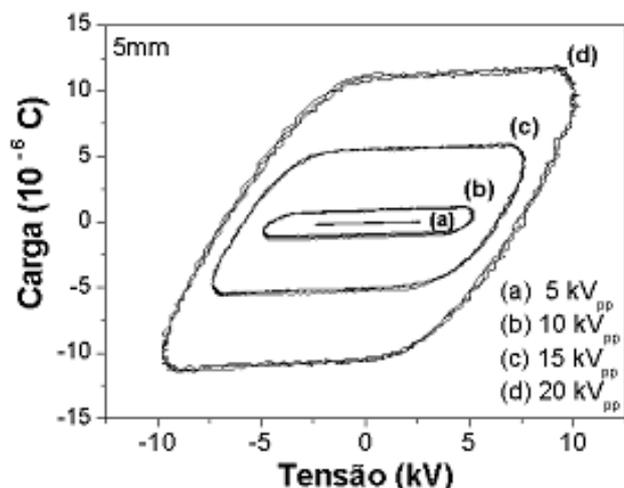


Fig. 5 - Figura de Lissajous para 5 mm de espaçamento entre os eletrodos.

capacitâncias correspondentes calculadas pelas ressonâncias do circuito RLC. Isso pode ser explicado pelo fato de que no método das figuras de Lissajous a tensão envolvida é maior do que a tensão aplicada no circuito RLC, de modo que antes mesmo do “breakdown” há ocorrência de descargas não sustentáveis. Assim, o ar fracamente ionizado tem a condutividade elétrica aumentada levando a uma situação onde a distância efetiva entre os eletrodos diminui com o consequente aumento da capacitância. Logo, o método da figura de Lissajous apresenta a capacitância característica efetiva de um reator DBD, pois este geralmente está sujeito às altas tensões. Assim, embora as frequências de ressonâncias do circuito RLC possam levar a capacitância do reator, as figuras de Lissajous apresentam o valor mais preciso para este caso.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

Amostras de dois tipos de madeiras, Pinus e Mogno, foram confeccionadas e submetidas ao plasma gerado no reator DBD. Foram utilizados como parâmetro de controle, o tempo de exposição e a amplitude da tensão aplicada. Após o tratamento foram efetuadas as medidas dos ângulos de contato e determinado o trabalho de adesão das respectivas superfícies. Estas duas grandezas foram acompanhadas na sua evolução temporal através de um goniômetro modelo Phoenix-450 fabricado pela Surface Electro Optics Corporation-SEO.

Um dado típico para uma amostra de Mogno pode ser visto na figura 6.



Fig. 6 - Imagem típica obtida para as medidas de ângulo de contato.

Para o Mogno observou-se uma diminuição do valor do ângulo de contato com o tratamento a plasma, em relação à medida do ângulo de contato da madeira não tratada (valor inicial dos gráficos da figura 7). Com o aumento da tensão aplicada, observa-se também o mesmo comportamento.

No caso das amostras não tratadas, observa-se uma diminuição temporal do ângulo de contato, menos acentuada para o Mogno em relação ao Pinus (Figuras 7 e 8), ou seja, o tempo de absorção da gota de água pela amostra não tratada de Mogno é maior que o de Pinus.

Para as amostras de Pinus (Figura 8), embora o ângulo de contato tenha sofrido uma diminuição inicial, observa-se uma tendência de aumento do tempo de absorção em função da elevação da tensão aplicada. Este comportamento pode ser explicado considerando que a ação do plasma sobre a superfície promoveu uma deposição de um filme polimérico a partir dos próprios constituintes da madeira, diminuindo a porosidade superficial da mesma, dificultando dessa maneira a absorção.

Após o tratamento a plasma de DBD, observa-se para o caso das amostras de Mogno um aumento na taxa de absorção em função do aumento da tensão aplicada numa correlação direta. O fato da amostra não tratada apresentar uma taxa de absorção menor pode ser creditado à alterações estruturais, provavelmente aumento de radicais livres após a ação do plasma.

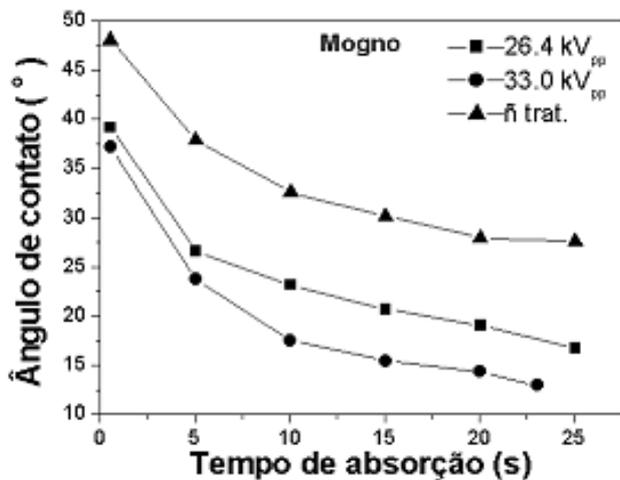


Fig. 7 - Comportamento temporal do ângulo de contato das amostras de Mogno, não tratada e tratadas sob tensão de 26,4 kV_{pp} e 33,0 kV_{pp}.

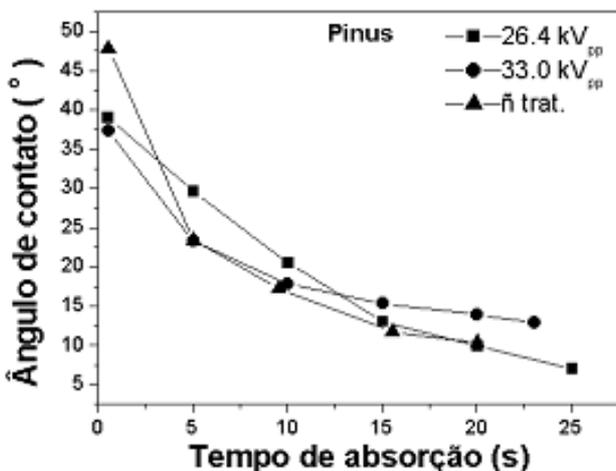


Fig. 8 - Comportamento temporal do ângulo de contato das amostras de Pinus, não tratada e tratadas sob tensão de 26,4 kV_{pp} e 33,0 kV_{pp}.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios e comprovaram a viabilidade econômica e operacional do reator DBD construído, para o tratamento e revestimento de madeiras. O reator opera numa frequência comercial de 60 Hz, sem a necessidade de elevar demasiadamente a tensão, o que demonstra o seu baixo consumo de energia. A caracterização elétrica proporcionou um melhor conhecimento das características das descargas geradas no reator, cujos resultados mostraram-se condizentes com aqueles apresentados em literaturas pesquisadas. Ficou evidenciada a validade dos métodos utilizados no cálculo da corrente, potência consumida e da capacitância do reator. Ficou evidenciado o potencial desse reator para o tratamento de superfícies de madeira e também para a polimerização a plasma.

Os resultados obtidos permitirão otimizar os processos no reator, de modo a adequá-lo aos parâmetros estabelecidos para cada tratamento a ser realizado, operando com consumo mínimo de energia.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FAPESP pelo suporte financeiro e ao Dr. Flávio Davi Hirstch pelo empréstimo do goniômetro.

REFERÊNCIAS

- FRANCK, K.P.; RUDOLPH, R.; MIESSNER, H., *Plasma Chem. Plasma Process.* 23 (2003) 47.
- KOGELSCHATZ, U., *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 46 (2004) B63.
- ELASSON, B.; KOGELSCHATZ, U., *IEEE Trans. Plasma Sci.* 19 (1991) 6.
- WOLKENHAUER, A.; AVRAMIDIS, G.; CAI, Y.; MILITZ, H.; VIÖL, W., *Plasma Process. Polym.* 4 (2007) S470.
- REHN, P.; WOLKENHAUER, A.; BENTE, M.; FÖRSTER, S.; VIÖL, W., *Surface and Coatings Technology* 174–175 (2003) 515.
- CABRERA, O.; CALLEJAS, R.L.; VALENCIA, R.; CASTRO, A.M.; BAROCIO, S.R.; CHAVES, A.E.; CABRERA, A.M.; BENEITEZ, A.P.; MENDEZ, B.R.; ARCE, J.R., *Brazilian Journal of Physics.* 34 (2004) 48.
- ABDEL-SALAM, M.; HASHEM, A.; YEHIA, A.; MIZUNO, A.; TURKY, A.; GABR, A., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 (2003) 252.
- YEHIA, A.; MIZUNO, A., *J. Phys.* 98 (2005) 043305.