

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS

MICROELETRÔNICA / CURSO DE MATERIAIS, PROCESSOS E

COMPONENTES ELETRÔNICOS - MPCE

ALBERTO SHIGUENOBU OTAKI

CONFECÇÃO DE CERÂMICAS DE PORCELANA PARA ISOLAMENTO

ELÉTRICO DE UM REATOR PLANAR DC A PLASMA

SÃO PAULO - SP

2018

ALBERTO SHIGUENOBU OTAKI

**CONFECÇÃO DE CERÂMICAS DE PORCELANA PARA ISOLAMENTO
ELÉTRICO DE UM REATOR PLANAR DC A PLASMA**

Trabalho de Conclusão de Curso para
obtenção de grau de Tecnólogo no
curso de Microeletrônica / Materiais,
Processos e Componentes Elétricos -
MPCE da Faculdade de Tecnologia de
São Paulo

Orientador **Prof. Dr. EDSON MORIYOSHI OZONO**

SÃO PAULO - SP

2018

Dedico este trabalho a toda minha família que sempre me apoiou em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio através de bolsa de iniciação científica;

Ao Professor Orientador Dr. Edson Moriyoshi Ozono;

Ao curso de Microeletrônica e Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos - MPCE;

À oficina Mecânica de Precisão pela disponibilização da oficina mecânica para a confecção dos materiais;

Ao laboratório de Materiais do Departamento de Ensino Geral pela disponibilização do forno elétrico para sinterização do material cerâmico;

Ao amigo **Tiago Fernandes de Almeida**, em seu curso de iniciação científica que compartilhou nas etapas de fabricação das peças de porcelana.

A todo o corpo docente que de alguma maneira possibilitou o aperfeiçoamento deste projeto;

Aos Pais, amigos e colegas, veteranos e calouros, que algum modo contribuíram com incentivos todas as vezes que me sentia desorientado;

À minha esposa, **Kiyoe Oi**, companheira ceramista que tem compartilhado conhecimento de princípios básicos da arte da cerâmica, os materiais de argila e o ferramental necessário para poder efetuar manuseio.

À **Deus**, acima de tudo sobre todas as coisas;

Resumo

A confecção de cerâmicas de porcelana neste projeto teve a finalidade para isolamento elétrica dos eletrodos do reator planar DC. A cerâmica de porcelana foi escolhida pelo fato das peças de porcelanas terem um processo simples de fabricação, ser flexível e apresentar um custo mais baixo do que as peças obtidas de cerâmica de alumina. O objetivo neste projeto foi empregar isolantes elétricos construídos de porcelana para encapsular os eletrodos de um reator planar a plasma e gerar um plasma luminescente entre o cátodo e o ânodo submetido a uma tensão elétrica DC. Durante a descarga de plasma luminescente foi possível identificar a região da coluna dos elétrons e da coluna dos íons e analisar a estabilidade de plasma em função da pressão de gás argônio e da voltagem elétrica de ruptura. Com intenção de testar exaustivamente esta alternativa de isolamento elétrico com porcelanas, efetuamos o levantamento da Curva de Paschen estudando a condição de equilíbrio de plasma conhecida como o Mínimo de Paschen [1]. Os resultados experimentais indicaram que para os valores do produto pd abaixo do pd mínimo não seguem a curva de Paschen devido, possivelmente, às impurezas mascaradas pela porcelana.

Palavra-chaves: reator planar, Paschen, eletrodo, plasma frio, porcelana, dielétrico.

Abstract

The confection of electric insulation by porcelain ceramics can be more acceptable than using pieces of alumina ceramics because the porcelain can be built more flexible manner and porcelain still has low cost. The goal this project was to use electric insulation with porcelain ceramics to encapsulate the electrodes of the planar reactor to generate a normal electrical DC glow discharge. During luminescent plasma discharges was possible to identify an electron column and the positive column regions. During experiment was analyzed the stability of plasma evaluating a sensible those parameters conditions like gas argon pressure and also the breakdown voltage. The measurement of a range of pressure versus electric tension was possible to plot the Paschen's Curves around a minimum sparking potential V_b [1], where glow discharge with a maximum ionization. Our results have indicated that low value under of the product pd , than the minimal electric voltage, does not following theoretical Paschen' curve and it can be related possibly with impurities coming from composition of porcelain.

Lista de Figuras:	Pag.
Figura 1 Diferença entre plasma frio e plasma térmico na transição de pressão de 10^4 Pa do plasma.....	16
Figura 2 Diferenças entre as três formas básicas de transferência de energia da fonte para os elétrons e os íons.....	17
Figura 3 Plasma Luminescente polarizado entre duas placas paralelas do cátodo e do ânodo.....	18
Figura 4 Esquema completo de um reator planar DC a plasma.....	20
Figura 5 Uma campânula de vidro montada sobre um disco de aço inox acionado por uma bomba de palheta da Alcatel.....	21
Figura 6 O sensor APG10-XM, módulo controlador digital APG para leitura das pressões dentro da câmara.....	21
Figura 7 Fonte retificadora trifásica de 22 KVA pressão, uma garrafa de gás argônio, um variac de 1kVA na entrada da fonte e um disjuntor de segurança.....	23
Figura 8 Bucha de estancamento montado com um retentor O-ring.....	24
Figura 9 Passador de corrente do ânodo feita por uma vela e o Ballast de 129 Ohms com o disjuntor de 6 A para limitação de correntes de plasma.....	24
Figura 10 Esquema de um reator planar DC a plasma.....	25
Figura 11 A argila é composta de 40% de caulim, 25% de quartzo, 25% de feldspato e 10% de argila.....	26

Figura 12 Bipartição do molde para facilitar na extração do modelamento da argila para a confecção da porcelana.....	27
Figura 13. Utensílios utilizados para compactar e cortar o barro para diversos formatos.....	28
Figura 14. Torno vertical para modelagem de barro de porcelanas.....	29
Figura 15. Ferramenta de corte utilizada no torno.....	29
Figura 16. Torneamento de uma peça cilíndrica de argila para encapsulamento dos eletrodos.....	30
Figura 17. As peças tubulares de porcelana serão confeccionadas através de um pino central montado no torno vertical.....	31
Figura 18. A curva de sinterização da porcelana as três rampas de elevação de temperatura.....	32
Figura 19. Os tubos de porcelanas foram modelados com auxílio do pino central montado no disco do torno vertical.....	33
Figura 20. As porcelanas após o processo de vitrificação apresenta uma coloração acinzentada.....	33
Figura 21. Os eletrodos, o cátodo e o ânodo, estão encapsulados com porcelanas.....	34
Figura 22. A montagem completa dos eletrodos com porcelanas.....	35
Figura 23. Ocorrência de uma descarga luminescente de plasma com 450 V e 30mA sob pressão de 6,4Pa de gás argônio.....	36
Figura 24. As descargas de plasma luminescente geradas para as pressões na ordem crescente, diminuem na espessura para pressões elevadas.....	38

Figura 25. Comparação de uma curva teórica e a curva experimental da curva de Paschen.....	41
---	----

Lista de Tabelas:

Tabela 01 Programa de MatLab para plotar o gráfico de Paschen.....	42
Tabela 02 Lista dos 25 dados de medidas de pressão e da tensão elétrica.....	42

Sumário

Capítulo 1

1. Introdução Teórica.....	11
1.1. Definição de Plasma.....	13
1.2. Classificação de Plasma.....	14
1.3. Plasma Capacitivo.....	17
1.4. Curva de Paschen.....	18

Capítulo 2

2. Metodologia e Materiais.....	20
2.1. Sistema de Vácuo.....	20
2.2. Fonte Retificadora e Eletrodos.....	22

Capítulo 3

3.1. Confeção de Porcelanas.....	26
3.1.1. Argila para Porcelanas.....	26
3.1.2. Modelagem da Argila.....	27
3.1.3. Torneamento da Argila.....	28
3.1.4. Sinterização das Porcelanas.....	31
3.1.5. Encapsulamento dos eletrodos com porcelanas.....	34
3.2. Levantamento das Curvas de Paschen.....	36
3.3. Resultados e Discussões.....	40

Capítulo 4

4.1. Conclusões.....	43
4.1. Projetos Futuros.....	44
4.2. Referência Bibliográfica.....	45

Capítulo 1

1. Introdução Teórica

Torna-se fundamental a compreensão dos princípios básicos que regem a física de plasma para que seja possível trazer melhorias das tecnologias do funcionamento de reatores a plasma já existentes com vista a aumentar seus rendimentos. Isto acontece quando se procura uma nova rota de produção para obter melhorias na qualidade, como em uniformidade, reprodutibilidade, e no aumento de produção e, acima de tudo, com redução do consumo de insumos e de energia para contribuir para a minimização de impactos ambientais.

A motivação veio no sentido de usar peças de porcelanas com a finalidade de isolamento elétrica dos eletrodos de um reator planar DC, no lugar de utilizar cerâmica de alumina, uma vez que a confecção de cerâmicas de porcelanas ter um custo reduzido. Portanto, o objetivo neste projeto foi empregar isolantes elétricos construídos de porcelana para encapsular os eletrodos de um reator planar a plasma e gerar um plasma luminescente entre o cátodo e o ânodo submetido a uma tensão DC.

Podemos utilizar o emprego das cerâmicas de porcelana para o isolamento elétrico para geração de plasmas em outras aplicações tecnológicas como em descargas de corona, descargas de catodo oco, ou de tochas de plasma DC, tochas indutivas RF ou em descargas de microondas [1,2]. Até mesmo, seguindo a tendência emergente da miniaturização de reatores de baixa potência de micro plasmas, geradas à pressão atmosférica obtendo-se densidades de plasma da

ordem de 10^{-21} elétrons/m³, utilizar porcelanas estendidas facilmente na arquitetura de construção de suas barreiras dielétricas de dimensões reduzidas, da ordem milímetros [3].

Este projeto vem complementar um outro anterior de levantamento da curva de Paschen de um aluno do curso de microeletrônica, Roberto de Barros Emiliano, que concluiu seu Trabalho de Conclusão de Curso em 2011 quando os eletrodos foram encapsulados com material plástico de PVC [4].

No **Capítulo 01** apresenta-se os aspectos do ambiente de plasma utilizando as definições de raio de Debye e da frequência de plasma, para geração de plasma luminescente por uma fonte capacitiva. No **Capítulo 2** o sistema de vácuo e a fonte retificadora conectados com os eletrodos do reator planar DC a plasma. No **Capítulo 03** descreve-se a modelagem da argila por torneamento e depois seguindo para a sinterização das porcelanas dentro de um forno elétrico. O levantamento da curva de Paschen submetendo os eletrodos para uma sequência de tensões elétricas de acordo com uma faixa pré-determinada de pressões de gás argônio. Sequência evolutiva de descargas luminescentes de plasma para baixas pressões e elevadas pressões de gás. E finalmente no **Capítulo 04**, uma análise final dos resultados obtidos discutindo as vantagens e os pontos fracos do emprego de porcelanas para isolamento elétrico dos eletrodos do reator planar DC a plasma. Como também foram apresentadas modificações para os projetos futuros de pesquisa.

1.1. Definição de Plasma

O plasma é a coexistência de partículas eletricamente carregadas, de elétrons, íons, átomos neutros ou excitados e os fótons, num meio extremamente ionizado. Os fótons são produzidos quando os átomos excitados retornam para o seu estado fundamental produzindo radiações. O plasma gera um estado de *quase neutralidade* devido aos elétrons formarem uma blindagem eletrostática em torno dos íons positivos, dentro de uma esfera de raio igual ao comprimento de Debye conhecido como bainha de plasma [5,6],

$$\lambda_d = \left(\frac{k_B T_e \epsilon_0}{n_e e^2} \right)^{1/2}$$

onde T_e é a temperatura eletrônica, n_e é a densidade eletrônica, ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo, k_B é a constante de Boltzmann e e é a carga elementar. Para distâncias maiores que o raio de Debye a densidade dos elétrons é aproximadamente igual à densidade dos íons, $n_e = Zn_i$, mas não impede o trânsito livre de elétrons para o interior da esfera de Debye e permite que o plasma interaja com ondas eletromagnéticas entre várias regiões macroscópicas [5].

A blindagem dos elétrons em torno de seus íons faz com que os elétrons oscilem em torno dos íons com a frequência conhecida como frequência de plasma, dada por,

$$\omega_{pe}^2 = \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}$$

onde n_e é a densidade eletrônica, m_e é a massa eletrônica ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo, e e é a carga elementar.

1.2. Classificação de plasma

A grande mobilidade dos elétrons faz com que os elétrons absorvam a energia da fonte e transfiram a energia do campo elétrico para os íons, como também para os átomos neutros, por efeitos colisionais a uma taxa de transferência dada por [1,2].

$$\frac{T_e - T_i}{T_e} = \frac{3\pi m_i}{32m_e} \left(\frac{2e\ell E}{3k_B T_e} \right)^2$$

onde T_e e T_i é a temperatura dos elétrons e dos íons, respectivamente, m_e e m_i é massa dos elétrons e dos íons, respectivamente, e é a carga elementar, k_B é a constante de Boltzmann e ℓ é o livre caminho médio. Quando a pressão se eleva dentro do plasma, as colisões se intensificam predominando tanto as colisões elásticas entre os elétrons e as colisões inelásticas dos elétrons sobre os íons que é um dos fatores importantes para o aumento de temperatura do plasma. Um aspecto fundamental para o plasma é o seu livre caminho médio ℓ (distância) que uma partícula percorre entre duas colisões sucessivas e que diminui com o aumento da pressão, pelo fato do livre caminho médio ser proporcional ao inverso da pressão $\ell \propto 1/p$ [1] e, desta forma o plasma pode ser classificado de acordo com a faixa de temperatura e sua densidade eletrônica.

Quando a pressão do plasma está abaixo de 10^4 Pa, o livre caminho médio é grande, superando as dimensões da câmara de vácuo do reator. Os elétrons

apresentam uma temperatura eletrônica T_e , muito superior, com cerca de 1 a 10 eV, maior do que a temperatura dos íons T_i , $T_e > T_i$, que apresentam uma temperatura próxima do gás. Neste caso a descarga elétrica é conhecida como *plasma frio* ou *plasma luminescente* sem qualquer tipo de equilíbrio termodinâmico. Esta condição de plasma frio é muito explorada nos processos em microeletrônica.

Entretanto se a pressão dentro do plasma estiver acima da pressão 10^4 Pa, o fator E/p é pequeno da ordem de 10^{-3} V/cmTorr [1,2], deixando o livre caminho médio dos elétrons bastante reduzido com um número de colisões suficientemente grande elevando a taxa de transferência colisional [1] que intensifica a temperatura do plasma, da ordem de 2×10^4 Kelvin, associadas à elevada densidade eletrônica, entre 10^{21} a 10^{26} m⁻³. Devido a essa característica, a temperatura dos elétrons é próxima da temperatura dos íons e o plasma é conhecido como *plasma térmico* munido de um *Equilíbrio Termodinâmico Local - LTE* [1,2]. A energia transferida entre os elétrons e os íons no plasma térmico é muito menor do que propriamente a energia cinética dos elétrons.

O gráfico da **Figura 1**[7] ilustra a diferença entre o plasma frio, onde prevalece uma diferença das temperaturas entre os elétrons e os íons para pressões abaixo da pressão 10^4 Pa e o plasma térmico onde ocorre a aproximação da temperatura dos elétrons e dos íons para pressões acima de 10^4 Pa.

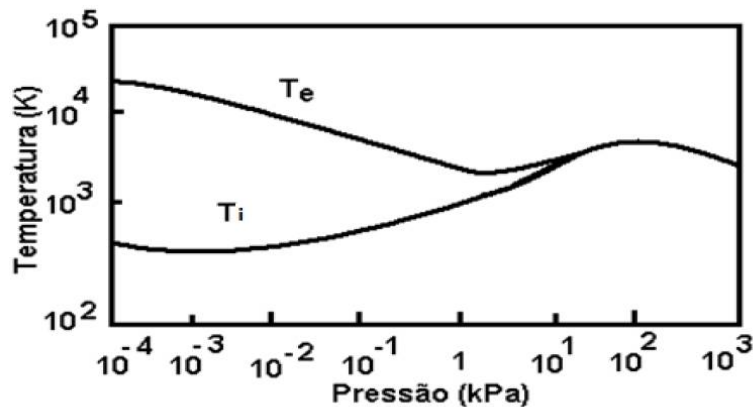


Figura 1 Diferença entre plasma frio e plasma térmico na transição de pressão de 10^4 Pa do plasma[7].

As fontes de potência para produção de plasma podem ser classificadas de acordo com o seu modo de excitação, seja por meio de descarga DC ou AC, pela descarga de radiofrequência RF ou por meio da descarga de microondas [1,2]. Estas formas de fontes podem ser classificadas por três faixas de frequência que fazem fronteiras pelas *frequências ciclotrônicas dos elétrons* ω_e e dos *íons* ω_i . As fontes de plasma DC, AC ou pulsado operam nas frequências baixas até 100 kHz em que a inércia tanto dos elétrons como a dos íons, respondem à oscilação do campo elétrico incidente absorvendo a energia pela superfície. Na faixa de frequências entre 1 MHz até 1 GHz prevalece a excitação de radiofrequência RF onde somente os elétrons respondem ao campo elétrico da fonte. Já para frequências acima de 1 GHz, micro-ondas através de cavidades e guias de onda permitem a transferência de energia para os elétrons e aos íons devido aos efeitos coletivos de plasma.

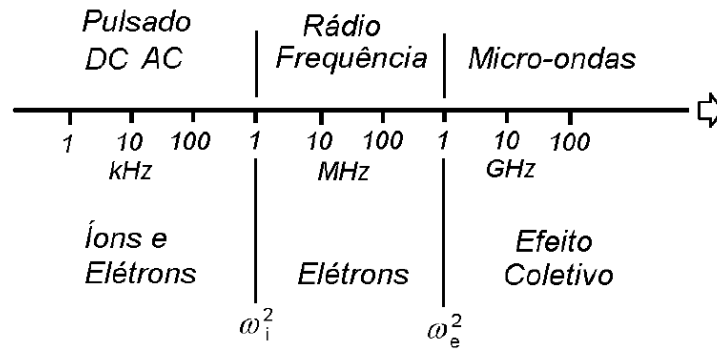


Figura 2 Diferenças entre as três formas básicas de transferência de energia da fonte para os elétrons e os íons [7].

1.3. Plasma capacitivo

Vamos considerar um plasma polarizado entre duas placas paralelas do cátodo e anodo de um reator planar [1], onde elétrons adquire energia suficiente do campo elétrico, há colisões entre elétrons, íons, átomos neutros, quando ocorrem essa transferência de energia ao plasma, ilustrado na **Figura 3** [7]. A ionização do plasma é alcançada quando uma elevada voltagem rompe a rigidez dielétrica do gás produzindo uma descarga gasosa. O gradiente de tensão entre o cátodo e o anodo define o coeficiente de emissão secundária e termiônica dos elétrons emitidos pelo cátodo. Devido à presença de elétrons e os íons, o plasma tem uma condutividade elétrica que excede a de muitos metais [2,3], o que deixa a impedância do reator de plasma muito pequena, sendo necessário um resistor elétrico de *Ballast* em série com o reator planar para limitar a sua corrente elétrica de descarga luminescente e evitar o curto-circuito da fonte retificadora.

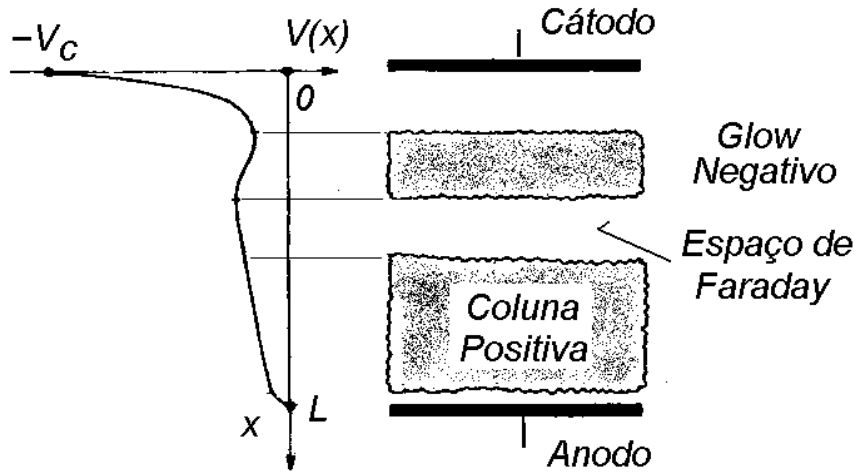


Figura 3 Plasma luminescente polarizado entre duas placas paralelas do cátodo e do ânodo[7].

1.4. Curva de Paschen

A condição de equilíbrio de plasma é conhecida como o *Mínimo de Paschen* [1], corresponde a aplicação de uma voltagem mínima V_b para manter uma descarga elétrica com *máximo de ionização* correspondendo a uma constante característica o produto, $(pd)_{min}$, dado em m.torr, da pressão do gás residual pela distância de separação entre o cátodo e ânodo. Esta lei é conhecida como *Lei de Paschen* e foi estabelecida por Frederick Paschen em 1889.

Num reator a plasma DC a tensão de ruptura V_b de um gás depende do produto pd , onde p é a pressão dentro da câmara em Torr e d é a distância entre os eletrodos em cm. A sua expressão é dada por

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln(1 + \gamma_{SE}^{-1})}$$

onde A e B são constantes que dependem do tipo de gás utilizado e γ_{SE} é o coeficiente de emissão secundária dos elétrons que depende do tipo de material com que é feito o cátodo.

No ponto de voltagem mínima da curva de Paschen o plasma apresenta uma ionização máxima de maior estabilidade na formação de plasma. Considerando a pressão do gás(argônio) com valores do produto pd menores do que o valor mínimo de Paschen $(pd)_{min}$, o número de átomos dentro da câmara não é suficiente e o plasma necessita de elevadas voltagens para produzir mais ionização permitindo a descarga com poucas colisões. Por outro lado, se elevarmos para valores de pressão de argônio acima do ponto de mínimo de Paschen $(pd)_{min}$, o reduzido livre caminho médio faz com que os elétrons dissipem rapidamente a energia com as colisões com os íons e necessitam de maior voltagem elétrica para promover a descarga elétrica. Portanto, a curva de Paschen segue com um ponto de mínimo em pd , com característica exponencial decrescente para pontos abaixo do mínimo e linear crescente para pontos acima do ponto mínimo [2,3].

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é refazer o levantamento da curva de Paschen de uma descarga de plasma DC após o término da confecção de isolantes de porcelanas para os eletrodos. Para que os eletrodos, o cátodo e o ânodo sejam encapsulados com porcelanas com a finalidade em confinar a geração de plasma somente na distância entre os dois eletrodos, evitando a formação de plasma nas regiões periféricas.

Capítulo 2

2. Metodologia e Materiais

Um esquema de um reator planar DC a plasma pode ser esboçado conforme a **Figura 4** com a combinação de um sistema de vácuo e o sistema de alimentação por uma fonte retificadora trifásica DC para propiciar a geração de plasma luminescente,

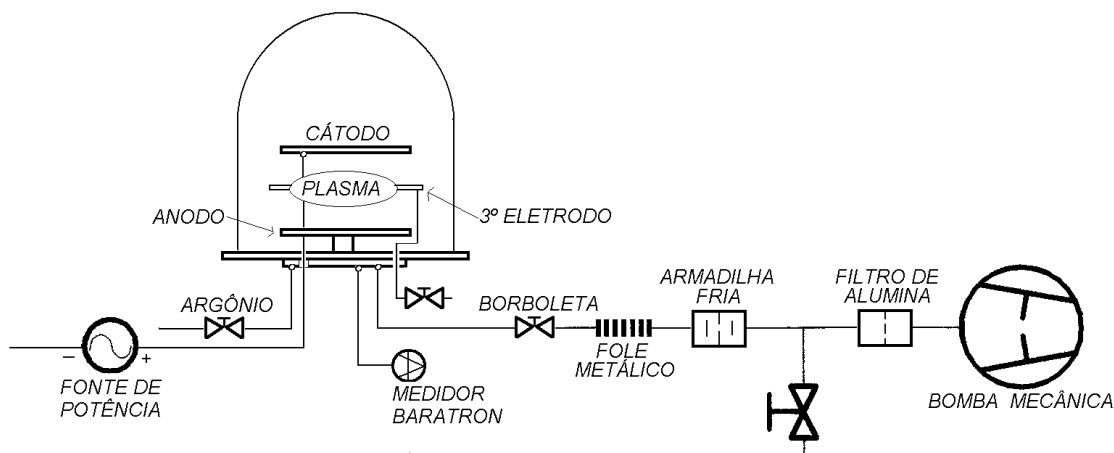


Figura 4 [7] Esquema completo do reator planar DC a plasma

2.1. Sistema de vácuo

O sistema de vácuo do reator planar é composto de uma campânula de vidro montado sobre um disco de aço inox 316L. O sistema de vácuo é proporcionado por uma bomba mecânica de palhetas da *Alcatel FR56-SF1*, acionada com motor trifásico de 220Volts, como mostra a **Figura 5**. A campânula de vidro é preenchida com gás argônio pela abertura de uma válvula esférica 90 graus cuja regulagem fina de vazão é permitida por duas válvulas agulhas externas montadas na mesma tubulação controla o fluxo de argônio que vêm de uma

garrafa controlada por um rotâmetro de 1 litro por minuto. Uma grade de proteção ao redor da campânula tem a função de bloquear possíveis estilhaços de vidro no caso de um acidente com a campânula.



Figura 5 Campânula de vidro montada sobre um disco de aço inox(a); Bomba de vácuo mecânica de palhetas da Alcatel(b).

A pressão do gás argônio interna da câmara é lida por um sensor ativo, *APG10-XM*, da Edwards, provido de um filamento de tungstênio para alcançar precisão de até 10^{-3} mbar cujos sinais de pressão são convertidos em sinais elétricos e enviados para um controlador ativo digital *ADC*, da Edwards, como indica a **Figura 6**.



Figura 6 O sensor APG10-XM, módulo controlador digital APG para leitura das pressões dentro da câmara.

A operação preliminar de preparação de vácuo no interior da campânula do reator planar é obtido primeiramente, com a válvula 90 graus fechada e o medidor de pressão ligados, a bomba de vácuo extrai o ar atmosférico até alcançar uma pressão de 8Pa que, a partir de duas admissões de gás argônio que passa pelo rotâmetro que faz a pressão se elevar até 400Pa. A bomba mecânica arrasta consigo o residual de atmosfera, a pressão interna da campânula pode ser baixada até 1,2 Pa. A pressão interna no interior da campânula pode ser reduzida e controlada aos poucos, ora abrindo ou fechando por efeito de labirinto da combinação das duas válvulas agulhas para admissão gás argônio.

2.2. Fonte retificadora e os eletrodos.

O controle das voltagens elétricas DC a que são submetidas o reator planar são controladas por um variador de tensão, variac de 1kVA, montado na entrada de um transformador retificador trifásico de 22kVA, de 20 vezes de aumento, em que é possível controlar a corrente elétrica até 6 A através de um disjuntor.

Um disjuntor de 6A de segurança em série com o reator planar, limita uma corrente elétrica máxima de 6A no circuito, conforme a **Figura 7**. Para preparação da descarga de plasma os dois eletrodos de cobre com 100mm de diâmetro e 5mm de espessura são montados na posição horizontal. Sendo que o eletrodo cátodo está montado na parte superior aterrado com a estrutura do reator, e o eletrodo ânodo fica montado na parte inferior e submetido ao potencial elétrico da fonte retificadora DC.

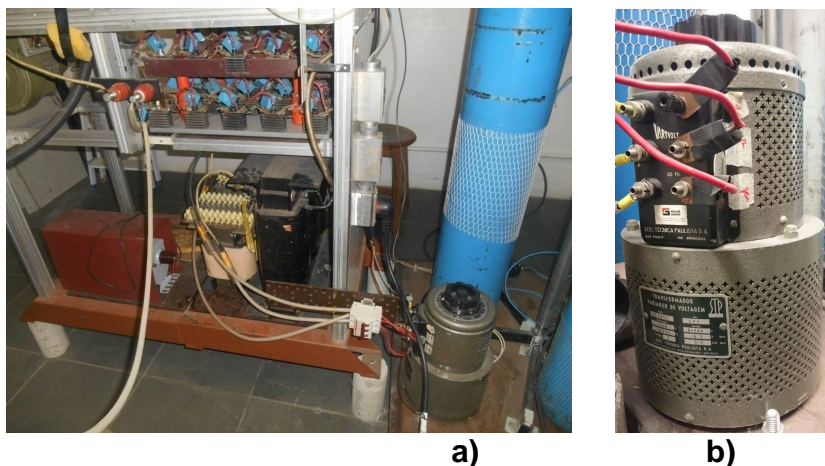


Figura 7 a) Fonte retificadora de 22 KVA, a garrafa de gás argônio; **b)** variac de 1kVA na entrada e o disjuntor de segurança de 6A.

O aterramento do cátodo com a fonte retificadora passa pelo núcleo de um passador de corrente coaxial de um tubo de cobre que apresenta um isolamento elétrico por uma pasta epóxi com a finalidade de deixar o disco base do reator num potencial flutuante. O longo comprimento deste passador de corrente permite ajustar o espaçamento entre o cátodo e o ânodo para distâncias variáveis. A pressão de uma bucha deslizante sobre um anel o-ring com o disco-base e o tubo do passador de corrente promove o estancamento de vácuo, conforme mostra a bucha de bronze na **Figura 8**. A bucha de estancamento de vácuo é mantida pressionada sob o disco-base por meio de um grampo de aço inox parafusado.

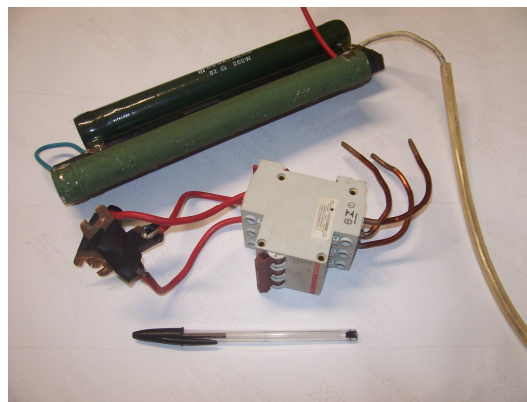


Figura 8 Bucha de estancamento montado com um retentor O-ring.

A alimentação da fonte retificadora trifásica para o eletrodo do ânodo é conduzida através de um outro passador de corrente de uma vela, como mostra a **Figura 9**. Por motivos de segurança, para que a fonte retificadora não entre em curto-circuito durante uma descarga luminescente, o circuito do reator planar foi montado em série com um resistor de 129Ω , o *Ballast*, com potência dissipação de 400 W.



a)



b)

Figura 9 a) Passador de corrente do ânodo é feito por uma vela; **b)** Ballast de 129 Ohms com o disjuntor de 6 A para limitação de correntes de plasma.

São utilizados dois multímetros *ET2042C*, da *Minipa*, um para medição das tensões elétrica, em Volts, entre o cátodo e o ânodo como na **Figura 10**, e um segundo multímetro é posicionado em série com o circuito do reator planar para efetuar medições de corrente elétrica em mili-Ampères.

Como foi dito anteriormente, na montagem dos eletrodos do reator planar DC a plasma foram empregados o uso de porcelanas vitrificada para encapsulamento e isolamento elétrico dos eletrodos com a finalidade de confinar a descarga elétrica entre os eletrodos como também para obter um isolamento térmico reduzindo ao máximo a dissipação de calor para outras regiões do reator. Pois os efeitos de *sputtering* acarretam uma elevação da temperatura do cátodo devido aos intensos bombardeamentos provocados pelos íons. Como também, o projeto da construção das porcelanas permite cobrir as regiões pontiagudas de condutores e conectores. Deduz-se assim a vantagem do emprego das porcelanas, está no fato que estes elementos acabam fazendo um papel estrutural na arquitetura do reator de plasma.

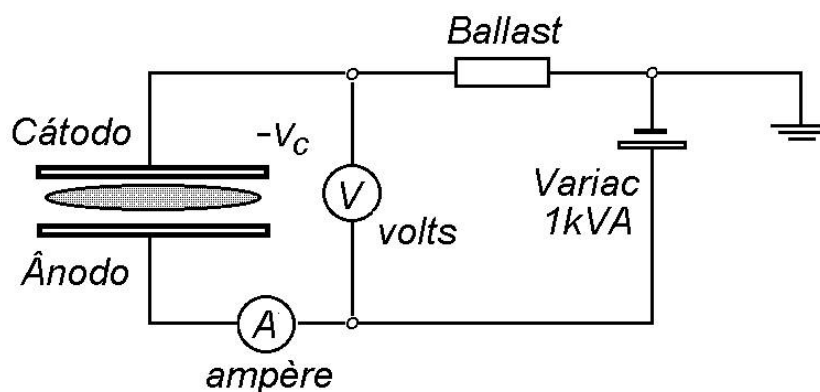


Figura 10 [7]Esquema de um reator planar DC a plasma

Capítulo 3

3.1. Confeção de porcelanas

3.1.1. Argila para Porcelana

A porcelana é um produto branco translúcido e impermeável, que se distingue de outros produtos cerâmicos, especialmente por apresentar vitrificação, resistência mecânica e uma completa isenção de porosidade e sonoridade, conforme a consulta [8]. Em sua composição apresentam 40% de caulim, 25% de quartzo, 25% de feldspato e 10% de argila que são submetidas à dosagem rigorosa e maleabilidade obtida com adição de água, como mostra a **Figura 11**. O caulim é um minério composto de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita [9]. De um modo geral a obtenção da porcelana vitrificada segue com a moldagem da peça e depois com um tratamento térmico para endurecimento e vitrificação, conhecido como sinterização [9].



Figura 11. A porcelana é composta de 40% de caulim, 25% de quartzo, 25% de feldspato e 10% de argila.

3.1.2. Modelagem de Porcelana

A argila da porcelana é submetida a diversas compactações até que se consiga uma consistência bastante uniforme com o intuito de eliminar bolhas de ar de seu interior. O formato da porcelana depende da construção de um molde de madeira para o preenchimento da argila em seu interior. Optamos em preparar o molde de madeira com bipartição para facilitar a extração do modelo de argila após a moldagem, conforme a **Figura 12**. Toda superfície de contato interno do molde foi recoberta com papel com a finalidade de facilitar a extração da argila. O preenchimento interno do molde é feito de corpo inteiro da argila evitando-se preenchimento por pedaços para evitar a formação de bolhas de ar no interior do molde que pode provocar uma explosão durante o processo de sinterização. Após o preenchimento total da argila dentro do molde sua extração é realizada pela separação cuidadosa da bipartição do molde.



Figura 12. Bipartição do molde para facilitar na extração do modelamento da argila para a confecção da porcelana

3.1.3. Torneamento da argila de porcelana

Uma segunda opção de modelamento da argila é realizada através do processo de torneamento do corpo da argila para obter peças 3D(altura x largura x profundidade). Para tanto a argila é novamente compactada, como no processo anterior, até adquirir uma boa consistência. Assim, a partir de um rolo de madeira, o corpo da argila é compactado entre duas travessas paralelas para obter uma espessura desejada constante. Com as placas de argilas obtidas elas podem ser cortadas em qualquer formato desejado, como também pode ser cortado num formato de disco com auxílio de alguns utensílios especiais, conforme mostra a **Figura 13**.



Figura 13. Utensílios utilizados para compactar e cortar a argila em diversos formatos(rolo, travessas, lâmina de corte, ferramentas de acabamento, fio de corte).

O ajuste preciso do diâmetro e da altura da porcelana, durante a modelagem, foi obtido por meio da operação de torneamento realizado a partir de um torno vertical montado numa estrutura triangular de madeira conforme a **Figura 14**. O torno vertical consiste em um disco horizontal de nylon preto montado no eixo de um moto-redutor de 12 Volts, de elevado torque e baixa rotação, acionamento por um botão e uma fonte de potência DC.

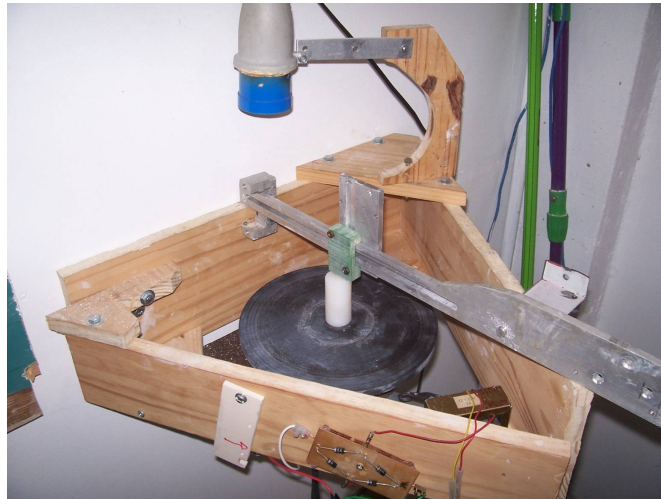


Figura 14. Torno vertical para modelagem de barro de porcelanas

A boa aderência da argila sobre o disco PVC aplicando barbotina, permite que placa de porcelana seja torneada sem desgarrar o disco de nylon, se não por uma ferramenta de corte. O movimento de baixa rotação do motor é combinado com um corte preciso de uma ferramenta de aço rápido montado no porta ferramenta do torno, conforme mostra a lâmina na **Figura 15**.



Figura 15. Ferramentas de corte utilizada no torno

Através do torneamento foi possível tornear discos de argila de vários diâmetros e espessuras como também abrir seus rebaixos em suas placas para o alojamento dos eletrodos. Desta forma foi possível obter acabamentos de geometrias cilíndricas muito precisas e mais rápidas do que às obtidas com o modelamento manual no molde de madeira. Entretanto, durante o processo de torneamento é necessário fazer uma previsão de 20% maior de todas as dimensões da argila devido a contração durante a evaporação de água. O resultado de torneamento da argila de porcelana pode ser visto na **Figura 16**.



Figura 16. Torneamento de uma peça cilíndrica de argila para encapsulamento dos eletrodos.

Os discos de barro uma vez torneados, são mantidos num recipiente fechado para a evaporação controlada da água durante 3 dias de forma que o paralelismo das peças é mantido pressionando as peças de argila entre duas superfícies planas para impedir o empenamento. Então as peças de porcelana já secas são submetidas ao processo de sinterização onde, novamente as peças de porcelana ainda terão 10% de contração nas dimensões para evaporação

completa durante o processo de sinterização dentro de um forno elétrico. As peças cilíndricas tiveram dimensões finais de 110mm de diâmetro e 18 mm de espessura e os seus rebaixos de 4 mm para alojamento do disco de eletrodo de 100mm de diâmetro.

Foi possível a confecção de peças tubulares de porcelana pela adaptação de um pino mestre de PVC removível montado no centro do disco para modelar geometrias cilíndricas, conforme pode ser visto na **Figura 17**. O pino de PVC é recoberto com papel para facilitar a extração da argila após o torneamento. A altura e do diâmetro do tubo de argila pode controlado com o uso de um calibrador durante o torneamento. Os tubos de porcelanas têm a função de encobrimento dos condutores e dos conectores de ligamento com os eletrodos para que não ocorra o surgimento de faíscas nas regiões pontiagudas dos condutores.



Figura 17. Peças tubulares de porcelana são confeccionadas através de um pino central montado no centro do disco de PVC.

31.4. Sinterização das Porcelanas.

Depois da finalização da moldagem as peças de argila que permanecem para secagem à temperatura ambiente durante três dias para a evaporação da

água, a sua cor acinzentada dá lugar para uma coloração esbranquiçada. Nesta etapa suas peças são lixadas para a etapa final do processo de sinterização dentro de um forno elétrico. Suas dimensões são deixadas ainda 10% maiores para contração final de sinterização. A queima da porcelana é realizada num forno termoelétrico INTI, do departamento de Ensino Geral da FATECSP. O ajuste da rampa segue três etapas, conforme mostra a **Figura 18** na primeira entre 70°C e 400°C possui a elevação inicial de temperatura com rampa de 5°C por minuto até alcançar a segunda faixa, mais delicada, entre 400°C até 700°C com uma rampa de temperatura baixa, de 1°C por minuto, alcançar a última etapa final até a temperatura de 1200°C, permanecendo neste patamar de temperatura de 1200°C durante 3 horas [3,4]. Após o desligamento automático do forno, a porcelana é esfriada dentro do próprio forno durante mais 2 horas [5]. O ciclo de sinterização até o esfriamento total da porcelana apresenta um tempo total de 13,4 horas.

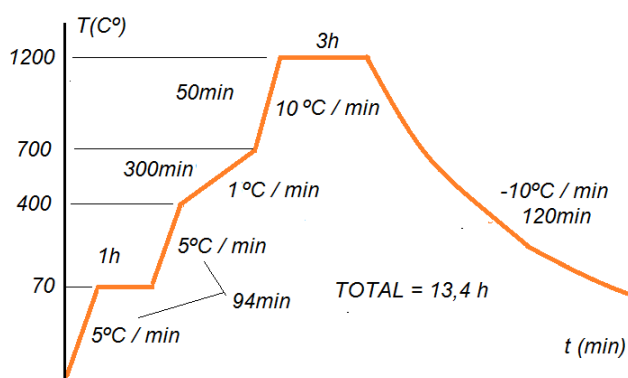


Figura 18. A curva de sinterização da porcelana apresenta as três rampas de elevação de temperatura.

Portanto o ciclo da queima da porcelana teve uma duração total de 24 horas durante o qual ocorre uma perda de água completa da composição acompanhada

de uma transformação da fase cristalina para a fase vítrea e a soldagem dos grãos dando à porcelana uma coloração final acinzentada, conforme a **Figura 19**. O processo de sinterização propicia o endurecimento da porcelana, devido perda das moléculas de água, consequentemente compactação das moléculas de caolim, quartzo, feldspato dando ao modelo uma elevada tenacidade devido à presença de silicatos.

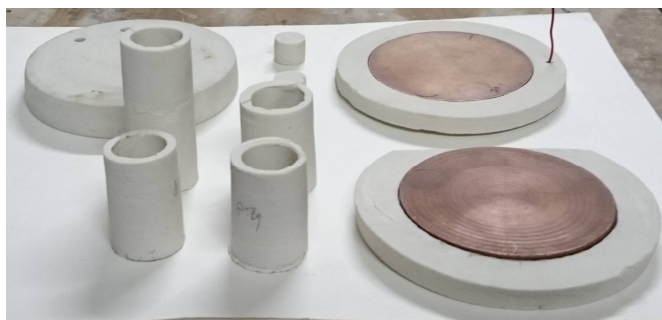


Figura 19. Os tubos de porcelanas foram modelados com auxílio do pino central montado no disco do torno vertical.

O aspecto final da porcelana vitrificada apresenta uma textura levemente acinzentada e sua dureza impede qualquer tipo de usinagem mecânica tradicional e os pequenos ajustes durante a montagem dos eletrodos dentro das porcelanas são possíveis com auxílio de pontas diamantadas, conforme a **Figura 20**.



Figura 20. As porcelanas após o processo de vitrificação apresenta uma coloração acinzentada.

3.1.5. Encapsulamento dos eletrodos com porcelanas

O emprego de porcelanas vitrificadas para encapsular eletrodos tem a finalidade de obter, o isolamento elétrico e térmico dos eletrodos para evitar a dissipação de calor para outras regiões do reator durante as descargas de plasma. As descargas de plasma acarretam uma elevação da temperatura do cátodo causada pelos intensos bombardeamentos dos íons, pelo processo de *Sputtering*. Outra vantagem vem do fato de que as porcelanas definem uma arquitetura da parte estrutural do reator por meio do qual os tubos e as capas de porcelana são colados com o produto epóxi para confinar a descarga de plasma na região entre o cátodo e o anodo, como mostra a **Figura 21** e **Figura 22**.

O eletrodo anodo foi conectado com uma alimentação positiva da fonte retificadora e o eletrodo cátodo conectado no aterramento da fonte. As conexões elétricas entre os condutores, conexões e os eletrodos realizados dentro dos tubos e das capas de porcelanas foram montado tão somente por contatos ou pressão de molas para evitar o uso de solda ou de parafusos.



Figura 21. Os eletrodos, o cátodo e o ânodo, estão encapsulados com porcelanas

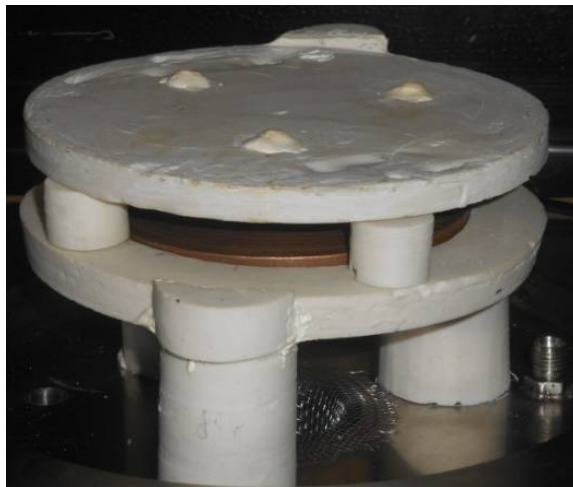


Figura 22. Montagem completa dos eletrodos com porcelanas.

3.2 Levantamento da Curva de Paschen

As medidas elétricas durante as descargas de plasma foram realizadas com emprego de dois multímetros *ET2042C*, da *Minipa*, um para medição das tensões elétrica, em Volts, entre o cátodo e o ânodo, o outro para medidas de corrente elétrica, em mili-Ampère, através do reator planar.

Como um teste inicial, o reator planar a plasma DC foi submetido com uma tensão elétrica inicial de 450 V que permitiu a passagem de uma corrente elétrica de 30 mA através de um gás de argônio sob uma pressão residual de 6,4 Pa. A descarga luminescente de plasma gerado entre os dois eletrodos do reator apresentou uma razoável simetria cilíndrica, como pode ser visto na **Figura 23**.

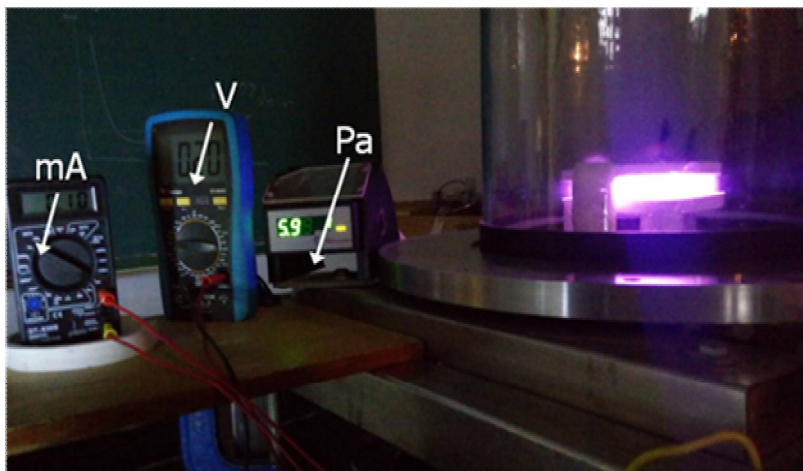


Figura 23. Ocorrência de uma descarga luminescente de plasma com 450 V e 30mA sob pressão de 6,4Pa de gás argônio.

Após a adaptação de uma válvula dupla para controle fino das leituras de pressão de gás argônio foi possível coletar 25 dados de medição de voltagem elétrica entre o cátodo e ânodo para cada valor de pressão de gás, até a ocorrência de uma descarga luminescente. Foram coletadas medidas de tensões elétricas entre as pressões de 700Pa até 300Pa com intervalos de 50Pa, medidas

entre 300Pa até 200Pa realizadas com intervalos de 20Pa e para pressões abaixo de 200Pa as tensões elétricas foram coletadas para intervalos de 5 Pa. Para valores abaixo de 20Pa não foi mais possível gerar descarga de plasma luminescente. Para cada valor de pressão do gás argônio acima as tensões elétricas da fonte retificadora foram elevadas até alcançar a voltagem de *breakdown* V_b . Em contrapartida com valores da pressão multiplicada pela distância no produto pd foi possível construir a curva de Paschen. O disco base da mesa e a estrutura da mesa foram induzidos com um potencial flutuante de 23,66 Volts.

A **Figura 24** apresenta imagens de várias descargas de plasmas luminescentes montadas numa escala vertical com um aspecto peculiar durante a redução da pressão do gás argônio e a elevação da voltagem elétrica aplicada. Os disparos a) e b) descrevem descargas de plasma do produto abaixo do produto mínimo $(pd)_{\min}$, com pressões baixas, indicando que a luminosidade da descarga de plasma se eleva gradualmente e uniformemente em todo o volume entre os eletrodos sem ocorrer nenhuma descontinuidade nos valores das tensões elétricas indicadas pelo medidor.

Entretanto, para os disparos de plasma para as altas pressões do gás argônio, das fotos de c) até g), com o produto pd acima do produto mínimo $(pd)_{\min}$, as descargas surgem após a voltagem superar a voltagem de ruptura e cair para uma tensão elétrica imediatamente abaixo da ruptura que mostra uma separação visível da região formando uma lâmina de plasma próxima do cátodo, e os

disparos de f) e g) indicam que a coluna positiva da descarga luminescente tem um formato de cauda, como um plasmóide. Indicando livre caminho médio menor, necessitando de tensões elevadas para promover a descarga de *breakdown*.

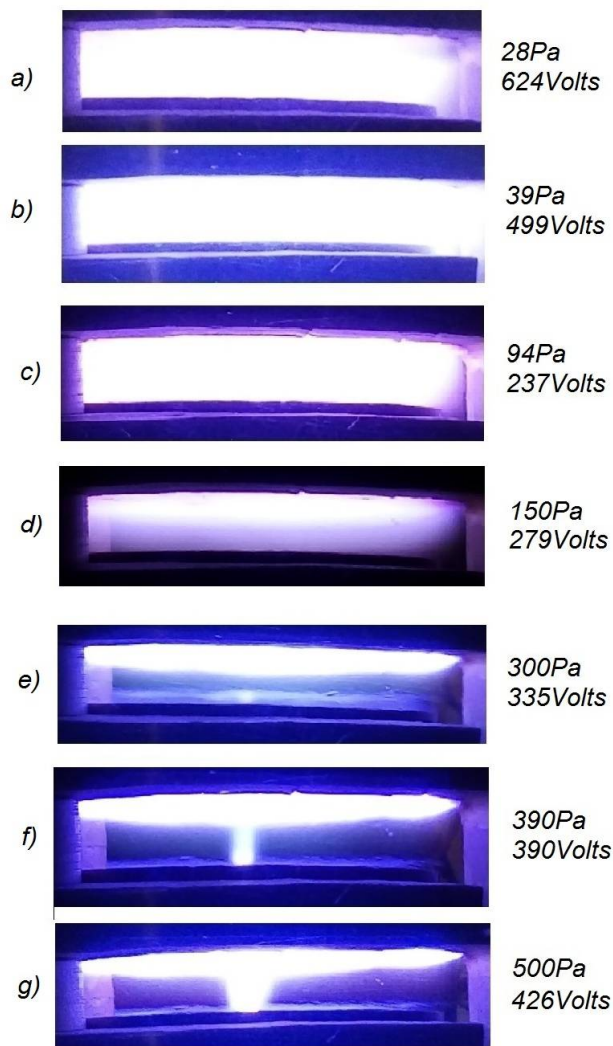


Figura 24. Descargas de plasma luminescente geradas para as pressões na ordem crescente, reduz sua espessura para pressões elevadas.

Opta- se por salvar em filme, pôde- se minimizar diferenças da coleta dos dados de pressão, de tensão no próprio instante da descarga de plasma luminoso,

os resultados das medidas apresentaram suas curvas características dentro do esperado.

Não houve evidência de formação de plasmóide em torno da região entre os eletrodos do reator planar a plasma. Entretanto, para a faixa das pressões elevadas ocorreram uma brusca elevação de corrente elétrica quando o plasma atingiu o limiar da passagem da descarga luminescente para descarga de arco acompanhada do desarme do disjuntor.

Ultrapassando toda região de ocorrência da descarga luminescente para elevadas pressões do gás, o reator planar é conduzido para um estado de arco de plasma com a produção de uma intensa luminosidade de um jato de plasma com elevada corrente elétrica acompanhada do desarme do disjuntor do reator.

3.3.1. Resultados e Discussões

Utilizando-se uma planilha do *MATLAB*-r14, dispostos na **Tabela 01**, foi possível construir a curva de Paschen para os 25 pontos de dados do produto da pressão pela distância pd , em função da voltagem aplicada, conforme a **Figura 25**. O resultado indicou que os 11 pontos de valores para pressão menores, abaixo do produto mínimo $(pd)_{\min}$, ficaram afastadas da curva teórica de Paschen e os outros 14 pontos experimentais mostraram-se alinhados de acordo com uma reta teórica da curva de Paschen. Estas duas regiões são delimitadas pelo ponto de voltagem mínima de breakdown que resultou em torno de $V_b = 225$ Volts correspondendo ao produto mínimo $(pd)_{\min} = 135,7$ Pacm considerado para a distância $d = 15,6$ mm entre o cátodo e o ânodo. Esta medida experimental pode ser comparada com os resultados de Lisovski et al [4] em que a voltagem mínima de breakdown foi de $V_b = 257$ V com produto mínimo de $(pd)_{\min} = 187$ cmPa. Como também pode comparado com o valor obtido num trabalho de conclusão de curso da *FATEC-SP* [5] com voltagem de *breakdown* de $V_b = 227$ V e produto mínimo de $(pd)_{\min} = 128$ cmPa. Vale ressaltar que a descarga luminescente de plasma apresentou uma ionização máxima neste ponto de mínima na curva de Paschen.

No ponto do produto mínimo, a curva de Paschen, adotou-se o valor da constante $A = 0,10$ para o cobre, em unidades colisionais de i-e por Pacm, como também foi utilizado outra constante $C = 1,4$ dada em unidades de V por Pa.cm que foram calculados de $AV^* = C$ [3]. Os elétrons ionizam o gás de argônio com um potencial efetivo de $V^* = 16,7$ eV, por par elétron-íon, é maior do que o seu potencial de ionização de $V_i = 15,7$ eV, por par e-i. O ganho do elétron é calculado

de $\xi = V^*/V_i = 1,06$. O segundo coeficiente da emissão secundária γ_{SE} pode ser calculado de $(pd)_{\min} = 6,83 \times 10^{-3}$ [3] a partir da expressão,

$$(pd)_{\min} = \frac{e}{A} \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_{SE}} \right) \quad (2)$$

$\gamma_{SE} = 6,83 \times 10^{-3}$ [3].

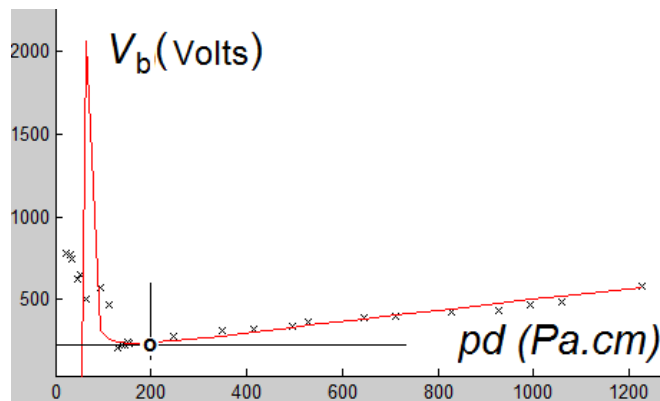


Figura 25. Comparação da linha teórica(-) e pontos experimentais(x) da Curva de Paschen

Tabela 01

```

1  clear all; % PASCHEN CURVE PROGRAM
2
3
4  d=1.656 ; %distance of the cathode to anode in cm
5  p2=[ 14 19 21 28 32 39 57 68 79 85 87 91 94 150 210 250 300 320
6      390 430 500 560 600 640 740]; % pressure in Pa
7  V2=[ 784 770 743 624 647 499 573 467 210 222 225 240 237 279 314 319 335 362
8      390 396 426 437 470 482 580]; % electric voltages in Volts
9  i2=[ 10 30 7 40 60 5 230 3 3 3 3 5 10 20 50 80
10     85 150 210 250 300 430 550 710]; %electric corrente in mA
11
12  pd=p2*d;
13
14  c=1.4; % constant that depend on Gas
15  a=0.10; % constant that depend on Gas
16  secem= 2.0726*10^(-3); % Secondary Electron Emission depend on gas
17      %and electrode
18
19  vb=c*pd./log(a*pd/log(1+1/secem)); % Paschen equation
20
21  plot(pd,V2, 'kx', pd,vb, 'r-');
22  v0=V2(2);
23  pdo=pd(2);
24  xlabel('Pa.cm')
25  ylabel('Volts')
26  title('CURVA DE PASCHEN')
27  %grid on
28  axis ([0 1300 40 3000 ])
29

```

Tabela 02

	Pa	V	mA		Pa	V	mA		Pa	V	mA
1	14	784	10	10	85	222	3	19	390	390	150
2	19	770	30	11	87	225	3	20	430	396	210
3	21	743	7	12	91	240	3	21	500	426	250
4	28	624	40	13	94	237	5	22	560	437	300
5	32	647	60	14	150	279	10	23	600	470	430
6	39	499	5	15	210	314	20	24	640	482	550
7	57	573	2	16	250	319	50	25	740	580	710
8	68	467	30	17	300	335	80				
9	79	210	3	18	320	362	85				

Capítulo 4

4.1 Conclusões

A confecção da porcelana foi bem-sucedida pelo fato de ser possível um torneamento e obter formas cilíndricas das peças de barro com precisão ajustando suas dimensões da maneira que fique dentro de uma tolerância, e que, depois da porcelana vitrificada, possa ajustar com uma micro retífica de pontas diamantadas com as medidas dos eletrodos, e, portanto, não sendo possível efetuar qualquer tipo de operação por usinagem mecânica convencional.

Uma vez que as capas de isolamento dos eletrodos foram confeccionadas foi possível confinar a descarga de plasma luminescente na região entre o cátodo e o anodo e fazer o levantamento das curvas de Paschen para aferir a mínima voltagem de breakdown de máxima ionização de plasma correspondente ao ponto mínimo do produto $(pd)_{\min}$.

Não ocorreu qualquer sinal de degradação, trinca ou qualquer consequências do processo de Sputtering da porcelana durante a descarga de plasma DC, entretanto surgiram anomalias com a formação de plasmóides (descargas na superfície positiva) atestadas pelas fotografias Figura 22f) e 22g).

Este experimento ainda mostrou ocorrências de sinais de desgaseificação proveniente das impurezas absorvidas pelos isolantes de porcelana.

Ocorreram o desarme do disjuntor de 6A do reator no limiar da passagem da descarga luminescente para descarga de arco durante as bruscas elevações da corrente elétrica acima de 6A.

Ao final deste trabalho notamos a importância do conhecimento tanto de tecnologia de vácuo como de assuntos pertinentes de *física de plasma*.

Este projeto de fabricação de porcelanas teve como indicador de produção uma publicação científica:

“**Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo - RBAV**, no volume 36-2, nas páginas p102 -106 em maio-agosto de 2017 sob o número doi:10.17563/rbav.v36i2.1069”.

Este projeto foi também apresentado no período de 4 a 8 de setembro:

“Congresso **16th Latin American Plasma Physics - LAWPP** na cidade do México”.

4.2. Projetos futuros

Existem ainda questões [1] a serem respondidas na geração de plasma luminescente durante o funcionamento de um reator planar DC, que passamos a citar.

1. O comportamento da bainha próximo dos eletrodos ainda não está de acordo com o que é apresentado na teoria e é essencial a continuidade dos experimentos neste sentido.

2. Uma questão ainda aberta é que o fenômeno de transporte, a baixa pressão, que pode causar rupturas de plasma e são responsáveis pela ocorrência dos *modos de transição* que dificultam a reprodutibilidade em vários reatores. Esta ruptura de plasma pode estar ligada com a formação de turbulências.

3. Muitas vezes o controle dos parâmetros experimentais de plasma não tem correspondido com o que estão estabelecidos teoricamente. Não se sabe, por exemplo, como a densidade de corrente varia com a potência da voltagem, $J=J_0 V^k$, cujo expoente k varia entre 2 a 12 para os diferentes tipos de reatores.

4. A distribuição de velocidade dos íons ainda é muito desconhecida na maioria dos casos embora tenha alguns indícios que indiquem que a temperatura iônica é próxima da temperatura ambiente.

4.3. Referências bibliográficas

- [1] J R Roth : *Industrial Plasma Engineering Principles*, London, Institute of Physics Publishing -1995 ISBN 075030318-2.
- [2]. A Lieberman, A.; A J Lichtenberg : *Principles of plasma discharges and materials processing*, EUA, John Wiley & Sons - 1994.
- [3] C Tendero, C Tixier, P Tristant, J Demaison, P Leprince: *A Review, Atmospheric Pressure Plasmas*, Ed Elsevier, Spectrochimica Acta Part B, v61, p02-20 - 2006.
- [4] R B Emiliano: *Projeto e Construção de um Reator a Plasma DC*, Trabalho de Conclusão de Curso MPCE, FATECSP – 2011.
- [5] F F Chen : *Introduction to Plasma Physics*, New York-London, Plenum Press, p1-16 - 1974 ISBN 0-306-30755-3
- [6] J A Bittencourt : *Fundamentals of Plasma Physics*, Library Cataloging in Publication Data, 2ed, p1-4 – 1995.
- [7]M. I. Boulos, P. Fauchais, Emil Pfender: *Thermal Plasmas, Fundamentals and Applications*.

- [8] www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=50.
- [9] www.porcelanabrasil.com.br/p-00.htm em 7 de Maio de 2015 às 20h49.
- [10]. V A Lisovskiyy, S D Yakovin, V D Yegorenkov : *Low-Pressure Gas Breakdown in Uniform DC Electric Field*, J Phys. D: Appl. Phys. 33, Reino Unido- 2000.
- [11]. L Ledernez, F Olcaytug, H Yasuda, G Urban : *A Modification of Paschen Law for Argon*, 29th ICPIG, México - 2009.
- [12]. M A Hassouba, F F Elakshar, A A Garamoon : *Measurements of the Breakdown Potentials for Different Cathode Materials in the Townsend Discharge*, Fizika A 11, Croácia - 2002.
- [13]. J M Lafferty: *Foundations of Vacuum Science and Technology*, EUA, John Wiley & Sons - 1998.