

ANDRÉ BIANCHI LARAIA

**Tratamento a plasma para melhoria na metalização de
placas de circuito impresso**

André Bianchi Laraia

**Tratamento a plasma para melhoria na metalização de
placas de circuito impresso**

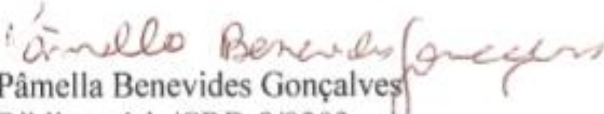
Dissertação de Mestrado apresentada ao Conselho de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Rogério de Oliveira
Hein

Co-Orientador: Prof. Dr. Milton Eiji Kayama

Guaratinguetá - SP
2018

L318t	Laraia, André Bianchi Tratamento a plasma para melhoria na metalização de placas de circuito impresso / André Bianchi Laraia. – Guaratinguetá, 2018. 75 f : il. Bibliografia: f. 66-70 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Luís Rogério de Oliveira hein Coorientador: Prof. Dr. Milton Eiji 1. Jato de plasma. 2. Raio 3. Metalização – Processos 4. Superfícies (Tecnologia). I. Título. CDU 533.9 (043)
-------	--


Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

ANDRÉ BIANCHI LARALA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE

“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

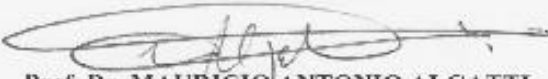
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA

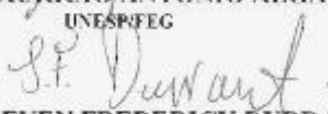
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MILTON ELJI KAYAMA
Coordenador / UNESP/FEG


Prof. Dr. MAURICIO ANTONIO ALGATTI
UNESP/FEG


Prof. Dr. STEVEN FREDERICK DURRANT
UNESP/SOROCABA

Julho de 2018

DADOS CURRICULARES

ANDRÉ BIANCHI LARAIA

NASCIMENTO	12.11.1990 – São José dos Campos / SP
FILIAÇÃO	Flávio Laraia Maria Helena Aparecida Bianchi Laraia
2006/2009	Curso Técnico em Mecatrônica – ETEP Faculdades
2011/2016	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

ao meu pai, por toda a confiança depositada em mim ao longo de todo este caminho que escolhi, sendo sempre minha referência, não só de profissional mas como de pessoa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por uma vida maravilhosa, pela minha saúde física e espiritual, essenciais para meu desenvolvimento como pessoa,

à minha mãe, *Maria Helena Aparecida Bianchi Laraia*, meu pai, *Flávio Laraia*, minha irmã *Flávia Helena Bianchi Laraia* e toda minha família, por seu apoio incondicional,

à minha namorada, *Sofia Glyniadakis*, por todo suporte, carinho e paciência durante a realização deste trabalho,

aos meus orientadores, *Prof. Dr. Milton Eiji Kayama* e *Prof. Dr. Luís Rogério de Oliveira Hein* pela confiança em meu trabalho e todo auxílio fornecido,

aos meus colegas de trabalho no Laboratório de Plasma, *Lucas Silva*, *Pedro Yago Marquezini*, *Felipe Kodaira* e *Dr. Eliseu Antônio Cavalini* pela companhia e contribuição para realização deste trabalho,

ao meu amigo e companheiro de estudo, *César Vinícius Soares Guimarães*, por estar presente ao longo de muitos anos nos bons e maus momentos,

aos funcionários do Campus de Guaratinguetá, em especial *José Benedito Galhardo* e *Antonio Augusto Moretti Rizzato* pela atenção, apoio e serviços prestados,

a *Prof.^a Dr.^a Ana Neide Rodrigues da Silva*, da FATEC São Paulo, ao *Neemias Ferreira* da MicroPress – Circuitos Impressos S/A, , ao *Osvaldo Tavares* da IACIT – Soluções Tecnológicas LTDA, ao *Franksinei Sanches* e *Cláudio Riego* da Alfacleaner Indústria e Comércio LTDA, por todo o suporte ao longo da realização do trabalho,

ao amigo *Bruno Guilherme Nacs*, por todo suporte prestado com excelente qualidade,

aos professores do grupo de plasma do Departamento de Física e Química da UNESP Guaratinguetá, em especial aos amigos *Prof. Dr. Roberto Yzumi Honda* e *Prof. Dr. Rogério Pinto Mota* por todo aconselhamento,

aos meus colegas professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP Guaratinguetá, em especial ao *Prof. Dr. Rubens Alves Dias*, *Prof. Dr. Leonardo Mesquita*, *Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena* e dona *Sonia Regina F. Silva Andrade*,

Finalmente, a todos os alunos com os quais tive a oportunidade de trabalhar, pois, enquanto ensinava, tive a oportunidade de aprender e crescer com todos eles.

“Os guerreiros da luz mantêm o brilho nos olhos.
Por isso são guerreiros da luz. Porque erram. Porque
se perguntam. Porque procuram uma razão – e com
certeza vão encontrá-la.”

Paulo Coelho

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um processo de tratamento com plasma para melhorar ametalização química de placas de circuito impresso (PCI). A pluma de plasma é gerada em argônio a partir da descarga de barreira dielétrica (DBD) promovida entre uma agulha cirúrgica e um cilindro usando capilar de borosilicato como dielétrico. A tensão pico-a-pico aplicada foi de 5 kV, com forma de onda senoidal na frequência de 37 kHz e potência de descarga em torno de 765 mW. O substrato é um composto de fibra de vidro e resina epóxi. Com incidência perpendicular da pluma de plasma na superfície, o diâmetro da área tratada circular é de 10 mm. Desta forma, o ângulo de contato reduz de 75 ° a 45 ° com 3 s de interação entre superfície da amostra e a ponta do plasma e o ângulo atinge o mínimo de 33 ° após 180 s de tempo de tratamento. A metalização química foi feita com banhos sequenciais de solução de paládio e finalizada com banho de solução aquosa de cobre. Testes de adesão padrão mostraram uma forte adesão das camadas de metal nas superfícies previamente tratadas com as plumas de plasma. Esta adesão melhora com o tempo de tratamento. A melhoria na metalização foi observada em superfície plana e também em furos usados para conectar diferentes camadas em PCIs. A área metalizada na superfície dos buracos é maior nos orifícios tratados. Quanto maior o tempo de tratamento, maior é essa área. Todos os resultados indicaram que a técnica de tratamento por plasma de placas de fibra de vidro melhora a sua metalização química pelo cobre, levando a uma adesão mais uniforme e eficaz do metal à superfície com um método ambientalmente amigável.

PALAVRAS-CHAVE: Microdescargas. Jato de plasma atmosférico. Placa de circuito impresso. Tratamento superficial. Ambientalmente amigável.

ABSTRACT

This work reports the development of a plasma treatment process to improve the chemical metallization of printed circuit boards (PCB). The plasma plume is generated in argon from a dielectric barrier discharge (DBD) promoted between a surgical needle and a cylinder using a borosilicate capillary as dielectric. The applied peak-to-peak voltage was 5 kV, with sinusoidal waveform at 37 kHz frequency and power in the discharge around 765 mW. The substrate was a composite of fiberglass and epoxy resin. With perpendicular incidence of the plasma plume on the surface the diameter of the circular treated area was 10 mm. In this area the contact angle reduces from 75° to 45° with 3 s of the plasma-surface interaction and the angle reaches the minimum of 33° after 180 s of treatment time. Chemical metallization was made with sequential baths of solution of palladium and finished with bath of aqueous solution of copper. Standard adhesion tests showed a strong adhesion of the metal layer on surfaces previously treated with the plasma plumes. This adhesion improves with the treatment time. The improvement in the metallization was observed on flat surface and also in holes used to connect different layers in PCB's. The metallized area on the surface of the holes is larger in treated holes. The longer the treatment time the larger is this area. All these results indicated that the technique of plasma treatment of fiberglass boards improves its chemical metallization by copper leading to a more uniform and effective adhesion of the metal to the surface with an environmental friendly method.

KEYWORDS: Microdischarges. Atmospheric plasma jet. Printed circuit board. Surface treatment. Environmental friendly.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico dos regimes de descarga elétrica segundo a tensão da descarga V_d e a corrente de descarga I_d	18
Figura 2 - Esquemas de jatos de plasma do tipo (a) DFE; (b) DBD; c) DBD-like e (d) SE	21
Figura 3 - Exemplo de PCI multi-camadas	24
Figura 4 - Exemplo de furo metalizado	27
Figura 5 - Comparação entre os processos de plasma desmear e plasma etchback	30
Figura 6 - Diagrama em blocos dos dispositivos para a produção de plasma	32
Figura 7 - (a) – Conversor de ponte completa; (b) Amplificador de transformadores em Cascata.....	33
Figura 8 - Vista do corte do esquema do micro-jato de plasma	34
Figura 9 - (a) Esquema de encaixe entre os componentes do dispositivo de Microjato em 3D; (b) vista explodida	35
Figura 10 - Amostras de substrato de fibra de vidro	36
Figura 11 - Jato de plasma na pressão atmosférica	37
Figura 12 - Ensaio da influência da distância entre jato-amostra para o ângulo de contato	38
Figura 13 - Varredura linear de amostras substrato a partir do ponto central	38
Figura 14 - Medição do ângulo de contato para as amostras fibra de vidro.....	39
Figura 15 - Diagrama do procedimento de metalização Cobreflash CI-160.....	40
Figura 16 - Banho de catalisador CI – 140.....	41
Figura 17 - Banho de cobre-químico.....	42
Figura 18- Ensaio realizado em amostras de fibra de vidro com tratamentos pontuais alinhados (dimensões em mm)	43
Figura 19 - Ensaio realizado em amostras de fibra de vidro com tratamentos pontuais não – alinhados (dimensões em mm)	44
Figura 20 - Ensaio realizado em amostras de fibra de vidro de tratamento com varredura em linha (dimensões em mm).....	45
Figura 21 - Exemplo de amostra utilizada para ensaios em furos passantes.....	45
Figura 22 - Representação de uma amostra com áreas perfuradas isoladas.....	46
Figura 23 - Exemplo de amostras de furo metalizado embutidas.....	47
Figura 24 - Tensões obtidas na aquisição do sistema de plasma: a) amostra da tensão aplicada no eletrodo; b) Tensão medida no capacitor.....	48
Figura 25 - Curva de carga no capacitor pela tensão de saída aplicada	49

Figura 26 - Figura de Lissajous suavizada	49
Figura 27 - Curva da potência aplicada ao longo do período	50
Figura 28 - Curva obtida variando o tempo de tratamento a plasma.....	51
Figura 29 - Curva obtida variando o tempo e a distância entre a superfície da amostra e a extremidade do jato	52
Figura 30 - Curva obtida medindo o ângulo de contato em pontos afastados do centro do tratamento	53
Figura 31 - Curva do ângulo de contato medido ao longo de um mês	54
Figura 32 - Resultados do tratamento pontual: (a) não – tratado; (b) 1 minuto; (c) 2 minutos; (d) 3 minutos.....	55
Figura 33 - Resultado obtido pela remoção da fita adesiva de uma amostra tratada em pontos não alinhados	55
Figura 34 - Resultados do tratamento em linha contínua (varredura): (a) não – tratado; (b) 1 minuto; (c) 2 minutos; (d) 3 minutos; (e) 4 minutos	56
Figura 35 - Seleção utilizada para área onde o cobre não foi retirado: (a) não – tratado; (b) 1 minuto; (c) 2 minutos; (d) 3 minutos; (e) 4 minutos	57
Figura 36 - Curva obtida da fração de área para diferentes tempos de tratamento	58
Figura 37 - Valores de resistência obtidos entre as faces das amostrados perfuradas.....	59
Figura 38 - Paredes de furos metalizados sem tratamento a plasma	60
Figura 39 - Furos metalizados após tratamento a plasma. a) 1 min; b) 2 min; c) 3 min	60
Figura 40 - Criação da área de seleção a ser analisada no <i>ImageJ</i>	71
Figura 41 - Conversão do corte da imagem para <i>8-bits</i>	72
Figura 42 - Janela de seleção de limiar da imagem	73
Figura 43 - Janela de medições.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de plasma com valores da temperatura eletrônica T_e , iônica T_i e densidade de partículas n	18
Tabela 2 - Valores de parâmetros de DPA's	19
Tabela 3 - Aplicações de diferentes substratos.....	23
Tabela 4 - Comparação do processo de etchback feito a plasma e feito quimicamente.....	31
Tabela 5 - Propriedades de um FR4 comercial típico	68
Tabela 6 - Propriedades de um PTFE comercial típico	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	PLASMA.....	17
2.1.1	Descarga em pressão atmosférica (DPA)	18
2.1.2	Jatos de plasma.....	19
2.2	PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI).....	21
2.2.1	Laminados.....	22
2.2.2	Tipos de PCI.....	24
2.2.3	Processo de fabricação de um circuito impresso multi-camadas.....	25
2.2.3.1	Fabricação de circuitos impressos pelo processo subtrativo	25
2.2.3.2	Fabricação de circuitos impressos pelo processo aditivo.....	26
2.2.4	Furos metalizados.....	27
2.3	PROCESSOS A PLASMA NA INDÚSTRIA DE PCI	28
2.3.1	Limpeza a plasma (<i>plasma cleaning</i>)	29
2.3.2	<i>Plasma etching</i>.....	30
3	PARTE EXPERIMENTAL E METODOLOGIAS	32
3.1	ESQUEMA DE GERAÇÃO DE PLASMA E SUAS CARACTERÍSTICAS	32
3.1.1	Fonte de tensão	32
3.1.2	Dispositivo de micro-jato de plasma.....	34
3.2	TRATAMENTO DAS AMOSTRAS DE SUBSTRATO POR MICRO- DESCARGAS DE PLASMA.....	35
3.2.1	Preparação das Amostras Substrato	35
3.2.2	Esquema de tratamento no ponto por microdescargas de plasma	36
3.2.3	Medida do Ângulo de Contato θ para a fibra de vidro FR4	39
3.3	MÉTODO PARA METALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	40
3.4	MÉTODOS UTILIZADOS PARA ENSAIOS DE ADESÃO DO COBRE DEPOSITADO NAS AMOSTRAS DE SUBSTRATO	42

3.4.1	Ensaio de adesão para tratamentos pontuais.....	43
3.4.2	Ensaio de adesão para tratamento em linha contínua (varredura).....	44
3.4.3	Ensaio de tratamento em furos de placa de circuito impresso	45
3.4.3.1	Medição de condutividade elétrica entre faces das amostras	46
3.4.3.2	Preparação das amostras para microscopia óptica	46
4	RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES	48
4.1	POTÊNCIA DO JATO DE PLASMA	48
4.2	CURVAS DE ÂNGULO DE CONTATO OBTIDAS COM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DO TRATAMENTO A PLASMA.....	50
4.3	RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ADESÃO	54
4.3.1	Resultados para tratamentos pontuais.....	54
4.3.2	Resultados para tratamentos em linha contínua (varredura).....	56
4.4	RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES DOS FUROS METALIZADOS	58
4.4.1	Resultados dos ensaios de condutividade elétrica entre as faces metalizadas.....	58
4.4.2	Microscopia óptica da superfície dos furos metalizados.....	59
5	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXO A – MATERIAIS	68
	APÊNDICE A – MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE ÁREA COM O IMAGEJ.....	71

1 INTRODUÇÃO

As placas de circuito impresso (PCI) são componentes fundamentais dos produtos eletrônicos, tanto profissionais quanto de consumo, nas áreas de informática, telecomunicações, entretenimento ou automação de serviços e processos. É, também, crescente a sua utilização em produtos de outros setores, na medida em que estes se tornam cada vez mais automáticos e inteligentes, o que denota a presença da chamada eletrônica embarcada.

Apesar de a indústria nacional poder produzir com qualidade e preço comparáveis aos dos Estados Unidos e da Europa, ela enfrenta riscos frente à concorrência dos países do Extremo Oriente, que possuem grandes escalas de produção, pois concentram a esmagadora maioria das indústrias eletrônicas do planeta. A importância da placa de circuito impresso reside no fato de que nela está contida boa parte da engenharia do produto, sendo, ainda, uma espécie de catalisadora da utilização de outros componentes. O domínio do projeto e da produção das placas de circuito impresso aponta na direção do domínio do produto e da sua tecnologia. (MELO; GUTIERREZ; ROSA, 1998)

A principal motivação para este trabalho é que o tratamento proposto implique na diminuição das falhas em PCI (BERLIN; LOEFFLER; SELESTAK, 2016), o que contribui com o lucro de um mercado extremamente presente nos dias de hoje representado pela indústria eletrônica.

Outra justificativa muito importante é que este tipo de pesquisa de tratamentos a plasma em processos de produção eletrônica é algo muito novo no Brasil, sendo esta tecnologia dominada principalmente pelos Estados Unidos e Alemanha, o que elevaria muito os custos de execução em indústrias brasileiras de placas de circuito impresso. Com este trabalho, espera-se contribuir no desenvolvimento deste tipo de procedimento em âmbito nacional, para que atinja custos viáveis de implementação em empresas nacionais e aumente sua competitividade no mercado permitindo, inclusive, o desenvolvimento de equipamentos nacionais para a aplicação desta técnica em produções de larga escala.

O plasma tornou-se um método muito útil para a modificação superficial visando facilitar e/ou melhorar a deposição de vários materiais. Em aplicações na indústria de eletrônicos, o plasma é empregado para preparar a superfície para fixação de matriz, ligação de fio ou trilhas condutoras e molde / encapsulamento de componentes. Além disso, a remoção de contaminação por plasma e os processos de ativação superficial melhoram a confiabilidade, o rendimento produtivo e, também, a fabricação de produtos de tecnologia

avançada. Em muitos dispositivos optoeletrônicos, a remoção de contaminação é usada para preparar superfícies antes da ligação de matriz eutética e interligação de trilhas no circuito impresso. (GETTY, 2002)

O tratamento de superfícies de laminados de fibra de vidro, fenolite, compósitos a base de PTFE (politetrafluoroetileno) e outros substratos utilizados na indústria eletrônica e de telecomunicações para metalização em placas de circuito impresso são feitos visando aumentar a adesão e a longevidade dos traçados dos fios impressos na placa (KURIHARA et AL., 2008; IKARI, 2008). Nos métodos de tratamento tradicionais utiliza-se plasmas gerados em gases a baixa pressão. Uma nova tecnologia vem sendo desenvolvida utilizando gases à pressão atmosférica (KANG et al., 2003). Como vantagens deste método têm-se a dispensa de câmaras e sistemas de vácuo e a facilidade de manuseio durante o processamento, desta forma, este método vem ganhando grande espaço nos processos industriais de produção de placas de circuito impresso (PCI), pois facilita o tratamento do substrato em larga escala e reduz o custo.

O processamento do substrato a plasma, além de melhorar a qualidade do produto final, é amigável ao meio ambiente, pois não gera grandes quantidades de resíduo. A limpeza por esta técnica substitui o método mais utilizado até então que aplica produtos químicos a base de permanganato, desta forma reduzindo o custo com tratamento de resíduos para descarte, também contribuindo para o racionamento de água, poupando espaço no chão de fábrica e, principalmente, diminuindo a exposição de funcionários a substâncias nocivas a saúde.

O Laboratório de Plasma da UNESP na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá vem desenvolvendo dispositivos para geração de plasmas com descargas gasosas em pressão atmosférica (KAYAMA et al., 2014; LARAIA; HONDA; KAYAMA, 2015). São descargas produzidas com tensões senoidais com valores de pico de 3-20 kV em frequências no intervalo de 20-50 kHz utilizando diversos gases como argônio, hélio e oxigênio. Os plasmas são não-térmicos com temperatura eletrônica de 1-5 eV muito maior que a temperatura do gás que é em torno da temperatura ambiente. Em dispositivos onde a dimensão do plasma é menor que 1 mm a temperatura eletrônica se torna mais elevada. Isto favorece os mecanismos associados a impactos eletrônicos como a fragmentação molecular e a produção de espécies reativas.

Com o tratamento utilizando jato de plasma na superfície de fibra de vidro, substrato mais utilizado para fabricação de placas de circuito impresso na indústria eletrônica (principalmente módulos digitais) e de telecomunicações (aplicações que operam com sinais de frequências elevadas), espera-se uma melhor metalização nas trilhas, ilhas e furos do

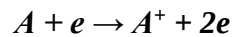
produto, garantindo assim uma melhor aderência, confiabilidade, vida útil e desempenho do produto. É importante considerar que o estado da arte atual é a integração de sistemas em um único circuito integrado levando a componentes com uma grande quantidade de terminais, bem como, produtos cada vez menores. Estas duas tendências obrigam a elaboração de placas de fiação impressa com filetes cada vez mais finos e, portanto, menor área de contato, ressaltando a importância da boa qualidade e aderência da metalização.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PLASMA

A palavra plasma tem a sua origem no grego, que significa material moldável. Mais tarde, tal definição se estendeu por toda a matéria, na qual átomos e/ou moléculas estão parcialmente ou totalmente ionizadas, onde o grau de ionização do plasma varia consideravelmente de acordo com a sua obtenção e aplicabilidade. O termo plasma foi utilizado pela primeira vez pelo físico americano, Irving Langmuir no ano de 1928, quando estudava descargas elétricas em gases.

O plasma pode ser produzido no laboratório devido à ionização de um gás, para tanto pode-se utilizar um feixe de luz intenso concentrado em um pequeno volume, provocando a ionização do gás no seu interior. Todavia, o método mais utilizado para provocar esta ionização é através de uma descarga elétrica. No processo, elétrons são acelerados por um campo elétrico aplicado por uma fonte externa que colidindo com partículas neutras provocam a geração de íons e elétrons (ROTH, 1995). Esta reação é descrita na forma:



onde A é a partícula neutra, A^+ o íon e e o elétron.

A energia das partículas A , A^+ e e varia conforme o sistema em que o plasma é produzido. Ao invés desta energia ser expressa em joule (J) utiliza-se elétron-volt (eV) onde $1\text{eV}=1,6\times 10^{-19}$ J. Com $kT = 1\text{eV}$, onde $k=1,38\times 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann e T a temperatura obtemos $T = 11600$ K. Assim usamos a conversão $11600\text{ K} \leftrightarrow 1\text{ eV}$.

Os diversos tipos de plasma são classificados em plasma frio, quente e térmico, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de plasma com valores da temperatura eletrônica T_e , iônica T_i e densidade de partículas n .

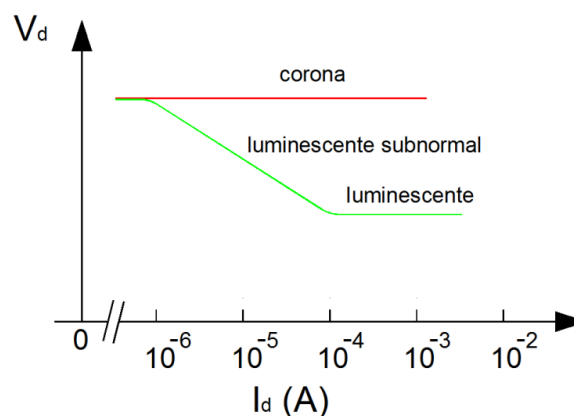
Tipo de Plasma	$T_e(\text{eV})$	$T_i(\text{eV})$	$n(\text{m}^{-3})$	Grau de ionização (%)
Plasma frio	1-10	0,02	$10^{12} - 10^{14}$	Menor que 1
Plasma quente	$10^2 - 10^3$	$10^2 - 10^4$	$10^{19} - 10^{22}$	100
Plasma térmico	1-5	1	10^{22}	Menor que 1

Fonte: Roth(1995).

2.1.1 Descarga em pressão atmosférica (DPA)

O plasma pode ser classificado quanto a diversas características. Inicialmente, pode-se classificá-lo quanto à pressão na qual ele é produzido. Plasmas produzidos em baixas pressões podem ser qualificados como ‘plasmas a vácuo’, enquanto plasmas em pressões próximas à da atmosfera são ‘plasmas atmosféricos’. Plasmas a vácuo possuem uma tensão de *breakdown* muito menor que os atmosféricos, desta forma podendo operar com fontes de tensão muito mais simples. Em contrapartida necessitam de câmaras de vácuo, bombas e compressores para atingirem pressões baixas, elevando o custo de *setup*. Atualmente, com o avanço da eletrônica de alta tensão, plasmas atmosféricos se tornaram uma alternativa viável e de menor custo, sendo utilizado em larga escala para tratamento de superfícies. As características de tensão e corrente de uma descarga do tipo corona são mostradas na Figura 1.

Figura 1 - Gráfico dos regimes de descarga elétrica segundo a tensão da descarga V_d e a corrente de descarga I_d



Fonte: Kogelschatz(2003).

As DPA's principais são a descarga por barreira dielétrica (DBD), descarga corona (C) e descarga luminescente em pressão atmosférica (DLPA). Tanto a descarga DBD quanto a C são descargas pulsadas mesmo que a fonte não seja de tensão alternada e ocorre como pulsos rápidos pela descarga de capacitância parasita (DBD) ou em locais onde o campo elétrico é intenso (C). O campo elétrico da DPA tipo corona varia ao longo do seu comprimento e a densidade de elétrons é da ordem de 10^{14} m^{-3} . Para a DPA tipo DBD esta densidade atinge 10^{16} m^{-3} em frequência de 20-50 kHz, com diâmetro de filamentos da ordem de 100 micrometros e densidade de corrente de 1 A. mm^{-2} em duração de nanosegundos. (HARRY, 2010; SHI, 2005).

Os parâmetros destas descargas são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de parâmetros de DPA's

Descarga	Corrente da descarga (A)	Largura do Pulso (ns)	Número de pulsos por ciclo	Temperatura do gás (K)	Energia do pulso (mJ)
DBD	0,01 -100	< 100	> 100	~300	< 0,1
C	0,01 – 10	~50	1 - 5	~300	~3,3
DLPA	0,01-0,20	~50	1 - 2	< 1000	~2

Fonte: Kogelschatz(2003).

2.1.2 Jatos de plasma

Os jatos de plasma, atualmente, são intensamente estudados pela comunidade científica e pela indústria, pois nesta configuração, o plasma pode ser gerado em espaço aberto utilizando uma grande variedade de dispositivos que operam em pressão atmosférica e fornecem plumas de plasma de baixa energia (plasmas em não equilíbrio térmico). Nos chamados jatos de plasma à pressão atmosférica (JPPA's) o campo elétrico necessário para iniciar a descarga é um pouco elevado, por exemplo, utilizando ar, o campo elétrico requerido é cerca de 30 kV.cm^{-1} (LU, 2012). Entretanto, com o surgimento de novas técnicas e dispositivos, os jatos de plasma se tornaram referência para diversas aplicações em tratamento de superfícies.

A maioria dos jatos de plasma utilizam gases nobres ou estes misturados com outros gases reativos, como o O_2 , além de uma série de configurações possíveis. Basicamente, pode-

se classificar os JPPA's em quatro categorias: *dielectric-free-electrode* (DFE), *dielectric-barrier-discharge* (DBD), *DBD-likee single-electrode* (SE). A seguir são apresentadas algumas características de cada tipo.

a) Jato DFE: tipo de jato que utiliza tensão alternada (AC) e rádio frequência (RF) de 13,56 MHz. Basicamente, consiste de um eletrodo interno acoplado à fonte de tensão e um outro eletrodo aterrado por fora. Uma mistura de gás He com gases reativos é injetada entre os eletrodos. Neste caso, utiliza-se um sistema de resfriamento com água que mantém a temperatura do jato entre 50 e 300°C (LU, 2012) dependendo da tensão de trabalho.

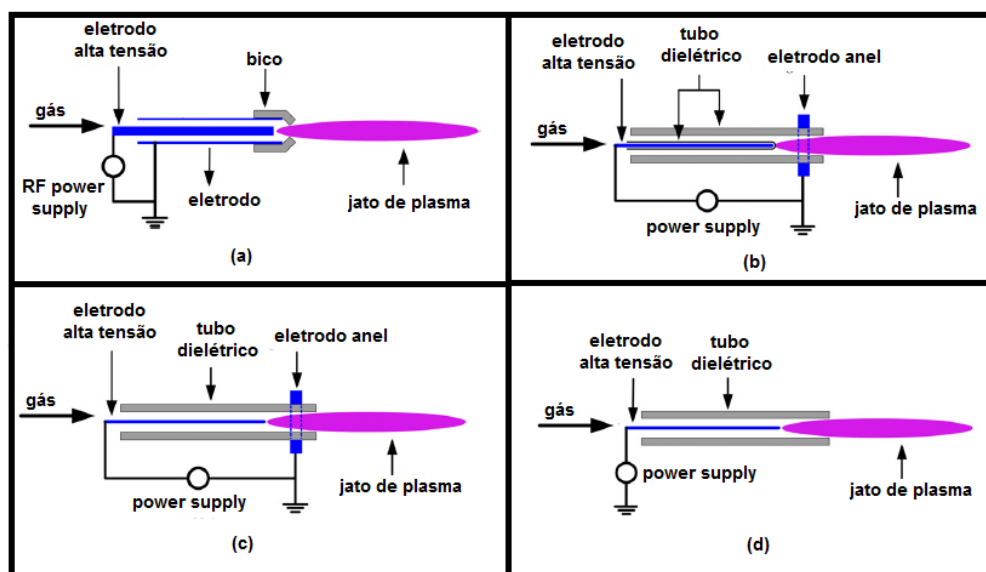
b) Jato DBD: existem diversas configurações para este tipo. Um dispositivo típico apresenta dois eletrodos, onde um deles é conectado à fonte de alta tensão e revestido por um tubo dielétrico e o outro é um anel “aterrado” conectado externamente à outro tubo dielétrico. Neste caso, se utiliza gás hélio e argônio entre os tubos dielétricos operando em alta tensão na faixa de kilohertz (kHz).

c) Jato DBD-like: este tipo de jato, muito utilizado em aplicações na medicina, utiliza fonte de tensão AC e frequência na faixa de kilohertz (kHz), radio frequência (RF) ou ainda fonte DC pulsada. Um esquema típico consiste de um eletrodo conectado à alta tensão revestido por um tubo dielétrico. Externamente à este se encontra um outro eletrodo na forma de anel aterrado. Gases nobres como hélio e argônio, ou ainda, uma mistura destes com gases reativos são introduzidos no dispositivo entre o tubo e o eletrodo conectado à fonte.

d) Jato SE: este tipo de dispositivo é muito parecido com o DBD-like, entretanto jatos do tipo SE não apresentam o eletrodo na forma de anel. Neste, o tubo dielétrico tem o papel de direcionar o fluxo de gás. Um jato deste tipo pode utilizar tensão AC na faixa de kilohertz (kHz), RF ou fonte DC pulsada. É possível ocorrer a formação de arcos neste caso e, portanto, este tipo de dispositivo não é recomendado para uso em biomedicina.

A Figura 2 apresenta o esquema dos quatro tipos de jatos de plasma descritos.

Figura 2 - Esquemas de jatos de plasma do tipo (a) DFE; (b) DBD; (c) DBD-like e (d) SE



Fonte: Lu(2012).

2.2 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

As placas de circuito são as bases para o suporte físico de componentes eletrônicos e suas conexões. São necessárias para fornecer suporte mecânico e interconexão elétrica de seus componentes. As restrições de espaço, o número e a complexidade das ligações, o gerenciamento térmico, a distribuição de energia e o custo de fabricação são alguns fatores a serem considerados ao determinar os requisitos de quantas camadas usar, a espessura das camadas dielétricas, a composição e a espessura do plano de terra, a composição dielétrica e as dimensões totais da placa. (IPC, 2003)

Os meios de comunicações através do rádio impulsionam a indústria e surgem os primeiros rádios automotivos na década de 1920 nos veículos militares de policiamento em Detroit, EUA. Neste cenário surge então a proposta de construção da primeira placa de circuito impresso que pertence a Paul Eisler (Inglaterra) na década de 1930, patenteada em 1943 e descrevia uma metodologia de corrosão de uma lâmina de cobre sobre uma base isolante (NOBLE, 1962)

Durante a segunda guerra mundial havia a necessidade dos rádios e equipamentos militares serem compactos, leves e robustos para suportar os esforços de transporte e condições adversas de ambiente. Isto de fato ocorre com o desenvolvimento de novas tecnologias e o surgimento do transistor, que permite desenvolver circuitos eletrônicos mais compactos e com menos dissipação térmica se comparados às válvulas. É neste cenário de

desenvolvimento das indústrias, tanto nas áreas, automotiva, militar de comunicação e de produtos domésticos é que surge a procura por métodos de fabricação em larga escala mais eficazes, robustos e mais baratos. (CAMILO, 2015)

2.2.1 Laminados

A matéria prima das PCI são os laminados, que consistem em produtos de alta precisão que combinam características mecânicas e elétricas desejadas. Para tanto, esses componentes são formados de três elementos básicos: condutores, dielétricos e adesivos. (KELLEY, 2008)

O elemento condutor é o responsável pela condução da corrente elétrica, tanto de sinal quanto de alimentação, no traçado do circuito. O material mais utilizado para esta função é o cobre (Cu), que poderá ser aplicado sobre a base por meio de folhas ou ser eletrodepositado. A espessura da camada de cobre da trilha é determinada, principalmente, pela quantidade de corrente que flui por esta.

O material dielétrico é a base onde são colocados os materiais condutores. A isolação entre os circuitos e pistas e a aplicação desejada determina o tipo de material do dielétrico e sua espessura.

O adesivo faz a aderência do material condutor com o dielétrico e entre folhas do próprio dielétrico. Existem os seguintes tipos de adesivos: termoplásticos, poliéster, epóxi e acrílico, que obedecem a dois processos distintos de colagem: processo de fusão e processo de cola com adesivo tipo *termoset*. No primeiro processo, o de fusão, é utilizado um filme termoplástico chamado *Fluorinated Ethylene Propylene* (FEP), como elemento de aderência. No segundo, *termoset*, os adesivos, geralmente epóxi e acrílico, são curados totalmente durante a colagem, ocasionando uma estabilidade dimensional, soldabilidade e o mínimo de variação das suas características com o tempo. (KELLEY, 2008)

Os laminados são divididos, primeiramente, em dois grandes grupos: flexíveis e rígidos. Os primeiros, de pequena espessura, substituem um grande número de fios nas montagens, já os rígidos são utilizados em casos onde ocorrem ligações elétricas complexas e densas.

Os laminados flexíveis normalmente são feitos de dois tipos diferentes de matéria prima: os de poliéster, que possuem temperatura máxima de trabalho 150°, o que torna a solda inviável para este tipo de material; os de poli-imida, que suportam até 230° tornando-se assim viáveis para soldagem.

Os laminados rígidos mais comuns podem ser feitos com base em dois tipos de materiais: fenólicos e fibra de vidro. Os primeiros são feitos em base de papel prensado, com

adesivos especiais, cobertos com uma folha de cobre. Devido ao material com que é fabricado, este tipo de circuito impresso não possui grande estabilidade mecânica, não podendo suportar muito peso e sua temperatura máxima está em torno de 260°C por 5 segundos, sendo relativamente baixa. O fenolite, como é conhecido, é utilizado para circuitos de fins “menos nobres” como controles remotos e brinquedos, principalmente em produtos de alta produção. A espessura padrão para circuito fenólico é de 1,60 mm de substrato e 205 g/m² (uma onça de cobre por pé quadrado), o que equivale a 35 µm de espessura de folha de cobre.

Já os de fibra de vidro são constituídos de várias camadas de fibra, intercaladas com adesivo a base de resina epóxi. Essa matéria prima é utilizada para circuitos impressos com furo metalizado, pois possui boa estabilidade mecânica, boa rigidez e suporta temperaturas máximas de 260°C por 20 segundos. Sua rigidez mecânica impede que o circuito seja estampado, devendo ser utilizadas brocas para realizar os furos (KELLEY, 2008). A Tabela3 mostra quais as principais aplicações de cada tipo de laminado rígido composto pelos materiais citados acima.

Tabela 3 - Aplicações de diferentes substratos

Resina	Base	Produto	Características	Aplicações
Fenólica	papel	XXXPC	Excelentes propriedades mecânicas e elétricas, baixa absorção de água, estampável a frio.	Circuitos convencionais para aparelhos de som, TV, etc..
Fenólica	papel	FR2-HB	Antichamas tipo UL-94HB. Estampável a frio. Demais características conforme o XXXPC	Indicado para circuitos convencionais onde o fator segurança é exigido
Fenólica	papel	FR2-VO	Antichamas tipo UL94VO. Semelhante ao HB porém com propriedades fogo-retardantes superiores	Padrões de segurança mais rígidos. Utilizado em TV a cores, Telecomunicações, amplificadores, etc.
Epóxi	papel	FR3	Características superiores aos anteriores e alta resistência de isolamento. Classe antichamas UL94VO estampável a frio.	E o laminado intermediário entre o FR2-VO e o composite
Epóxi	Tecido de fibra de vidro e papel	Composite	Intermediário entre o FR4VO e o FR4 antichamas tipo UL94VO. Boa estampabilidade a frio. Baixa absorção de água, boa resistência a isolamento.	É intermediário entre o FR4 e o epóxi
Epóxi	Tecido de fibra de vidro	FR4	Excelentes propriedades mecânicas e elétricas. Baixa absorção de água, alta resistência ao calor. Antichamas classe UL94VO. Boa estabilidade dimensional.	Circuitos profissionais utilizados em equipamentos de alta confiabilidade, como computadores, periféricos, telecomunicações, etc..

Fonte: Micropress(2012).

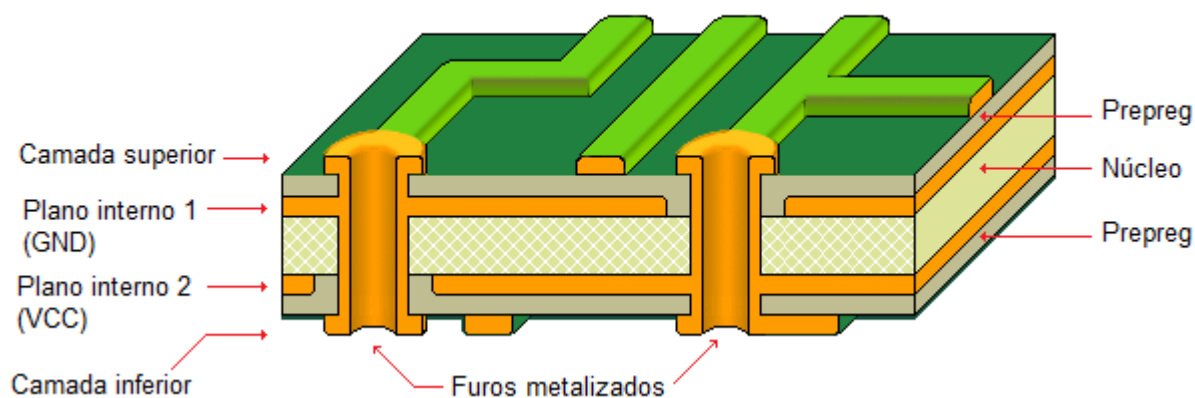
2.2.2 Tipos de PCI

Tendo em vista a infinidade de topologias de circuitos eletrônicos utilizados atualmente, uma preocupação dos desenvolvedores é escolher a melhor forma de como colocá-lo em uma PCI visando o menor custo, sem prejudicar o funcionamento do equipamento. Para tanto, o tipo de placa de circuito impresso a ser escolhido é um fator de grande importância a ser analisado. Normalmente, as PCIs se dividem em quatro categorias: face simples, face dupla, multi-camadas e flexíveis. (RITCHIEY, 2008)

- a) Camada simples: possui cobre em apenas um dos lados da placa. É a categoria que demanda o menor custo de fabricação por sua simplicidade, porém comporta um menor número de conexões entre os componentes, já que possui trilhas em apenas uma face da placa;
- b) Camada dupla: possui cobre nos dois lados da placa. Possibilita um maior número de trilhas para conexão elétrica entre os componentes ou até uma maior área para plano de terra em circuitos mais complexos;
- c) Multi-camadas (*multilayers*): São PCI dotadas de várias camadas condutoras, como mostra a Figura 3, contendo trilhas de conexões ou planos de terra, intercaladas de camadas dielétricas para isolamento. É capaz de comportar circuitos de extrema complexidade sem um grande aumento dimensional;
- d) Flexíveis: São feitos de laminados flexíveis e tem a função de facilitar a montagem de produtos em linhas de produção. Possuem tamanhos e peso reduzidos.

Figura 3 - Exemplo de PCI multi-camadas

Placa de circuito impresso multicamadas



Fonte: Howie(2017).

2.2.3 Processo de fabricação de um circuito impresso multi-camadas

As PCI multi-camadas surgem à medida que cresce a necessidade de se produzir sistemas eletrônicos de alta tecnologia, exigindo assim um maior número de componentes eletrônicos que, por sua vez, trabalham com sinais elétricos de maior frequência, são mais suscetíveis a ruídos externos e necessitam de um maior número de conexões com outros componentes na placa.

O meio industrial e científico estuda novas tecnologias de materiais, processamento e produção a fim de aperfeiçoar a produção destas PCI, visando repetibilidade de fabricação, maior segurança, desempenho do equipamento, menor tamanho e baixo custo.

Inicialmente, os métodos de produção de PCI podem ser divididos em duas categorias: subtrativo e aditivo, podendo existir processos de fabricação que utilizem os dois métodos em etapas distintas. (NAKAHARA, 2008)

2.2.3.1 Fabricação de circuitos impressos pelo processo subtrativo

Este processo parte de uma placa totalmente revestida de cobre, defini-se o traçado condutor do circuito e elimina-se o restante do cobre, para tanto, tem-se as seguintes etapas: (HOLDEN, 2008; IORDACHE, 2009)

- a) Controle de entrada da matéria-prima: uma amostra do laminado é ensaiada a fim de se comparar os valores medidos com os parâmetros fornecidos pelo fabricante, como estabilidade dimensional e aderência do cobre com o substrato;
- b) Corte do laminado: a área do painel é determinada de modo que seja minimizada a produção de retalhos e sobras e aperfeiçoada a estabilidade dimensional;
- c) Tratamento térmico: etapa com objetivo de melhorar a estabilidade dimensional;
- d) Estampagem: os furos do sistema de registro são feitos;
- e) Limpeza da superfície: executada por meios mecânicos e químicos, tem o objetivo de remover óxidos, impressões digitais e resíduos diversos;
- f) Transferência da imagem: o elemento fotosensível é aplicado, material fotopolimérico, ou seja, sensível a luz ultra-violeta (U.V.). Em seguida um fotolito negativo ao traçado do circuito é desenhado e aplicado a placa. A PCI é colocada em uma mesa expositora de luz. As áreas não protegidas pelo fotolito são ativadas e se tornam insolúveis e as áreas protegidas, ou seja, não ativadas são removidas; (CONAGHAN, 2008)
- g) Gravação das camadas internas: feita através de corrosão química do cobre;

- h) Remoção do elemento fotosensível ativado: após o ataque químico do cobre, o material fotosensível ativado que funcionou de máscara na gravação do desenho é removido;
- i) Inspeção: uma primeira inspeção é feita com o objetivo de detectar curtos circuitos ou circuitos abertos indesejáveis e deficiências no substrato;
- j) Oxidação na superfície: a imagem é submetida a oxidação controlada com o objetivo de aumentar a área metálica, melhorando a fixação da resina para uma maior adesão;
- k) Corte do *pre-preg*: o *pre-preg*, material adesivo com resina pré-curada no formato de folha que tem o objetivo de unir as camadas da PCI, é cortado e estampado com o material dielétrico que fará a divisória entre as camadas;
- l) Montagem do pacote e prensagem (laminação): as camadas são prensadas para o *pre-preg* atingir o estado final de cura;
- m) Furação: etapa delicada devido aos diferentes materiais que compõem o painel multicamadas. É feita com brocas de carbeto de tungstênio (WC), por ser mais duro que o aço e tem formatos específicos para uma maior remoção de cavacos e menor temperatura durante o processo de furação; (VANDERVELDE, 2008)
- n) Limpeza dos furos: antes da metalização dos furos para realizar as conexões elétricas necessárias entre as camadas, é importante fazer a primeira limpeza do furo, chamada *desmear*, para remover a resina depositada termomecanicamente nos anéis de cobre das camadas internas. Este resíduo é subproduto do processo de furação, devido às altas temperaturas atingidas através do atrito da broca com o substrato;
- o) *Etch Back*: Segunda etapa de limpeza, onde ocorre também um ataque à resina e as fibras da parede do furo para um melhor contato do cobre dos anéis das camadas internas com o cobre que será depositado para metalizar as paredes do furo.(GURIAN, 2008)

2.2.3.2 Fabricação de circuitos impressos pelo processo aditivo

Este processo consiste em uma série de etapas com a finalidade de depositar cobre em um laminado dielétrico para assim produzir a PCI, para tanto, tem-se as seguintes etapas: (HOLDEN, 2008)

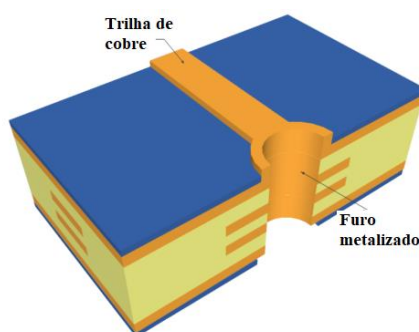
- a) Deposição do catalisador: uma camada polimérica com partículas de borracha e paládio (Pd) é depositada sobre um laminado epóxi. A aplicação deste catalisador pode ser efetuada por imersão, cortina ou rolo;
- b) Cura: a cura térmica na camada polimérica é efetuada;

- c) Ativação: a ativação na camada de borracha é efetuada com uma solução de ácido crômico. As partículas de borracha são removidas, fornecendo uma camada microporosa. Esta camada melhora a área de contato entre o filme de cobre a ser formado e a base do laminado de fibra de vidro;
- d) Furação e aplicação do *platingresist*: a furação da placa é feita e aplica-se a tinta *platingresist* que definirá o circuito em imagem negativa. Esta aplicação é feita geralmente por serigrafia. É possível utilizar também processo fotolitográfico para transferência de imagem para o circuito;
- e) Aplicação do cobre: a camada de cobre é aplicada quimicamente sobre a camada de adesivo ativado pela solução anterior, definindo assim o traçado em cobre. O banho de deposição química de cobre deve possuir boa capacidade de recobrimento e bom poder de penetração, para garantir espessura de camada tanto nas trilhas como nas paredes dos furos. Para isso muita pesquisa vem sendo realizada, no intuito de encontrar formulações nos banhos químicos que garantam esta necessidade. Também a camada metálica deve possuir boas características elétricas e mecânicas para garantir um bom funcionamento do circuito.

2.2.4 Furos metalizados

Os furos metalizados, como o mostrado na Figura 4, são elementos fundamentais para o bom funcionamento de PCI multicamadas, pois eles são responsáveis pela conexão elétrica entre as camadas. Um furo metalizado de má qualidade compromete todo o funcionamento do circuito, principalmente em frequências elevadas.

Figura 4 - Exemplo de furo metalizado



Fonte: Eurocircuits(2016).

Devido à criticidade deste processo deve-se tomar uma série de cuidados nas etapas anteriores e posteriores para que o furo metalizado do circuito impresso não chegue ao cliente com problemas no depósito de cobre nos furos ou na metalização. (HOLMBOM; JACOBSSON, 1988)

São importantes os cuidados na etapa da escolha do substrato da PCI, pois um substrato de origem não idônea é um grande risco para a qualidade do furo metalizado. A etapa de furação é outro processo crítico para o sucesso da metalização do furo. Velocidade de rotação e de penetração da broca são parâmetros que devem ser estudados para redução de rebarba gerada durante o processo. É importante também o cuidado com a montagem dos pacotes que formarão a placa multicamadas. Estes painéis devem estar bem prensados para evitar o aparecimento de rebarbas. (CARANO, 2015)

Finalmente, a etapa de limpeza e preparação do furo é crucial para o êxito do processo. Técnicas químicas para limpeza e ativação da superfície da parede do furo são utilizadas. Todavia, nos últimos anos, diversas técnicas utilizando plasma mostraram maior qualidade no processamento e também apresentaram vantagens como redução de gastos com resíduos e maior segurança para os operadores. (AVERY; MOLEUX, 2008)

Após todas estas etapas, o cobre é eletro-depositado nas paredes do furo a ser metalizado. Para tanto, após a ativação da superfície o furo passa por um banho onde é depositada uma camada de carbono condutora em sua superfície. Esta camada funciona como catodo para receber o cobre que será depositado. Para uma boa qualidade de condução elétrica, a espessura do cobre deve ser de pelo menos 25 microns. (DOW, 2013)

2.3 PROCESSOS A PLASMA NA INDÚSTRIA DE PCI

O plasma é excelente para melhorar a adesão de materiais por aumentar sua energia superficial, também é muito útil para limpeza de contaminantes que podem afetar negativamente a aderência de revestimentos. O tratamento com plasma é adequado para uma grande variedade de etapas de limpeza requeridas, ativação de superfície e aplicações que necessitem de melhoria na adesão em fabricação de semicondutores, embalagem e montagem microeletrônica e fabricantes de dispositivos médicos. (BERLIN; LOEFFLER; SELESTAK, 2016)

Qualquer processo pelo qual a superfície de um produto é modificada para se tornar mais compatível a uma ligação ou uma tinta para impressão é comumente referida como modificação da superfície a plasma. Esses processos são usados para aumentar a energia de

superfície de um material, tornando-o mais hidrofílico (molhável). O tratamento com plasma é frequentemente usado em teflon ou plásticos para tornar sua superfície mais "molhável", o que, por sua vez, aumenta a capacidade de adesão e a capacidade de impressão.

O processamento a plasma modifica as primeiras camadas do material, deixando os radicais livres na superfície e permitindo o vínculo com a cola ou a tinta. Isto faz-se necessário ao unir diferentes superfícies, como plástico e metal. As superfícies diferentes necessitam de diferentes agentes de ligação. Isso dificulta a obtenção de um agente de ligação adequado.

A modificação da superfície por tratamento plasma permite que a adesão entre a superfície e o agente de ligação ocorra com uma força significativamente aumentada.

Juntamente a isto, ocorre o fato que todas as superfícies são contaminadas com produtos orgânicos, mesmo que os contaminantes sejam geralmente invisíveis a olho nu. Esses contaminantes afetam a capacidade de um objeto interagir com outros materiais, como adesivos ou tinta. O tratamento a plasma é capaz de remover contaminantes orgânicos. (PETASCHA et al., 1997)

Na indústria de circuitos impressos, o plasma é utilizado principalmente nas etapas de limpeza (*desmear*) e ativação de superfície (*etch back*), pois é uma alternativa viável ao procedimento, agregando qualidade e diminuindo efetivamente a produção de resíduos no processo.

2.3.1 Limpeza a plasma (*plasma cleaning*)

A limpeza de plasma é o processo que consiste na remoção de toda a matéria orgânica da superfície de um material. Isto é geralmente realizado em uma câmara de vácuo utilizando gás oxigênio e / ou argônio, já que a câmara oferece um maior controle por ser um ambiente monitorado. (PLASMAETCH, 2016)

O processo de limpeza é um processo ambientalmente seguro, pois não há substâncias químicas tóxicas envolvidas. O plasma geralmente deixa radicais livres na superfície que está sendo limpa para aumentar ainda mais a capacidade de adesão dessa superfície.

O plasma é amplamente utilizado na indústria da placa de circuitos para limpeza da PCI antes da conformação dos revestimentos durante o processo de encapsulamento (principalmente na produção de circuitos integrados). O processamento de plasma proporciona vantagens significativas em relação a outras técnicas de limpeza de superfície, como por exemplo:

- a) Funciona para uma grande variedade de materiais (metais, plásticos, vidro, cerâmica, etc.);
- b) É a escolha ecológica. A limpeza de plasma elimina a necessidade de solventes químicos nocivos à saúde e ao meio-ambiente. Pode-se obter economias significativas de custos sem a necessidade de ter que enfrentar os riscos ambientais de outros métodos de processamento;
- c) Onde os solventes podem deixar um resíduo após o processamento, o procedimento a plasma é capaz de fornecer um produto final completamente sem resíduos. O processamento elimina agentes químicos antioxidantes, resíduos de carbono, óleos e todas as variedades de compostos orgânicos.

2.3.2 Plasma etching

O processo de *plasma etching*, ou *etch back*, é responsável por limpar o resíduo de epóxi FR4 deixado no cobre pelo processo de perfuração e também retrai o material dielétrico, como mostra a Figura 5. Isso permite uma ligação multicamadas com o cobre ou outro material condutor. (PLASMAETCH, 2016)

Figura 5 - Comparação entre os processos de *plasma desmear* e *plasma etchback*



Fonte: Plasmaetch(2016).

O material entre as camadas de cobre é retirado pelo plasma, permitindo que a metalização do furo entre em contato com mais cobre e crie uma conexão mais forte mecanicamente e eletricamente menos resistiva. *Etch back* é freqüentemente usado em aplicações que exijam alto grau de confiabilidade, como a indústria aeroespacial, hospitalar e militar.

O TeflonPTFE (politetrafluoroetileno) é um material cada vez mais utilizado em substratos para PCI devido sua baixa perda e bom comportamento de sua constante dielétrica em altas frequências, todavia a impressão em superfícies lisas, como Teflon, tem o potencial

de resultar em um acabamento de má qualidade e falha na etapa de adesivação ou metalização de furos, o que pode comprometer o funcionamento do produto final. (HUSCHKA, 1998)

As superfícies de polímeros lisos são muitas vezes tratadas e impressas ou coladas em outro material como metal ou até mesmo outro polímero. Quando essas superfícies são tratadas corretamente com o plasma, elas podem ser ligadas sem risco de uma adesão fraca. Os efeitos da ligação com o plasma são observados apenas na superfície, mantendo assim as propriedades do *bulk* do material inalteradas.

O processo é significativamente mais preciso do que os métodos tradicionais de limpeza química úmida. O plasma evita o uso de produtos químicos perigosos para o meio ambiente e não cria resíduos perigosos, sendo assim mais seguro para o ambiente e para os operadores do processo. A Tabela 4 mostra a comparação do processo de *etchback* realizado a plasma com o mesmo processo realizado com produtos químicos.

Tabela 4 - Comparação do processo de *etchback* feito a plasma e feito quimicamente

Plasma <i>etchback</i>	<i>Etchback</i> químico
Menos sensível a variação de parâmetros e de fácil controle.	Muito sensível ao tempo de processo e concentração química.
Sem resíduos remanescentes.	Necessita a remoção de resíduos utilizando várias etapas de lavagem.
Pouca matéria prima necessária.	Grande quantidade de matéria prima (principalmente líquida) necessária.
A maior parte dos resíduos são gases e podem ser liberados diretamente na atmosfera.	A maior parte dos resíduos são líquidos e necessitam de permissões governamentais especiais para descarte.
Gases utilizados são não-tóxicos.	A maior parte dos solventes ou ácidos utilizados é tóxica ou prejudicial.
Espaço de instalação é mínimo.	Necessita de um grande espaço de chão de fábrica.
Necessidade de treinamento para operação é mínimo.	Por medida de segurança, demanda grande treinamento do operador.
O sistema pode ser programado, o que garante alto grau de repetibilidade.	Processo altamente suscetível a erros do operador.
Pode ser interrompido e retornado facilmente.	Processo não pode ser interrompido e retornado.

Fonte: Plasmaetch(2016).

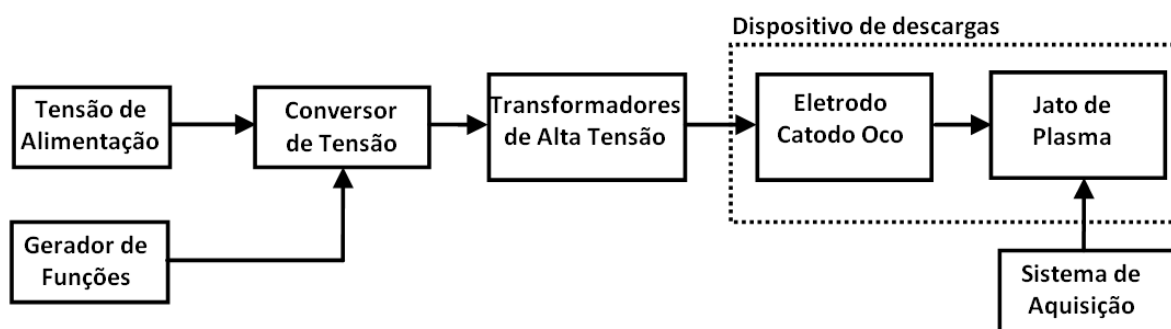
3 PARTE EXPERIMENTAL E METODOLOGIAS

Nesta seção são apresentados todos os equipamentos utilizados e procedimentos realizados para a produção dos micro-jatos de plasma, bem como, seu uso no tratamento de superfícies de laminados de placa de circuito impresso.

3.1 ESQUEMA DE GERAÇÃO DE PLASMA E SUAS CARACTERÍSTICAS

O jato de plasma é produzido por descargas elétricas em pressão atmosférica utilizando gás argônio. O diagrama de blocos da instalação dos dispositivos para a produção de plasma é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama em blocos dos dispositivos para a produção de plasma



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.1 Fonte de tensão

A fonte de tensão utilizada no sistema de geração de plasma é da marca GBS Elektronik modelo Minipuls 6 capaz de gerar tensões alternadas elevadas (da ordem de até 30 kV de pico). O equipamento é formado por dois módulos: um conversor chaveado CC/CA com a configuração de ponte completa e um módulo de transformadores associados em cascata com a finalidade de amplificar a tensão de saída do conversor. O conversor em ponte entrega em sua saída um sinal quadrado de baixa tensão para o conjunto de transformadores que, simultaneamente, amplifica e filtra o sinal fornecendo uma saída senoidal.

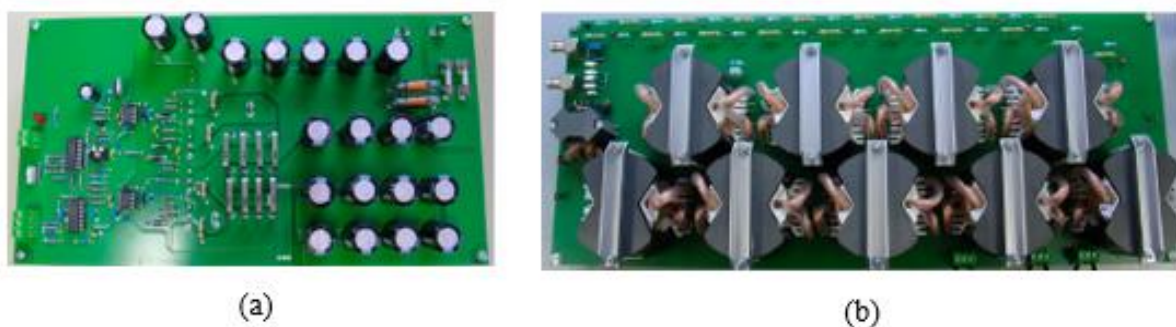
O conjunto Minipuls 6 foi desenvolvido para atingir valores elevado de tensão CA de até 30 kV de pico (60 kVpp ou 21 kV RMS) (GBS Elektronik, 2015). Sua faixa de operação recomendada é de 5kHz a 20 kHz, porém sua utilização pode ser estendida até 45 kHz. A

frequência é controlada por um gerador de função externo (marca RIGOL, modelo DG1012). Já o controle de amplitude, é feito alterando a saída de uma fonte CC regulada externamente. O equipamento também possui uma saída de monitoramento de tensão de saída, que possui uma atenuação 3000:1 e pode ser ligada diretamente em um osciloscópio. O dispositivo possui proteções de sobre-corrente, sobre-temperatura e sobre-tensão. A proteção de sobre-tensão é realizada pelo disparo de um centelhador (*spark gap*) limitando a saída em 35 kV aproximadamente.

A Figura 7 apresenta o conjunto Minipuls 6 formado por um conversor de ponte completa - Figura 7(a) e um amplificador formado por transformadores em cascata. O conversor de ponte completa, conforme ilustra a Figura 7(a), pode ser dividido em duas partes: 1) circuito de controle e 2) circuito de chaveamento. O circuito de controle é alimentado por uma fonte de alimentação CC, denominada PS (*Power Supply*) e processa o sinal de controle externo CS (*Control Signal*) de modo a adaptá-lo para o correto comando do circuito de chaveamento.

O circuito de chaveamento é constituído, basicamente, por quatro transistores MOSFET's de potência, em configuração de ponte completa (*full bridge*) que precisa ser alimentado por uma segunda fonte CC, denominada BV (*Bridge Voltage*). A saída do conversor é um sinal quadrado de baixa tensão e alta capacidade de corrente, na frequência determinada pelo sinal de controle.

Figura 7 - (a) – Conversor de ponte completa; (b) Amplificador de transformadores em Cascata



Fonte: Minipuls 6 (2015).

O sinal quadrado proveniente do conversor de ponte completa chega ao amplificador (Figura 7(b)) e percorre oito transformadores conectados em cascata. Assim sua amplitude é

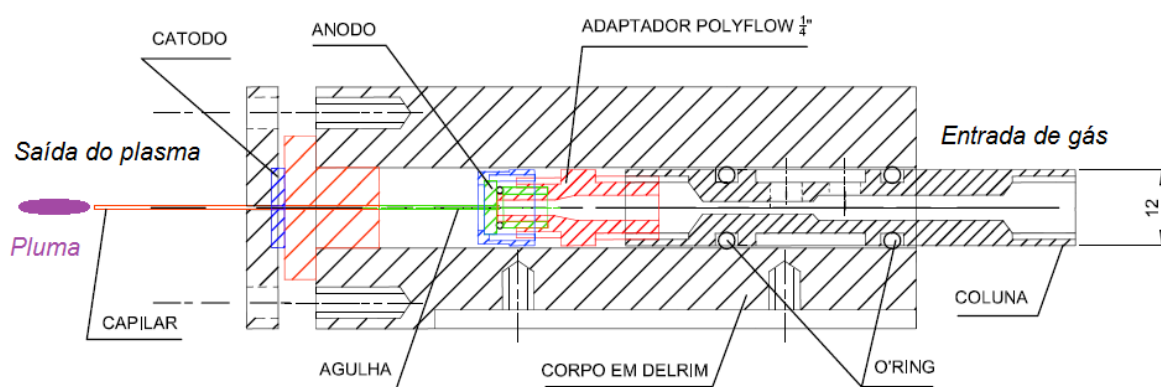
amplificada em tensão e o sinal na saída passa a ser senoidal devido às condições de ressonância do conjunto de transformadores definidas durante o projeto.

A tensão do sinal de saída é medida com o osciloscópio através de um atenuador de 3000:1. Também é medida a tensão sobre um capacitor de poliéster metalizado de 50 nF interligado em série com a alimentação do dispositivo para se calcular a potência do jato.

3.1.2 Dispositivo de micro-jato de plasma

A Figura 8 apresenta a vista do corte do dispositivo, bem como, da ponteira da agulha e do capilar acoplados à ponteira. O dispositivo de micro-jato é composto por um suporte de poliacetal (*Delrin*) em formato cilíndrico, ao qual coaxialmente à ele é acoplado um dispositivo feito em latão com anéis de vedação (o-rings) de medidas que variam de 1,5 mm a 3,0 mm de espessura. Em uma das extremidades do micro-jato é acoplada a tubulação de gás Argônio, bem como, um cabo coaxial que conecta a Minipuls 6 ao sistema fornecendo uma tensão pico a pico da ordem de 5 kV.

Figura 8 - Vista do corte do esquema do micro-jato de plasma



Fonte: Produção do próprio autor

Na outra extremidade do dispositivo de micro-jato é acoplada uma ponteira que apresenta uma agulha de aço inoxidável com espessura de 0,7 mm e, coaxial à esta, um tubo capilar de borossilicato de 1,0 mm de espessura e comprimento variável, ambos conectados com um anel de latão de 1,2 mm de espessura. A Figura 9 ilustra o esquema do dispositivo de micro-jato de plasma.

Figura 9 - (a) Esquema de encaixe entre os componentes do dispositivo de microjato em 3D; (b) vista explodida



Fonte: Produção do próprio autor

A pluma de plasma é gerada na saída da agulha e flui através do capilar para seu exterior na atmosfera ambiente. O formato de pluma, a energia associada a ela, bem como o regime em que se encontra o plasma gerado dependem de vários fatores tais como espessura, comprimento, material da agulha e do capilar, do sinal de alta tensão aplicado (caracterizado por sua forma de onda, amplitude e frequência), além da pressão, vazão e tipo de gás.

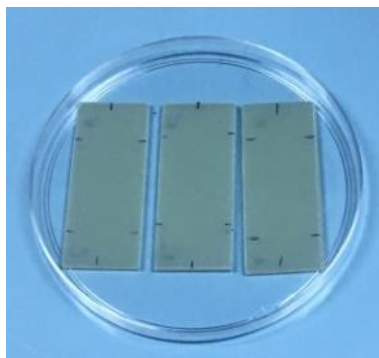
3.2 TRATAMENTO DAS AMOSTRAS DE SUBSTRATO POR MICRO-DESCARGAS DE PLASMA

3.2.1 Preparação das Amostras Substrato

As amostras de substrato foram obtidas através de laminados de fibra de vidro tipo FR4 com 1,5 mm de espessura, originalmente não metalizadas. As amostras foram cortadas com uma serra de fita de bancada nas dimensões de 20 x 50 mm, como mostra a Figura 10. Em seguida, as bordas das amostras foram lixadas com lixa 400 para melhor acabamento. É importante ressaltar que as faces da amostra não foram lixadas, para evitar comprometimento das características originais dos laminados comerciais.

Após o acabamento, as amostras foram limpas por ultrassom (equipamento Ultrassom Thornton, modelo T14) em banhos de água destilada e álcool isopropílico (pureza de 99,5%) em intervalos de 30 segundos cada, a fim de provocar a limpeza da superfície da amostra dos possíveis resíduos do lixamento e do manuseio. Finalmente, elas foram secadas com um secador doméstico de 1000 W e, em seguida, guardadas em recipiente limpo.

Figura 10 - Amostras de substrato de fibra de vidro



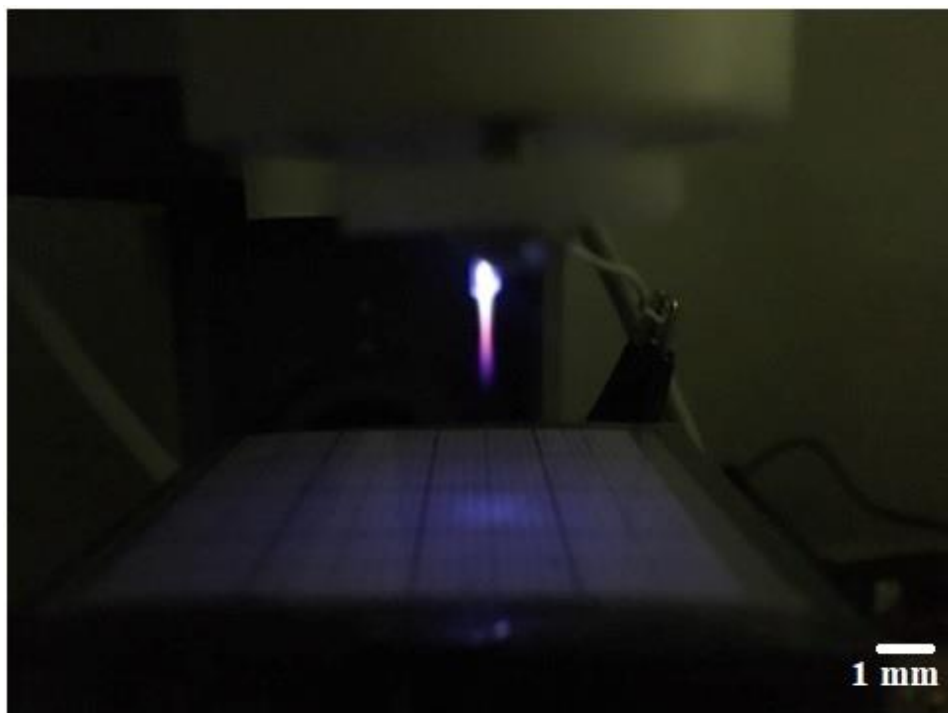
Fonte: Produção do próprio autor

3.2.2 Esquema de tratamento no ponto por microdescargas de plasma

O tratamento de amostras FR4 foi realizado utilizando o dispositivo de microjato com ponteira simples na vertical e um posicionador de aço com deslocamento XYZ, isolado por meio de uma folha de Mylar™ de 0,5mm de espessura. O gás utilizado para o tratamento das amostras foi o Argônio (Ar), que flui pelo dispositivo descrito anteriormente com uma vazão de 0,75 l/min. A tensão de pico a pico aplicada assume valores no intervalo de 5,0 kV a 5,5 kV na frequência de 37 kHz(KAYAMA, 2014). O valor da voltagem de trabalho foi escolhido para preservar a integridade do capilar de borossilicato da ponteira do dispositivo visto que, para valores de voltagem superiores à 6,0 kV, pode ocorrer a sua ruptura.

Inicialmente, o tratamento por plasma foi aplicado em dois pontos no substrato espaçados 30 mm um do outro. Em cada um desses pontos manteve-se o mesmo tempo de tratamento, sendo que, um deles é tratado a 0 mm da extremidade do jato de plasma e o outro a 5 mm distante do jato de plasma. O procedimento foi repetido em diferentes amostras variando o tempo de tratamento entre elas de 1 a até 300 segundos. A Figura 11 apresenta o uma foto do jato de plasma utilizado.

Figura 11 - Jato de plasma na pressão atmosférica



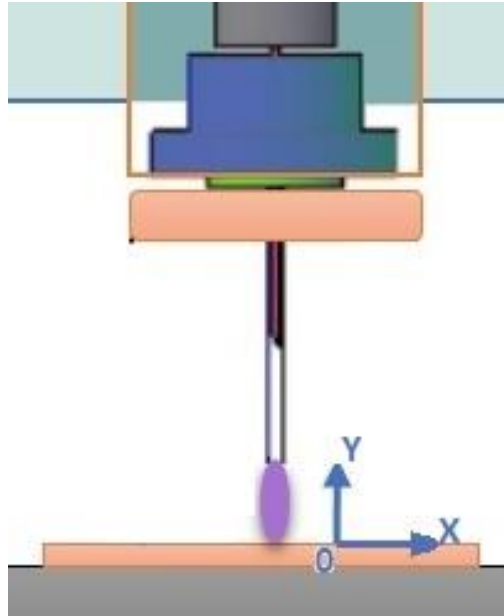
Fonte: Produção do próprio autor

A fim de garantir que a pluma de plasma operasse no mesmo regime em todas as análises optou-se por manter a vazão do gás constantemente aberta sendo a descarga de plasma liberada através do controle do gerador do sinal de 37 kHz.

O efeito do tratamento superficial das amostras foi avaliado pelo processo de medição do ângulo de contato, com a finalidade de verificar os seguintes parâmetros:

- a) a variação do ângulo de contato em função do tempo de tratamento aplicado: para tanto foram consideradas duas distâncias fixas entre jato e superfície da amostra (0 mm e 5 mm) e medido o ângulo de contato para diferentes tempos de tratamento e os resultados comparados aos de uma amostra-controle não-tratada;
- b) a variação do ângulo de contato em função da distância jato-amostra: para este ensaio foi fixado um tempo de tratamento de 60 segundos e amostras foram tratadas com diferentes distâncias entre sua superfície e a ponta do jato de plasma, como mostra a Figura 12. O ponto central do eixo de coordenadas (zero) foi fixado na ponta do jato, como mostra a figura, as distâncias positivas indicam posições adentradas no jato, variadas em Y;

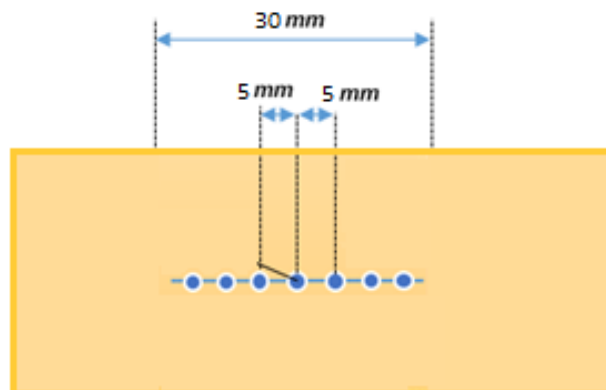
Figura 12 - Ensaio da influência da distância entre jato-amostra para o ângulo de contato



Fonte: Produção do próprio autor

c) o raio de ação do tratamento a plasma: um tratamento de 60 segundos, a 0 mm da ponta do jato é feito e o ângulo de contato é medido no ponto central e em diferentes pontos (variados em X) do centro do tratamento, como mostra a Figura 13. Desta forma é possível acompanhar o quanto o tratamento altera o ângulo de contato em pontos distantes ao foco do processo, permitindo assim analisar seu raio de ação;

Figura 13 - Varredura linear de amostras substrato a partir do ponto central



Fonte: Produção do próprio autor

d) a variação do ângulo de contato de uma amostra ao longo de um mês após o tratamento: este ensaio, denominado de ensaio de envelhecimento (*aging*), tem o intuito de analisar a regressão do processo ao longo dos dias. Para tanto foi medido o ângulo de contato de uma amostra tratada por 60 segundos, a 0 mm da extremidade do jato, ao longo de 30 dias, permitindo avaliar a vida útil do processo.

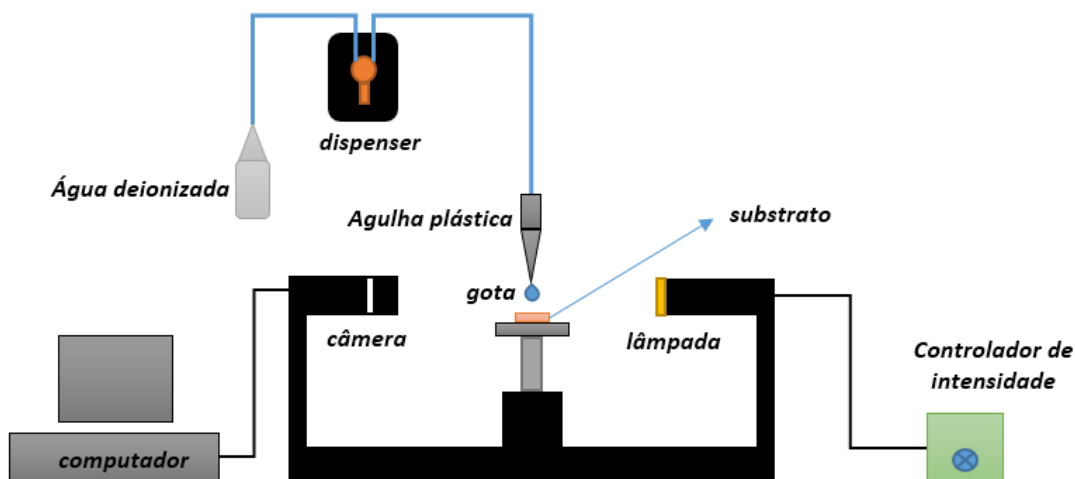
3.2.3 Medida do Ângulo de Contato θ para a fibra de vidro FR4

O tratamento por plasma, produzido pelo dispositivo de microdescarga, foi utilizado para modificar a superfície de materiais devido à interação dessas superfícies com o plasma e consequentes modificações de suas estruturas químicas e morfológicas (ESENA, 2005). As medidas do ângulo de contato foram realizadas com a finalidade de analisar a variação da molhabilidade da superfície após o tratamento e sua dependência do tempo de processo, assim como sua área de ação e vida útil do tratamento.

O fluxo de gás estabelecido para todas as amostras tratadas foi de 0,75 l/min e a tensão aplicada foi de 5,5 kV pico a pico, como descrito anteriormente. Dessa forma, estabelecida a área tratada e a variação desta com os parâmetros já citados, fez-se a medição do ângulo de contato para um ponto de tratamento.

A medida do ângulo de contato θ para as amostras fibra de vidro foi realizada utilizando um medidor de ângulo de contato com gota estática automatizada (equipamento Ramé-Hart, modelo 100-00), conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 - Medição do ângulo de contato para as amostras fibra de vidro



Fonte: Produção do próprio autor

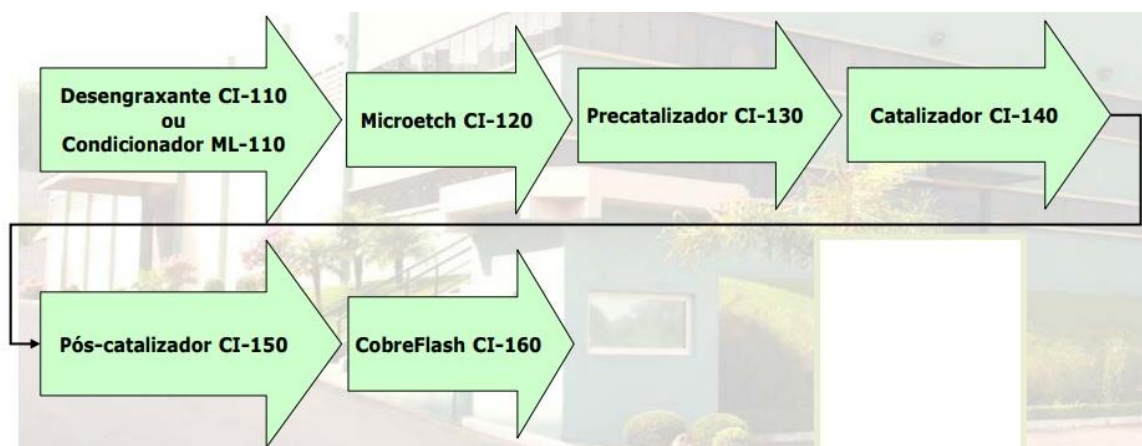
Este aparelho consiste basicamente de uma câmera de captura de imagem, uma lâmpada com um regulador de intensidade, um *dispenser* o qual adiciona ou retira água deionizada a uma agulha plástica fixada ao dispositivo e uma plataforma de aço para a acomodação da amostra (substrato). Para o cálculo do ângulo, a câmera fotográfica faz a captura da imagem da gota depositada no substrato e manda para um computador que através de um programa computacional do equipamento mostra o perfil da gota e calcula o ângulo de contato. Para todos os testes, o volume de gota padrão utilizado foi 2,0 μl . Foram utilizadas cinco amostras para cada variação dos ensaios e feitas cinco medições de ângulo de contato por gota.

3.3 MÉTODO PARA METALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras, após tratadas com diferentes tempos de tratamento a uma distância de 0 mm da extremidade do jato, foram submetidas a processos químicos de metalização para materiais não condutores. Este procedimento foi realizado com auxílio do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI), do Departamento de Sistemas Eletrônicos (PSI) da FATEC – São Paulo.

O método foi feito através de deposição química, seguindo o roteiro COBREFLASH CI-160 (Figura 15), da empresa Alfacleaner. O procedimento foi dimensionado para recipientes com 0,3l de banho com a taxa de deposição esperada de 0,3 a 0,5 microns de cobre para 15 minutos de banho. (ALFACLEANER, 2005). É importante ressaltar que todo o processo foi feito em temperatura ambiente, entre 20 °C e 30 °C, como recomenda o fabricante dos banhos e o processo foi iniciado na etapa do Pré-catalizador CI-130.

Figura 15 - Diagrama do procedimento de metalização Cobreflash CI-160

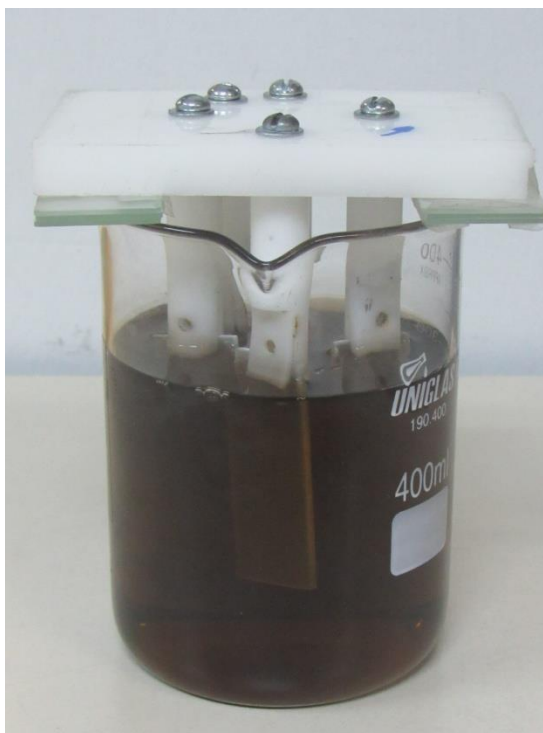


Fonte: Alfacleaner (2005)

Desta forma, o procedimento de metalização foi dividido nas seguintes etapas:

- a) Pré-catalisador: Uma etapa que precede o uso do catalisador é necessária a fim de evitar a contaminação do próximo banho por arraste. A amostra é imersa no banho do pré-catalisador CI-130 na concentração 950 ml/l por 1 minuto para que sejam removidas eventuais impurezas do micro-ataque;
- b) Catalisador (Figura 16): O substrato não condutor precisa de um catalisador a base de paládio e estanho para conseguir receber a camada de cobre, uma solução coloidal onde a função do estanho é manter o paládio na solução, evitando que este sofra redução. O catalisador CI – 140 com concentração 40 ml/l e o aditivo CI-140 na concentração 10 ml/l são utilizados. O banho dura 6 minutos sob agitação constante;

Figura 16 - Banho de catalisador CI – 140

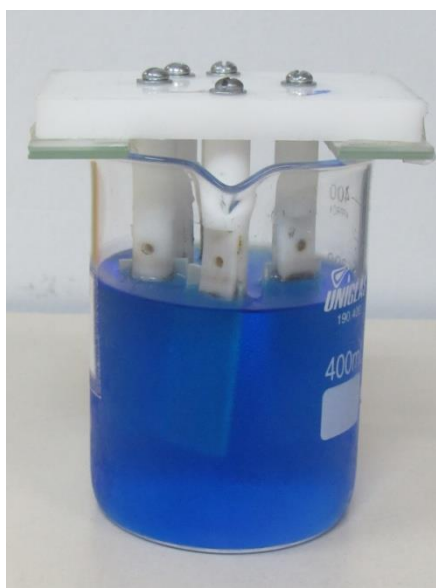


Fonte: Produção do próprio autor

- c) Lavagem intermediária: As amostras são lavadas em água deionizada por 20 segundos;
- d) Pós-catalisador: As amostras passam por um banho de pós-catalisador CI-150, na concentração de 100 ml/l e água deionizada por 3 minutos sob agitação constante. Este banho remove o estanho deixando somente paládio na superfície;

- e) Lavagem intermediária: Uma última etapa de lavagem é realizada em água deionizada por 20 segundos;
- f) Cobre-químico (Figura 17): As amostras são imersas no banho de cobre químico. O banho é preparado com água deionizada 840 ml/l, Cobreflash FA 80 ml/l e Cobreflash FB 80 ml/l. O banho, composto por sulfato de cobre e formaldeído é o responsável por depositar cobre na superfície da amostra. O paládio deixado na superfície da amostra age como catalisador da reação de redução do cobre sobre a superfície da amostra. Este banho foi realizado por 8 minutos em amostras de fibra de vidro;

Figura 17 - Banho de cobre-químico



Fonte: Produção do próprio autor

- g) Anti-oxidante: Etapa com a finalidade de retardar a oxidação da camada de cobre devido ao contato com o ambiente. O produto utilizado foi o anti-oxidante CI-170, na concentração de 10 ml/l e água deionizada. As amostras ficavam no banho por 30 segundos.

3.4 MÉTODOS UTILIZADOS PARA ENSAIOS DE ADESÃO DO COBRE DEPOSITADO NAS AMOSTRAS DE SUBSTRATO

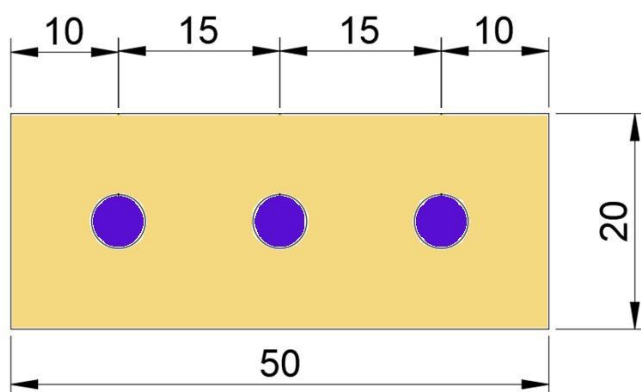
Para avaliar o efeito na adesão da camada de cobre depositada sobre o substrato em amostras não-tratadas e tratadas, foram utilizadas as normas de teste de adesão da *Association*

Connecting Eletronics Industries - IPC e uma fita para testes de adesão *3M* modelo *Scotch 250YT*. É importante que esta fita, após ser colocada sobre a amostra, seja removida em um ângulo o mais próximo possível de 180° (IPC, 2004). Depois de retiradas, as fitas com cobre não retido foram fixadas em uma lâmina de microscópio para menor manipulação. Por fim, as lâminas foram fotografadas com uma câmera *Canon* modelo *PowerShot SX520 HS* e as imagens, então, foram analisadas utilizando-se o *software ImageJ*.

3.4.1 Ensaio de adesão para tratamentos pontuais

As amostras neste teste foram tratadas com diferentes tempos de tratamento. Foram feitas três amostras com tempo de tratamento de um minuto e três com tempo de dois minutos. Em cada uma das amostras foram definidos três pontos alinhados horizontalmente e tratados com os mesmos tempos, como mostra o esquemático da Figura 18.

Figura 18 –Ensaio realizado em amostras de fibra de vidro com tratamentos pontuais alinhados (dimensões em mm)

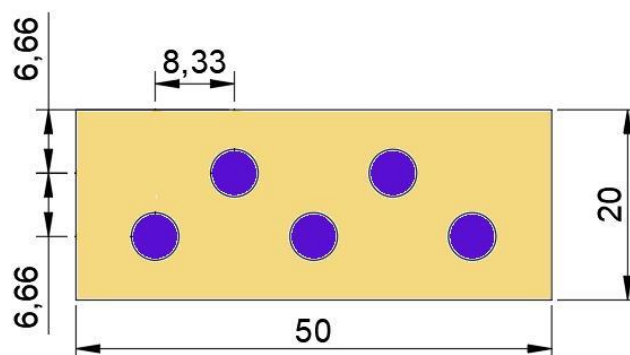


Fonte: Produção do próprio autor

Esse ensaio tem como objetivo confirmar se a adesão do cobre em regiões tratadas é melhor do que em regiões não tratadas.

Ainda, visando confirmar a influência do tratamento, novas amostras com nova distribuição de pontos foram tratadas, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Ensaio realizado em amostras de fibra de vidro com tratamentos pontuais não – alinhados (dimensões em mm)



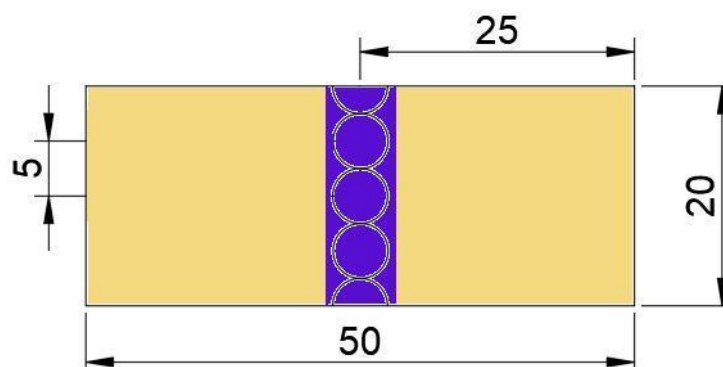
Fonte: Produção do próprio autor

Este ensaio tem como objetivo concluir se o plasma realmente influencia nos pontos tratados confirmando se o ensaio anterior não gerou um falso-positivo pelo fato dos pontos de tratamento estarem alinhados no centro da amostra.

3.4.2 Ensaio de adesão para tratamento em linha contínua (varredura)

O ensaio com tratamento em linha contínua (varredura) foi realizado utilizando-se tratamentos pontuais próximos o bastante para simular uma varredura contínua. Assim sendo, utilizou-se pontos espaçados de 4 mm, alinhados ao longo de uma reta de 20 mm, como mostra a Figura 20. Este teste foi realizado em diferentes amostras com diferentes tempos de tratamento. A fita para teste de adesão utilizada, obtida conforme descrito anteriormente, foi fotografada e analisada no *ImageJ*. Foi selecionada para análise sempre a mesma região para cada amostra e medida a fração de área onde a fita não removeu o cobre. O intuito desse teste é ter uma avaliação quantitativa de quanto o tempo de tratamento influencia na adesão da camada de cobre depositada.

Figura 20 - Ensaio realizado em amostras de fibra de vidro de tratamento com varredura em linha (dimensões em mm)



Fonte: Produção do próprio autor

3.4.3 Ensaios de tratamento em furos de placa de circuito impresso

Os ensaios em furos passantes têm o objetivo de averiguar a alteração na qualidade da metalização na parede de um orifício tratado com processamento a plasma, como realizado nos ensaios de superfície apresentados nos itens anteriores. Para tanto, foram utilizados orifícios de 0,5 mm de diâmetro.

Foram utilizadas placas perfuradas como a apresentada na Figura 21, apenas os furos da aresta oposta ao chanfro foram tratados, para que a amostra possa ser embutida e cortada para análise posterior.

Figura 21 - Exemplo de amostra utilizada para ensaios em furos passantes



Fonte: Produção do próprio autor

Os orifícios foram submetidos para tratamentos de um, dois e três minutos em diferentes amostras, e comparados com amostras não tratadas.

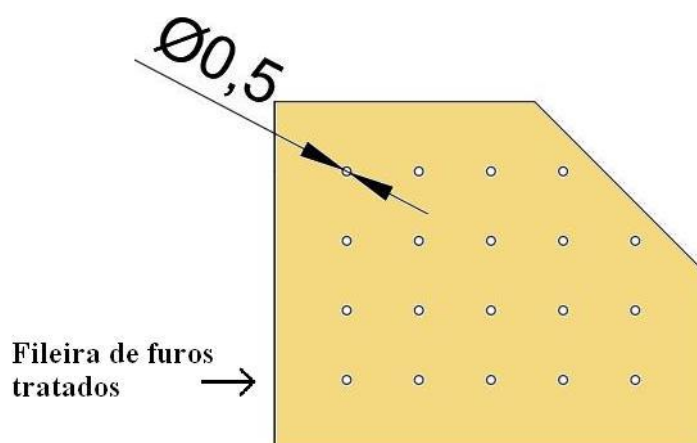
Os ensaios realizados nessas amostras são os de medição de condutibilidade elétrica e imagens em microscópio.

3.4.3.1 Medição de condutividade elétrica entre faces das amostras

Após tratadas e metalizadas, as amostras têm o cobre das bordas laterais removidos com uma ferramenta de ponta diamantada. O intuito disto é fazer com que a conexão elétrica entre as duas faces seja definida, unicamente, pela metalização dos furos.

Em seguida, os orifícios são isolados um a um com a ferramenta diamantada, como mostrado na Figura 22, a resistência entre a área isolada e o resto da face é medida com a finalidade de averiguar se está realmente isolado e, finalmente, a resistência entre as duas áreas isoladas, uma que cada face, é medida para conferir se o furo foi metalizado.

Figura 22 - Representação de uma amostra com áreas perfuradas isoladas



Fonte: Produção do próprio autor

É importante ressaltar que, por se tratar de um valor de resistência muito baixo, a resistência elétrica residual proveniente das pontas de prova do multímetro é levada em consideração no ensaio, sendo está conferida anteriormente e descontada em cada valor de resistência de furo obtido.

3.4.3.2 Preparação das amostras para microscopia óptica

Um processo que possibilita uma análise microscópica segura da metalização dos furos é pela utilização de moldagem da amostra em resina plástica transparente para a obtenção de

um bloco que possa ser trabalhado mecanicamente sem o risco de afetar a metalização. Este processo, chamado de embutimento da amostra, é descrito a seguir. Neste caso o embutimento é realizado utilizando-se formas cilíndricas com 1 cm de raio e 2,5 cm de altura. As amostras são dispostas verticalmente nas formas que, em seguida, são preenchidas com a resina plástica sendo, então, iniciado o processo de secagem para endurecimento. A secagem é feita em capela na temperatura ambiente durante um dia. Após este tempo os blocos são retirados das formas e mantidos ao ar livre por mais um dia para completar o processo de secagem podendo, então, ser iniciada a preparação do bloco para a análise microscópica.

Este procedimento consiste em lixar cada bloco, inicialmente com lixa de granulação 400 até que seja atingida a parede externa do furo metalizado. Em seguida o processo continua com lixa 600 até próximo ao centro do furo e, finalmente, são utilizadas lixas 1500 e 2000 para retirar os riscos na resina. Para melhorar o acabamento, também é realizado um polimento final com sílica de 0,02 μm , em uma solução diluída em 50% de água deionizada, para que a superfície fique totalmente transparente permitindo a perfeita visualização microscópica da metalização realizada nos furos. A Figura 23 apresenta o resultado final obtido das amostras assim processadas.

Figura 23 - Exemplo de amostras de furo metalizado embutidas



Fonte: Produção do próprio autor

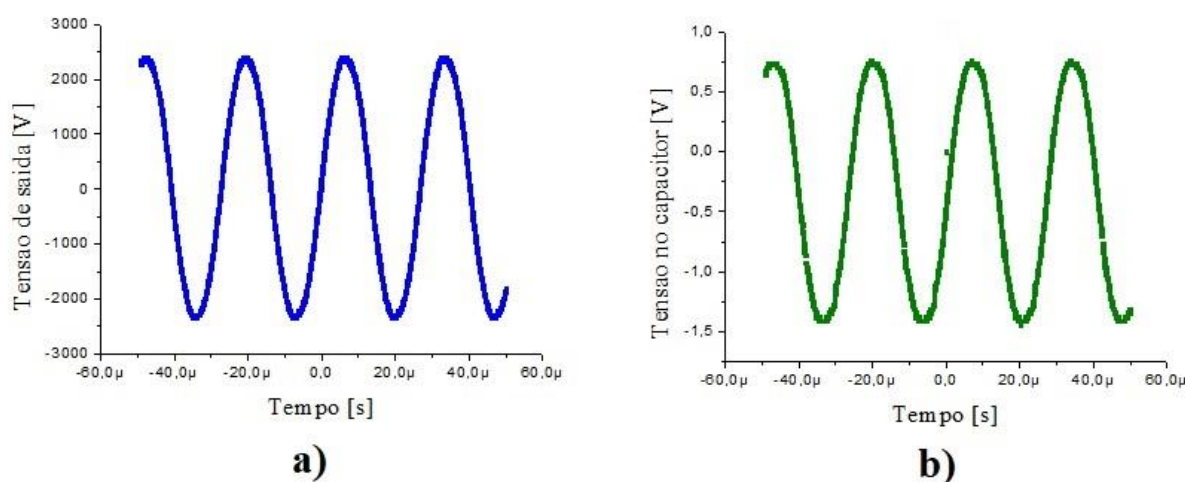
4 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados e as considerações pertinentes em cada caso.

4.1 POTÊNCIA DO JATO DE PLASMA

Para se obter os valores de potência referente ao tratamento com plasma, primeiramente mediu-se a tensão de saída da fonte de descarga e a tensão no capacitor de 10 nF que se encontra em série com o dispositivo de descarga, as curvas obtidas são apresentadas na Figura 24a e 24b, respectivamente

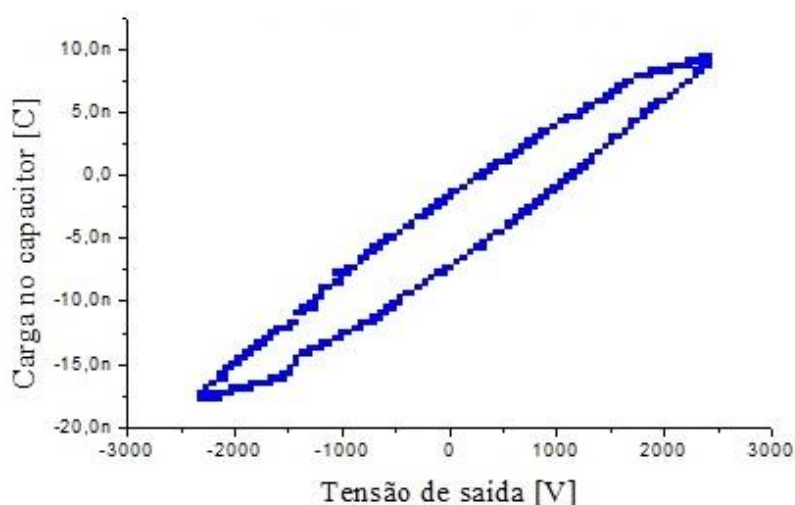
Figura 24 - Tensões obtidas na aquisição do sistema de plasma: a) amostra da tensão aplicada no eletrodo; b) Tensão medida no capacitor



Fonte: Produção do próprio autor

Em seguida, os sinais elétricos obtidos ao longo do período do sinal são dispostos no formato XY, onde o eixo X possui os valores da amostra da tensão de saída e o Y, a carga no capacitor em série, como mostra a Figura 25.

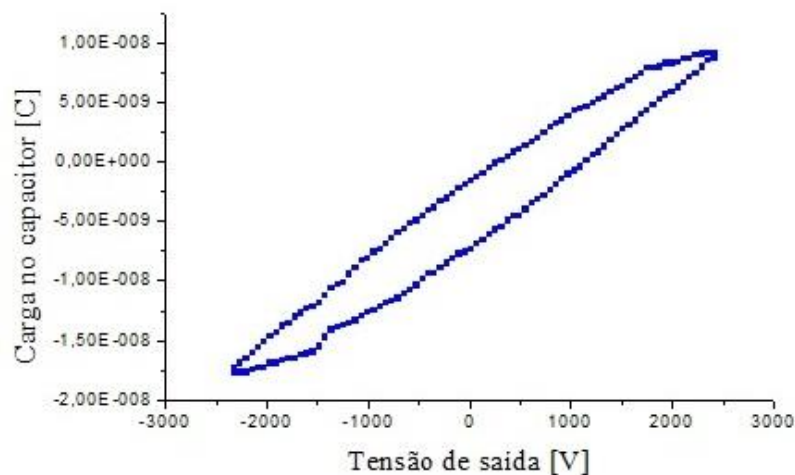
Figura 25 - Curva de carga no capacitor pela tensão de saída aplicada



Fonte: Produção do próprio autor

Por fim, a curva obtida é suavizada utilizando a média dos pontos vizinhos, como na Figura 26, e a potência é calculada por figura de Lissajous.

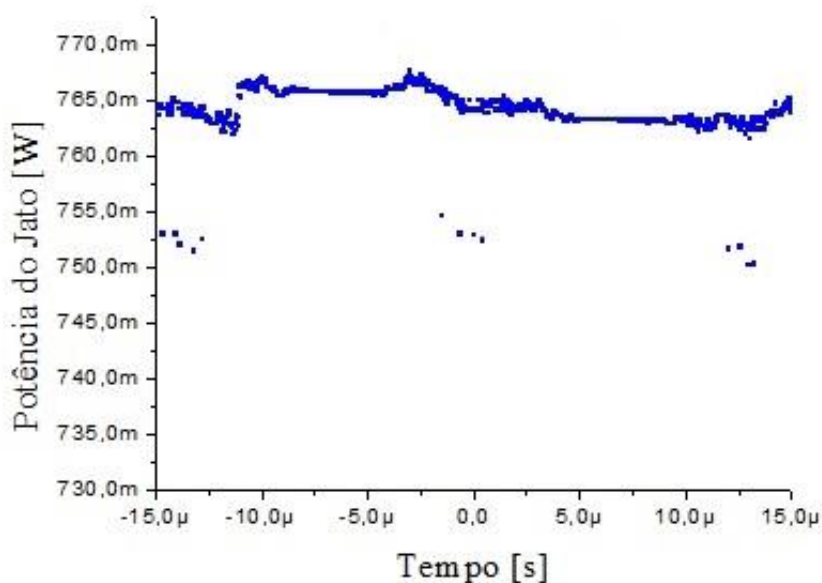
Figura 26 - Figura de Lissajous suavizada



Fonte: Produção do próprio autor

A potência obtida através da análise computacional da figura de Lissajous (KAYAMA, 2014) é de, aproximadamente, 765,3mW (Figura 27) para tratamentos realizados seguindo os parâmetros de tensão aplicada ao eletrodo e fluxo de gás descritos na seção anterior.

Figura 27 - Curva da potência aplicada ao longo do período



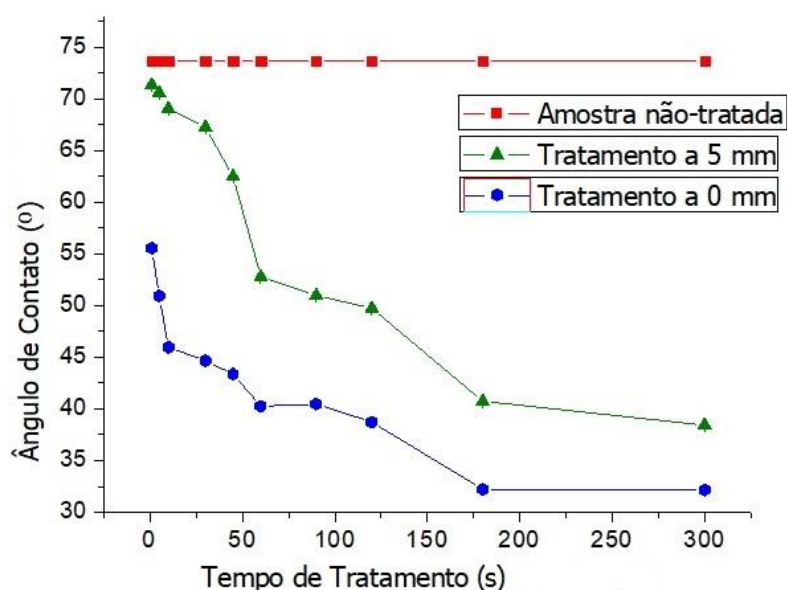
Fonte: Produção do próprio autor

4.2 CURVAS DE ÂNGULO DE CONTATO OBTIDAS COM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DO TRATAMENTO A PLASMA

As curvas apresentadas neste tópico são provenientes dos ensaios realizados, seguindo os procedimentos do item 3.2.1 deste trabalho, onde foram variados parâmetros do processamento a plasma, com a finalidade de estudar como o ângulo de contato da superfície do substrato se comporta com o tratamento realizado. Para melhor comparação de resultados as curvas são traçadas juntamente com uma envoltória de referência obtida através da medição do ângulo de contato em diversos pontos de diferentes amostras não-tratadas de FR4.

A Figura 28 mostra como o tempo do tratamento a plasma influencia no ângulo de contato da superfície do substrato. Este resultado foi obtido variando o tempo de tratamento no qual as amostras são submetidas. O ensaio foi realizado utilizando distâncias de 0 mm e 5 mm da extremidade do jato de plasma.

Figura 28 - Curva obtida variando o tempo de tratamento a plasma

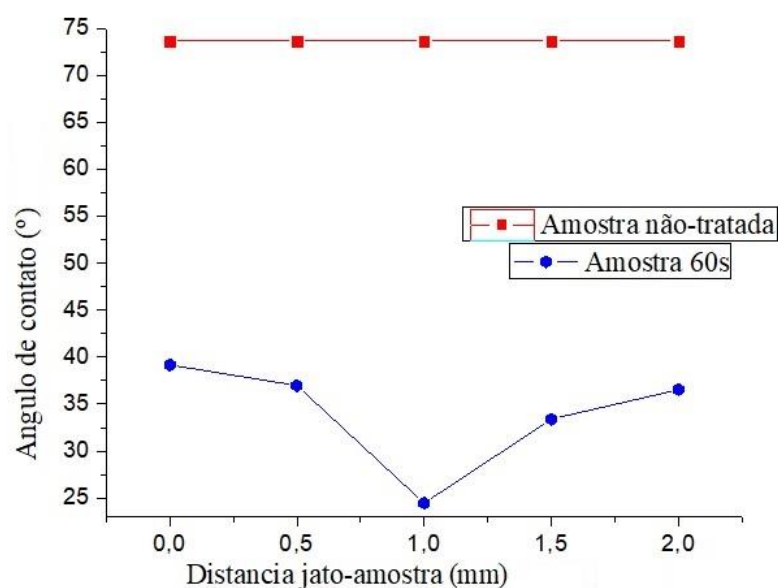


Fonte: Produção do próprio autor

O ângulo de contato para a amostra não tratada foi de 75°. É notável pela Figura 4.5 uma diminuição do ângulo de contato logo com 1 segundo de tratamento. Essa diminuição é mais acentuada na amostra tratada a 0 mm da ponta do jato, sendo da ordem de 55°. Também é possível observar que o processo chega a um estado de saturação após, aproximadamente, 2 minutos de tratamento, diminuindo o ângulo de contato para 43° para amostras a 5 mm do jato e 33° para amostras a 0 mm da extremidade do jato.

A Figura 29 apresenta a variação do ângulo de contato a medida que se adentra a amostra no jato de plasma. O ensaio foi feito para no máximo 2 mm de distância para dentro do jato para evitar que a amostra toque o capilar, podendo danificar o equipamento.

Figura 29 - Curva obtida variando o tempo e a distância entre a superfície da amostra e a extremidade do jato

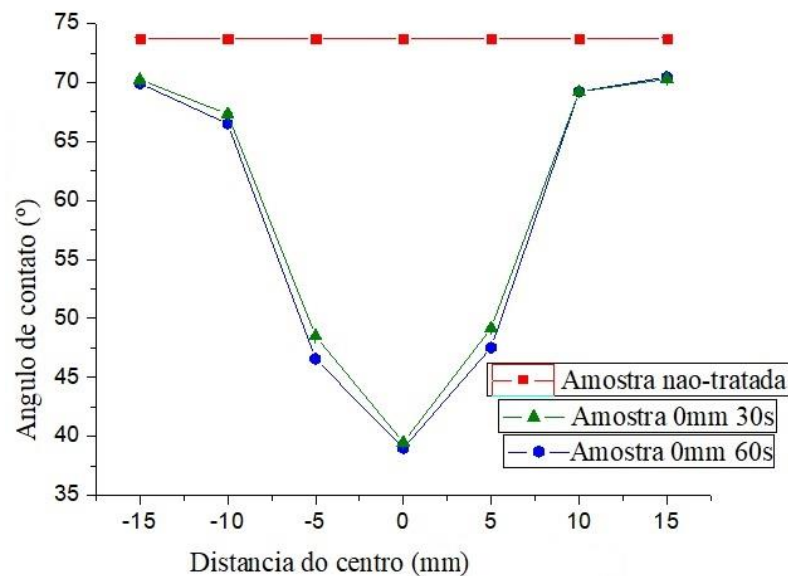


Fonte: Produção do próprio autor

A curva obtida mostra a existência de uma distância jato-superfície específica na qual o tratamento apresenta uma maior diminuição do ângulo de contato, o que torna a superfície mais propícia de ser trabalhada. Esta distância é de, aproximadamente, 1 mm da extremidade da amostra, adentrado o jato. Isto se deve a distribuição energética ao longo do jato do plasma o qual apresenta uma região de maior energia e, conseqüentemente, uma melhoria no resultado do tratamento.

Na Figura 30 tem-se o resultado do ensaio de mapeamento de área de ação do tratamento. Esse ensaio foi feito com a finalidade de se conhecer, por exemplo, qual seria a distância de passo de varredura, em um processo industrial desta natureza.

Figura 30 - Curva obtida medindo o ângulo de contato em pontos afastados do centro do tratamento

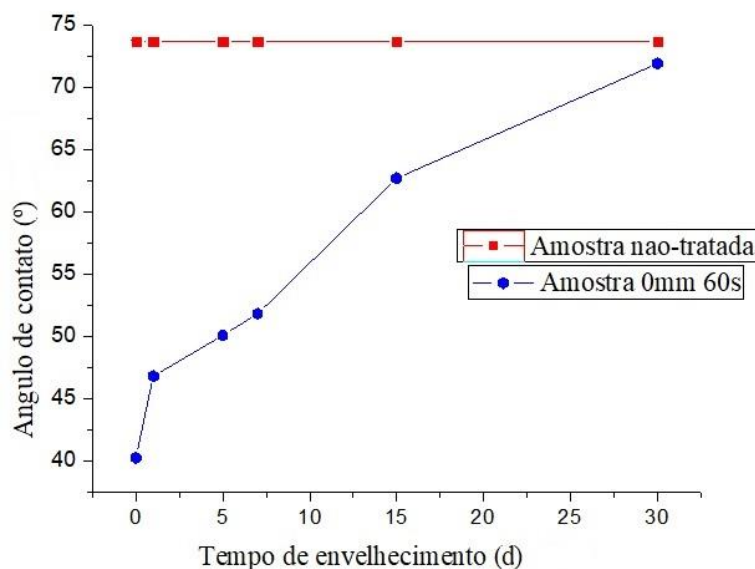


Fonte: Produção do próprio autor

A curva mostra que o ângulo de contato aumenta a medida que se afasta do centro do tratamento. No centro o valor é de 40° e a 5 mm este valor aumenta para aproximadamente 50°. A 10 mm o valor é de aproximadamente 65°, próximo ao valor da superfície não tratada, assim é possível considerar que, no caso, um passo de 2,5 mm seja uma distância ao qual o tratamento não perderia eficácia.

Por fim, a Figura 31 apresenta o ensaio de envelhecimento (*aging*) do processo feito no substrato. Esta curva foi feita com intuito de se estudar a vida útil do tratamento.

Figura 31 - Curva do ângulo de contato medido ao longo de um mês



Fonte: Produção do próprio autor

A curva mostra que, logo um dia após o tratamento, o ângulo de contato regride bastante, se elevando em 10°. Já após 30 dias, o ângulo de contato da amostra tratada já coincide, praticamente, com o da amostra não-tratada.

Este resultado justifica o fato de que, em um processo industrial, a PCI processada a plasma seja, imediatamente, submetida ao passo seguinte da fabricação, sem tempo de estocagem, pois assim a eficácia do processo é mais assegurada, garantindo um melhor resultado no produto final.

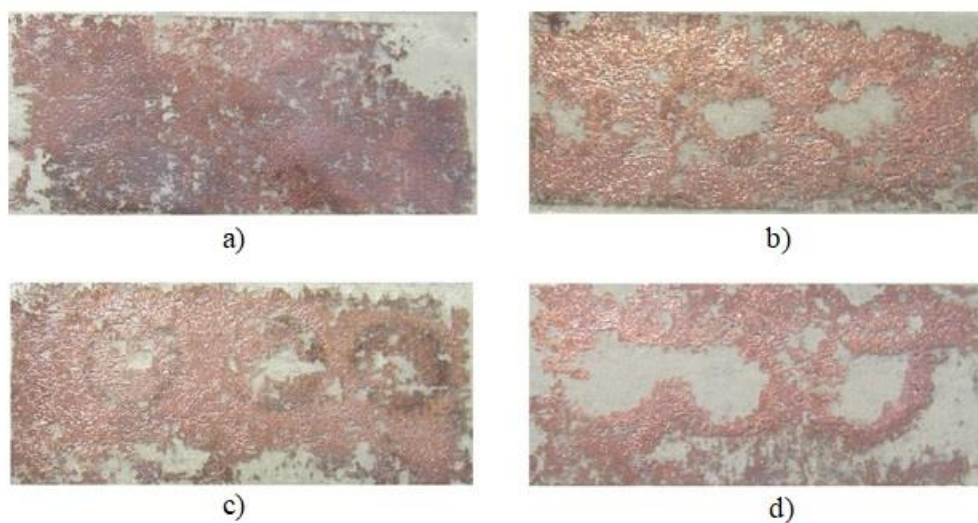
4.3 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ADESÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos testes de adesão feitos em amostras não-tratadas e amostras tratadas com diferentes tempos, como explicados na seção 3.4.

4.3.1 Resultados para tratamentos pontuais

As Figuras 32 (a), (b), (c) e (d) apresentam o resultado obtido após a remoção da fita de adesão de uma amostra não tratada, uma tratada durante um minuto, uma tratada por dois minutos e outra tratada por três minutos respectivamente, em pontos ao longo da reta horizontal que passa pelo centro da amostra.

Figura 32 - Resultados do tratamento pontual: (a) não – tratado; (b) 1 minuto; (c) 2 minutos; (d) 3 minutos



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que o cobre depositado nas regiões tratadas a plasma não foi removido pela fita adesiva, deixando, portanto, os pontos correspondentes sem cobre na fita, como mostrado nas imagens. Isto indica que a adesão do cobre nesses pontos foi melhorada. A Figura 33 mostra outro teste pontual feito, utilizando-se pontos não alinhados, para evitar falsos-positivos do teste anteriormente apresentado.

Figura 33 - Resultado obtido pela remoção da fita adesiva de uma amostra tratada em pontos não alinhados



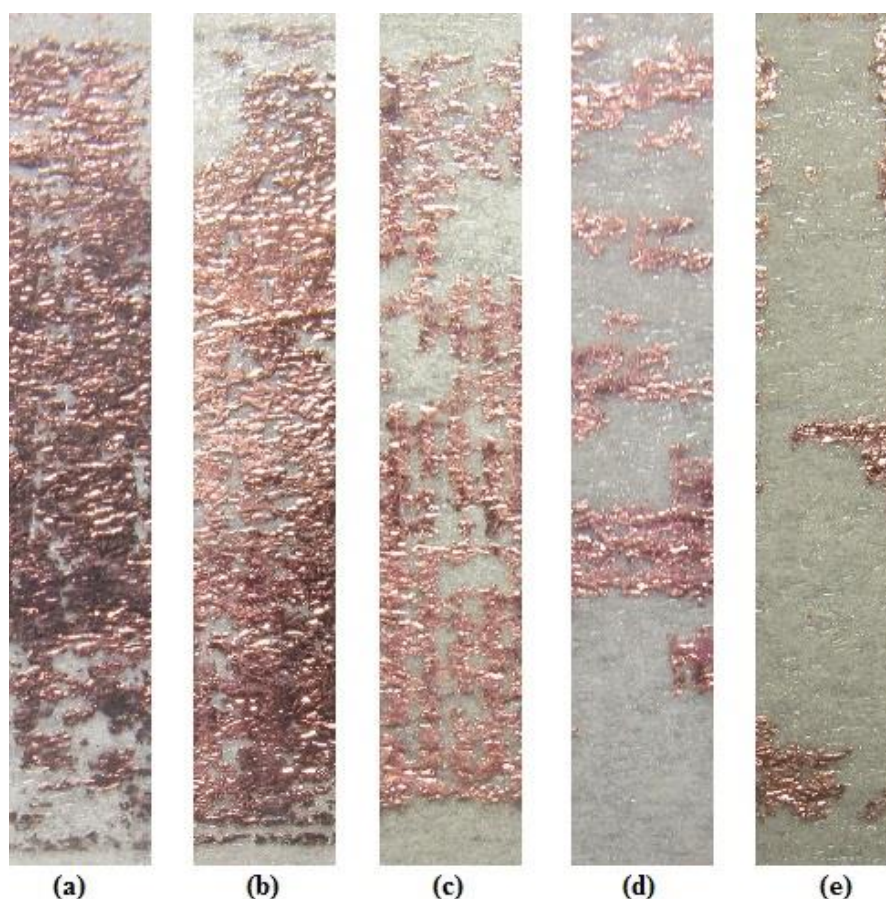
Fonte: Produção do próprio autor

Novamente, é notável a ausência de cobre na fita nos pontos tratados da amostra, comprovando assim a eficácia do processamento a plasma.

4.3.2 Resultados para tratamentos em linha contínua (varredura)

As Figuras 34 (a), (b), (c), (d) e (e) apresentam os resultados obtidos após a remoção da fita adesiva, em áreas iguais, em amostras onde foram feitos tratamentos em varredura conforme o item 3.4.2, em uma faixa vertical que passa pelo centro da amostra.

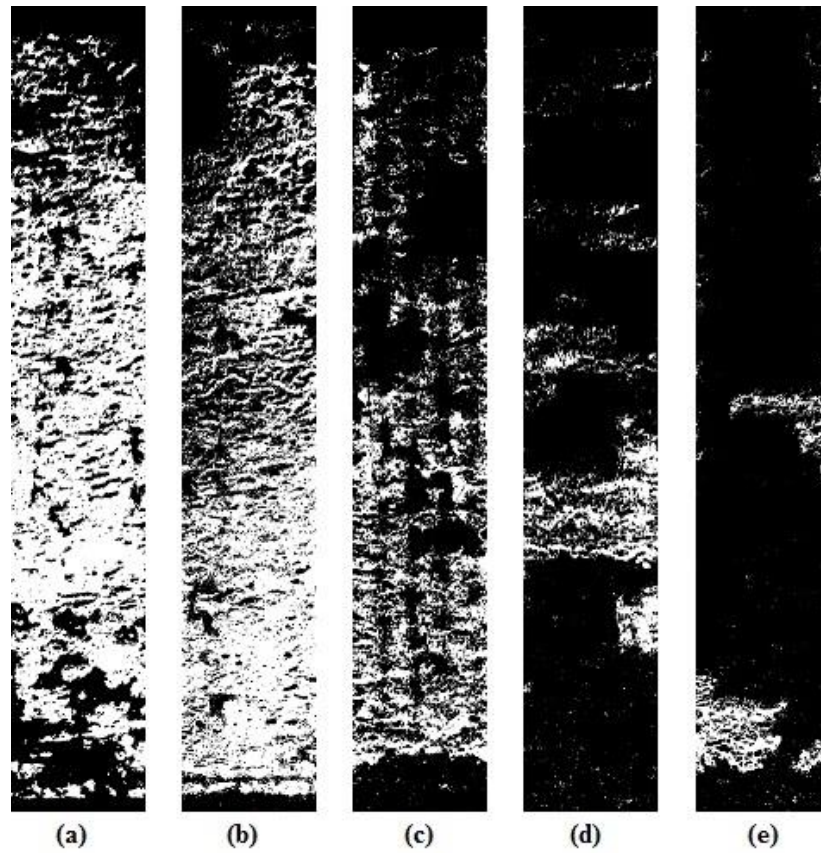
Figura 34 - Resultados do tratamento em linha contínua (varredura): (a) não – tratado; (b) 1 minuto; (c) 2 minutos; (d) 3 minutos; (e) 4 minutos



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se um aumento consistente na área de fita que não contém cobre removido a medida que o tempo de tratamento é aumentado. As Figuras 35 (a), (b), (c), (d) e (e) mostram as imagens processadas por um filtro binário, onde as regiões pretas representam a área onde o cobre não foi removido.

Figura 35 - Seleção utilizada para área onde o cobre não foi retirado: (a) não – tratado; (b) 1 minuto; (c) 2 minutos; (d) 3 minutos; (e) 4 minutos

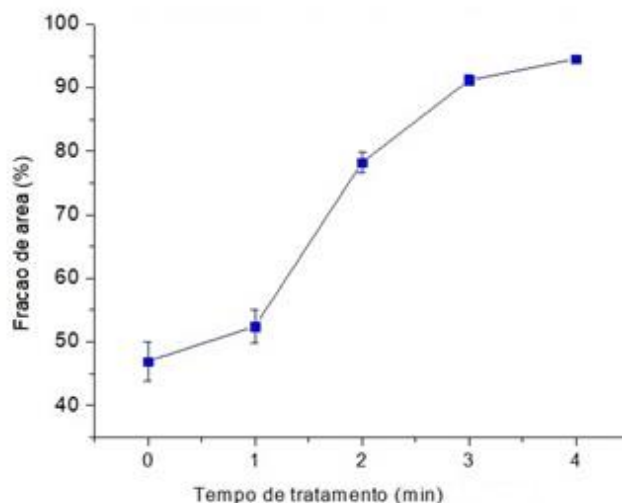


Fonte: Produção do próprio autor

A partir destas imagens, foi calculada a fração de área não removida, como mostra a equação (1) e feita a curva de fração de área em função do tempo de tratamento, apresentada na Figura 36. Na equação apresentada, α é a fração de área metalizada do substrato, A_m é a área onde a camada metálica não foi removida do substrato e A_t é a área tratada por plasma. O eixo vertical do gráfico apresenta a razão entre área da fita adesiva sem cobre removido (pois este não foi removido no ensaio de adesão) pelo tamanho de área padrão de 20 mm x 3,5 mm, utilizado no processamento da imagem.

$$\alpha = \frac{A_m}{A_t} \quad (1)$$

Figura 36 - Curva obtida da fração de área para diferentes tempos de tratamento



Fonte: Produção do próprio autor

À medida que o tempo de tratamento é aumentado, tem-se um grande acréscimo na área de cobre não removido da amostra. Isso aponta uma grande melhoria na adesão do cobre na superfície do substrato de fibra de vidro devido ao tratamento superficial por jato de plasma.

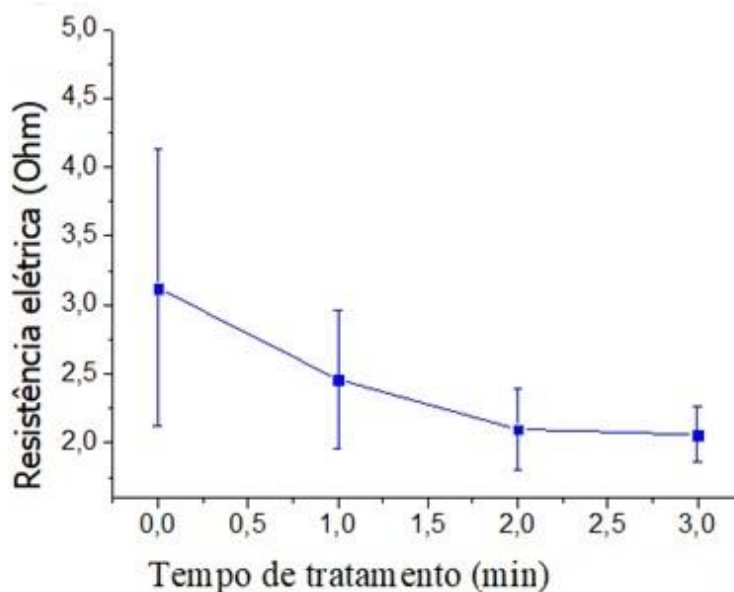
4.4 RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES DOS FUROS METALIZADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos ensaios de condutividade elétrica dos furos metalizados e análises feitas nas amostras embutidas.

4.4.1 Resultados dos ensaios de condutividade elétrica entre as faces metalizadas

Os resultados obtidos medindo-se a resistência elétrica entre as faces da amostra em regiões isoladas, como descrito no procedimento 3.4.3.1, são apresentados na Figura 37 onde os pontos correspondem ao valor médio e as linhas verticais ao desvio padrão. Os resultados já são apresentados com a resistência residual proveniente das pontas de prova do multímetro ($0,3 \Omega$) descontadas.

Figura 37 - Valores de resistência obtidos entre as faces das amostrados perfuradas



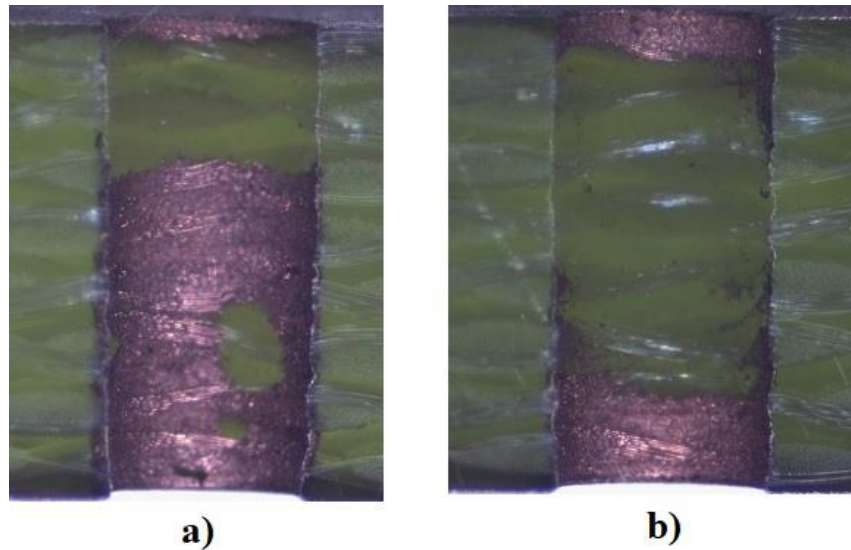
Fonte: Produção do próprio autor

É notável que existe a conexão elétrica entre as faces, mostrando que a metalização do orifício ocorreu com sucesso, com valores de resistência elétrica em torno de $2,2 \Omega$. Também nota-se uma diminuição no desvio padrão em amostras que passaram pelo tratamento a plasma bem como o efeito do tempo de tratamento.

4.4.2 Microscopia óptica da superfície dos furos metalizados

A microscopia da parede dos furos metalizados foi realizada no intuito de consolidar o resultado obtido no ensaio de condutividade elétrica e observar as diferenças entre a metalização sem tratamento a plasma e a com tratamento a plasma. Os furos foram preenchidos com resina acrílica e a imagem do seu corte transversal é apresentada na Figura 38 para furos metalizados sem tratamento. A imagem foi obtida utilizando um equipamento Zeiss Stemi 2000.

Figura 38 - Paredes de furos metalizados sem tratamento a plasma

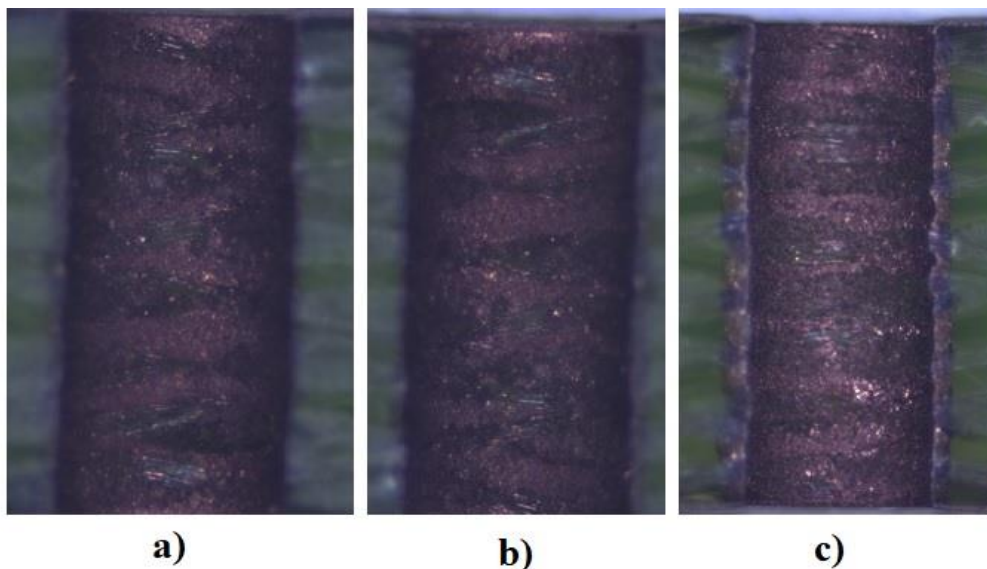


Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se falhas na continuidade da metalização nos furos. Estas falhas comprometem a qualidade da metalização, podendo acarretar uma má condutividade elétrica e, até mesmo, uma isolamento entre as duas faces da placa de circuito impresso.

A mesma imagem foi feita para furos tratados com plasma durante um, dois e três minutos, como mostra as Figuras 39 a), b) e c), respectivamente.

Figura 39 - Furos metalizados após tratamento a plasma. a) 1 min; b) 2 min; c) 3 min



Fonte: Produção do próprio autor

As paredes dos furos tratados e metalizados possuem camadas de cobre mais uniforme e livre de falhas, comprovando a melhoria na aderência e uniformidade que o tratamento a plasma traz para metalização de furos passantes.

Com um tempo de tratamento menor, ainda é possível ver, levemente, o reforço da fibra atrás da camada de cobre. Ao passo que o tempo de tratamento é aumentado, essas marcas ficam mais discretas.

5 CONCLUSÕES

A introdução de tratamento a plasma atmosférico em substratos de fibra de vidro FR4, como melhoria do processo de metalização de placas de circuito impresso, apresentou ótimos resultados desde seus primeiros ensaios. O ângulo de contato da superfície do material mostrou grande alteração ao ser processado pelo plasma, um decréscimo do ângulo de contato de 75° para 45° para uma média de tempo de 1 minuto, o que comprova que a superfície se tornou mais hidrofílica, o que a torna mais propícia à metalização.

O raio de ação do tratamento também se mostrou muito satisfatório, apresentando uma média de 2,5 mm de raio útil. Dimensão essa que o torna mais que o suficiente para tratar a maioria dos orifícios de PCI utilizados na indústria eletrônica. O envelhecimento do tratamento acontece a curto prazo, por volta de um dia, com ângulo de contato variando de 40° para 48°.

Os ensaios de adesão em superfície também apresentaram resultados excelentes. Foi verificado por teste padrão um aumento da adesão da metalização química com o tempo de tratamento.

Em tratamento de furos passantes com diâmetro 0,5 mm em placas de espessura 1,5 mm a metalização química mostrou continuidade em medições preliminares de continuidade elétrica. Estas medições indicaram uma redução na resistência entre as extremidades do furo com o tempo de tratamento a plasma. Este efeito do tratamento foi verificado por microscopia óptica, onde é notável diversas falhas na metalização sem tratamento, enquanto os furos metalizados após o tratamento apresentavam uma camada uniforme e livre de falhas, como o desejado.

Desta forma, conclui-se que o tratamento a plasma na pressão atmosférica é uma técnica que traz melhorias no processo de metalização de placas de circuito impresso, tanto em superfícies planas quanto em superfície de paredes de furos.

Estes resultados são importantes para este ramo da indústria, que cada vez mais vêm substituindo processos químicos por processos a plasma no intuito de reduzir a produção de resíduos nocivos, tornando a linha de produção mais qualificada, o ambiente fabril mais seguro e a fabricação de equipamentos eletrônicos mais amigável ao meio ambiente.

Furos metalizados e processamento de substrato de Teflon para indústria eletrônica são os grandes desafios deste ramo na atualidade. Como sugestão de trabalhos futuros recomenda-se a investigação dos resultados deste tipo de tratamento nos substratos de Teflon. Outra sugestão é utilizar uma mistura de gases para fazer o jato de plasma. Utilizando o argônio

como gás de arraste e um gás reativo combinado, como o oxigênio, espera-se aumentar a ativação da superfície tratada, melhorando ainda mais as características de adesão desejadas. Por fim, também é sugerido como trabalho posterior, realizar processos após a metalização química, como a eletro-deposição para aumento e controle de espessura de camada, para que, desta forma, seja possível avaliar, também, o efeitos do tratamento a plasma na pressão atmosférica em etapas futuras da fabricação de uma placa de circuito impresso.

REFERÊNCIAS

ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-2251: design guide for the packaging of high speed electronic circuits**. Northbrook, 2003.

ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-TCM-650: Test methods manual: adhesion, tape testing**, Northbrook, 2004. 1

AVERY, J. M; MOLEUX, P. G. Process waste minimization and treatment. In: COOMBS, C F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.

BERLIN, A; LOEFFLER, C; SELESTAK, D. **Plasma prior to conformal coating virtually eliminated PCBA adhesion problems**. Concord: Nordson, março, 2016.

CAMILO, E. **Propostas de design de layout da PCI para redução de curto circuito de solda a onda, para processo de montagem de placa eletrônica**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Unicamp - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

CARANO, M. Optimization of acid copper electrodeposition processes for high-throwing power DC plating. **The Pcb Magazine**, Seaside, v. 5, n. 5, p.8-20, may 2015. Disponível em: <<http://pcb.iconnect007.com/index.php/article/90484/optimization-of-acid-copper-electrodeposition-processes-for-high-throwing-power-dc-plating/90487/?skin=pcb>>. Acesso: 5 mar, 2017

CHAPMAN, B. **Glow discharge processes: sputtering and plasma etching**. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1980.

CONAGHAN, B F. Imaging. In: COOMBS, C F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.

DOW, W. P. Through hole plating. In: KONDO, K. **Copper electrodeposition for nanofabrication of electronics devices**. New York: Springer, 2013.

ESENA, P. et al. Surface modification of pet film by DBD device at atmospheric pressure. **Surface & Coatings Technology**, Garmisch-Partenkirchen, v. 200, n. 1-4, p. 664-667, may 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.188>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

EUROCIRCUITS. **Plating**. Disponível em: <<https://www.eurocircuits.com/plating/>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

GETTY, J. D. **How plasma-enhanced surface modification improves the production of microelectronics and optoelectronics**. Nordson MARCH Technical Forum, 2002

GURIAN, M I. Etching process and technologies. In: COOMBS, C F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-hill Handbooks, 2008.

HARRY, J. E. **Introduction to plasma technology**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2010.

HOLDEN, H. T. Introduction to high-density interconnection (HDI) technology. In: COOMBS, C. F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.

HOLMBOM, G.; JACOBSSON, B.E.. Through-hole plating of Cu by modulated current deposition. **Surface and coatings technology**, Linköping, v. 35, n. 3-4, p.333-341, nov. 1988. Disponível em <[http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(88\)90046-1](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(88)90046-1)>. Acesso em: 24 nov. 2017.

HOWIE, J. **Via**. Disponível em: <[http://www.altium.com/documentation/16.0/display/ADES/PCB_Obj-Via\(\(Via\)\)_AD](http://www.altium.com/documentation/16.0/display/ADES/PCB_Obj-Via((Via))_AD)>. Acesso em: 5 jun. 2017.

HUSCHKA, M. **The use of PTFE/woven glass base material in the PCB industry**. 1998. Disponível em: <https://www.4taconic.com/uploads/ADD_Technical_Articles/1453224767_The_Use_of_PTFE_Base_Materials_Technical_Article.pdf>. Acesso em: 19 maio 2017.

IKARI, S. Improvement of copper plating adhesion of PPE printed wiring board by plasma treatment. **Surface & Coatings Technology**, Tokyo, v. 202, n. 22, p.5583-5585, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897208005094>>. Acesso em: 11 nov. 2016

IMAGEJ – Image Processing and Analysis in Java. **ImageJ user guide**. Disponível em: <<http://imagej.nih.gov/ij/download.html>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

IORDACHE, Octavian. **Evolvable designs of experiments: applications for circuits**. Weinheim: Verlag GmbH & Co., 2009.

ISOLA-GROUP. FR408 **High performance laminate and prepreg**. 2012. Disponível em: <<http://www.prototron.com/documents/materials/FR408.pdf>>. Acesso em: 7 jan. 2017.

KANG, J. G. et al. Development of the RF plasma source at atmospheric pressure. **Surface & coatings technology**, Jeju Island, v. 171, n. 1-3, p.144-148, 1 jul. 2003. Disponível em: <http://www.surfxttechnologies.com/fileaway-directory/full/135.%20Development%20of%20the%20RF%20plasma%20source%20at%20atmospheric%20pressure%2C_.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2017.

KAYAMA, M.E. et al. Characteristics of a needle-disk electrodes atmospheric pressure discharges applied to modify PET wettability, **IEEE transactions on plasma science**, Santa Fe: v. 45, n. 5, p. 843-848, 3 abr. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7891623/>>. Acesso em: 29 jan. 2017.

KELLEY, E. J. Introduction to base materials. In: COOMBS, C. F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.

KOGELSCHATZ, U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics and industrial applications, **Plasma chemistry and plasma processing**, Switzerland: v.23, n.1, p.

1-46, mar 2003. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022470901385> >. Acesso em: 15 nov. 2016.

KURIHARA, Y et al. Improvement of adhesion and long-term adhesive reliability of liquid crystalline polyester film by plasma treatment. **Journal of applied polymer Science**, Okayama, v. 108, n. 1, p.85-92, 5 abr. 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.27537> > Acesso em: 20 jun. 2017

LARAIA, A. B.; HONDA, R.Y.; KAYAMA, M.E. Switching voltage converter for plasma device. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE VÁCUO NA INDÚSTRIA E NA CIÊNCIA (CBRAVIC), 36, 2015, Vitória. **Anais...** Vitória: SBV, 2015.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blücher.2006

LU, X; LAROUSSI, M; PUECH, V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets, **Plasmas sources science and technology**, Wuhan: vol.21, n. 3, p.1-17, 16 abr. 2012. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0963-0252/21/3/034005/pdf> >. Acesso em: 1 nov. 2016

MELO, P. R. S; GUTIERREZ, R. M. V; ROSA, S. E. S. **Complexo eletrônico: o segmento de placas de circuito impresso**. 1998. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2186/1/BS_07_Complexo_eletrônico_o_segmento_de_placas_de_circuito_P.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2017.

MICROPRESS - CIRCUITOS IMPRESSOS. **Tabela comparativa de laminados para circuito impresso**. 2018. Disponível em: <<http://www.micropress.com.br/comparacao-de-laminados/>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

GBS Elektronik. **Minipuls 6**. Disponível em:<[http://www.gbs-elektronik.de/fileadmin/download/datasheets/minipuls6_e](http://www.gbs-elektronik.de/fileadmin/download/datasheets/minipuls6_e.pdf)>.pdf. Acesso em: 15 mar. 2015.

NAKAHARA, H. Types of printed wiring boards. In: COOMBS, C F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.

NIST - National institute of Standart and Technology. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/ie.pl>>.Acessoem: 20 mar. 2015.

NOBLE, D. The history of land-mobile radio communications, **Proceedings of the IRE**, Phoenix: vol. 50, n. 5, p. 1405–1414, mai. 1962. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4066864/>>. Acesso em: 28 jul. 2017

PETASCH, W et al. Low-pressure plasma cleaning: a process for precision cleaning applications. **Surface And Coatings Technology**, Kirchheim: v. 97, n. 1-3, p.176-181, dez. 1997. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00143-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00143-6)>. Acesso em: 30 dez. 2016.

PLASMAETCH. **Plasma Applications**. Disponível em: <<http://www.plasmaetch.com/plasma-applications.php>>. Acesso em: 11 jun. 2016.

POLIFLUOR. **Teflon**. Disponível em: <<http://www.polifluor.com.br/pdf/certificado-teflon.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2017.

RITCHEY, L W. Physical characteristics of the PCB. In: COOMBS, C F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.

ROTH, J.R. **Industrial plasma engineering**. Londres: British Library, 1995.

SHI, J.J. E KONG, M.G., Mechanisms of the α and γ modes in radio-frequency atmospheric glow-discharges, **Journal of Applied Physics**, Melville: v. 97, n.2, 27 dez. 2004. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1834978>>. Acesso em: 5 nov. 2016.

VANDERVELDE, H. Drilling process. In: COOMBS, C F. **Printed circuits handbook**. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.

ANEXO A – MATERIAIS

A.1 ARGÔNIO

O Argônio (Ar) possui número atômico $Z=18$, energia de ionização é 15,75 eV e sua configuração eletrônica é $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. É o mais abundante membro da família dos gases nobres. Esse gás é monoatômico e caracterizado por sua extrema inatividade química. O argônio é incolor, inodoro, não inflamável, não tóxico, insípido e ligeiramente solúvel em água. Ele normalmente é transportado em cilindros de aço acondicionado a uma pressão de 200 bar à 21,1°C. Apresenta condutividade térmica de cerca de 0,018 W/(m*K) quando gás à 101,325 kPa e a 26,85 °C e massa molar de 39,95 g/mol (NIST, 2015).

A.2 FR4

O FR4 tem sido considerado o material padrão para alto desempenho em placas de circuito impresso. Composto por fibra de vidro e resina epóxi, a natureza resistente ao fogo deste componente tornou-o muito popular para aplicações que necessitem alto isolamento elétrico, bem como bom desempenho mecânico mesmo em ambientes adversos. A Tabela 5 abaixo apresenta algumas propriedades do FR4.

Tabela 5 - Propriedades de um FR4 comercial típico.

<i>Características</i>	<i>Valores</i>	<i>Especificação (para IPC-TM-650)</i>
Resistência a soldagem a 288 °C [min]	15	-
Rigidez dielétrica [kV/mm]	55	>30
Constante dielétrica para 100 MHz (Dk)	3,69	< 5,4
Constante dielétrica para 5 GHz (Dk)	3,66	-
Fator de perda para 100 MHz (Df)	0,0094	< 0,035
Fator de perda para 5 GHz (Df)	0,0127	-
Resistência a flexão longitudinal [N/mm ²]	560	-
Resistência a flexão transversal [N/mm ²]	440	-

Fonte: ISOLA-GROUP(2012).

A fibra de vidro é um tipo de fibra obtido pelo processo de fundição do vidro que, após ser fundido, atravessa uma fieira, onde são produzidas as fibras. Após o processo de fiação, as fibras são recobertas com um material de encimagem. A fibra de vidro se caracteriza pelo seu baixo custo, sua alta resistência à tração, e a grande inércia química. (LEVY NETO; PARDINI, 2006)

As resinas epóxi são uma classe de resinas termorrígidas de alto desempenho, e que possui uma grande variedade de aplicações, podendo ser usada como resinas de laminação, adesivos, selantes, tintas, vernizes, entre outras aplicações. Elas podem ser definidas como todas aquelas em que as ligações químicas ocorrem através de grupos de radicais epóxi, que são o centro da reação. Sua conversão em uma resina termofixa ocorre através do processo de polimerização pela adição de um endurecedor que, uma vez adicionado, inicia uma reação irreversível de ligação de moléculas.

A.3 TEFLON

O Politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon™, e a família dos fluoroplásticos caracterizam-se por excelentes propriedades dielétricas e resistência química, baixo coeficiente de atrito e excepcional estabilidade em elevadas temperaturas, resistência mecânica baixa ou moderada.

Estes materiais são resinas termoplásticas que tiveram alguns ou todos os seus hidrogênios substituídos por átomos de flúor (POLIFLUOR, 2017). A Tabela 6 abaixo apresenta algumas propriedades do PTFE.

Tabela 6 - Propriedades de um PTFE comercial típico.

<i>Características</i>	<i>Valores</i>
Rigidez dielétrica [kV/mm]	50 a 80
Constante dielétrica para 10 GHz (Dk)	2,1
Fator de perda para 10 GHz (Df)	0,0035
Resistência a ruptura [N/mm ²]	De 19,6 a 39,2
Tensão limite de flexão [N/mm ²]	De 17,6 a 19,6
Densidade [g/cm ³]	2,15 a 2,18

Fonte: POLIFLUOR(2017); Huschka(1998).

No final da década de 90, o TeflonTM era considerado muito difícil de ser processado e assim possuía aplicações restritas, sendo apenas aplicados em pequenas quantidades e em situações específicas. (HUSCHKA, 1998).

O Teflon é muito usado como camada não aderente para aplicações comerciais devido a sua estrutura molecular inerte. Sua utilização na indústria de placas de circuitos impressos para eletrônica era um desafio a ser vencido, pois sua propriedade anti-aderente impossibilitava o processo de metalização e de impressão do layout do circuito elétrico no substrato.

Com a vinda das câmaras de plasma para o processo de etching das placas, o processamento do Teflon para aplicações eletrônicas se tornou economicamente viável e ambientalmente seguro de ser utilizado em âmbito industrial, o que alavancou também a indústria de câmaras a plasma para tratamento.

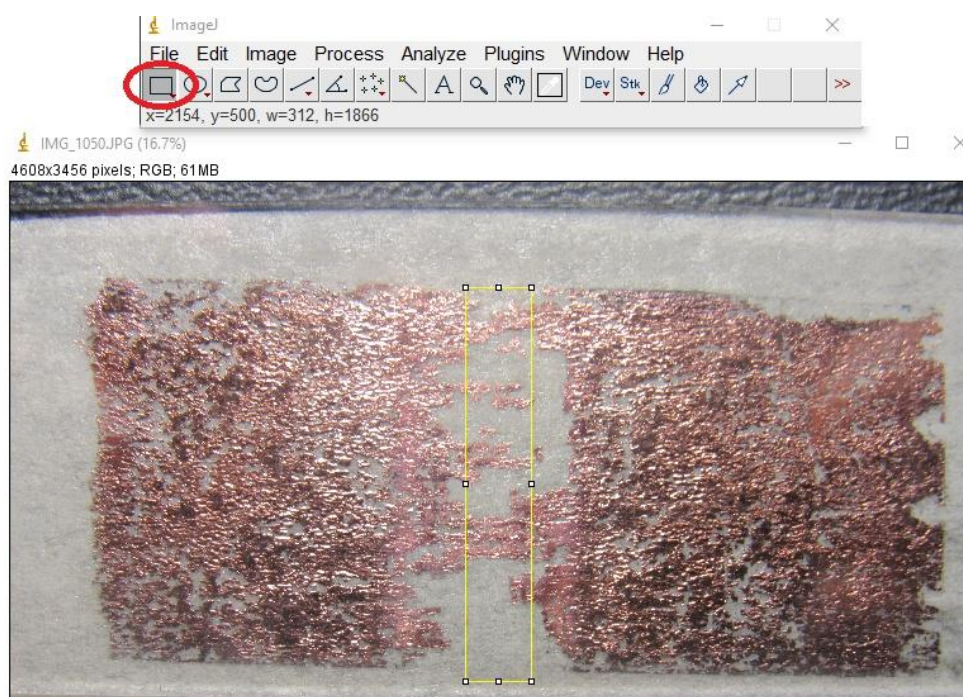
Atualmente existem grande quantidade de substratos tendo como elemento básico o PTFE, com características específicas para aplicações em RF e microondas.

APÊNDICE A – MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE ÁREA COM O *IMAGEJ*

Para realizar a medição da fração de área com o software ImageJ, primeiramente, inicia-se o *software* e abre-se o arquivo de imagem que se deseja analisar em *File > Open*.

Em seguida, define-se um tamanho de área padrão para medição de todas as amostras. Para tanto, utiliza-se a ferramenta de seleção *Rectangle*, localizada na barra de seleção, como mostrado na Figura 40 sendo selecionada a área de análise desejada. Por fim, deve-se salvar o tamanho da seleção no menu *File > Save As > Selection*.

Figura 40 – Criação da área de seleção a ser analisada no *ImageJ*

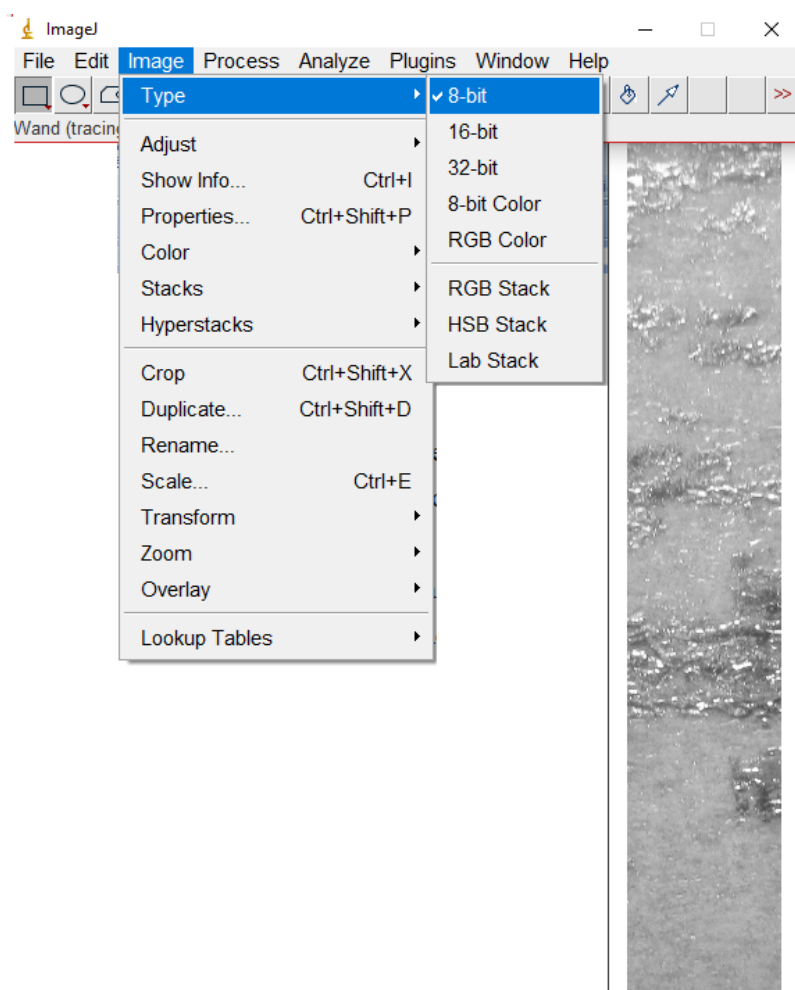


Fonte: Produção do próprio autor

Com a área de seleção definida, é necessário clicar com o botão direito dentro da área escolhida e escolher a opção *Duplicate*, e uma nova imagem, com a área dentro da seleção será gerada.

Com a nova imagem criada, o próximo passo é transformá-la em uma imagem de *8-bits*, para isso, é necessário clicar em *Image > Type > 8-bit*, e a imagem irá ficar como o apresentado na Figura 41.

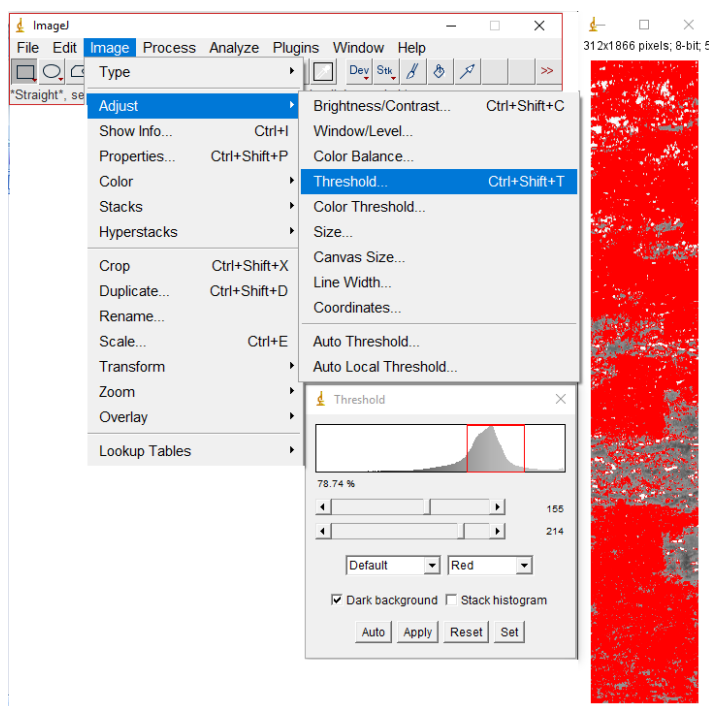
Figura 41 – Conversão do corte da imagem para 8-bits



Fonte: Produção do próprio autor

Em seguida, o limiar de seleção deve ser criado, para diferenciar o cobre removido e o fundo da fita adesiva na imagem, para tanto, deve-se clicar em *Image>Adjust>Threshold*, e na janela de seleção escolhe-se os limites para cobre e fita adesiva com auxílio do histograma.

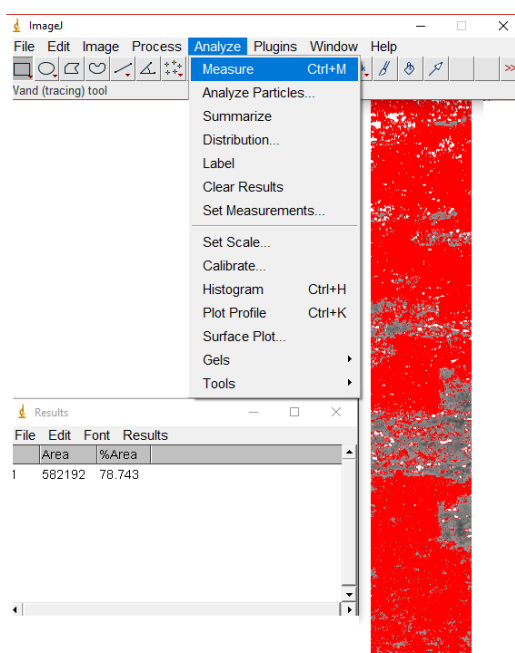
Figura 42 – Janela de seleção de limiar da imagem



Fonte: Produção do próprio autor

Para finalizar a análise, deve-se clicar em *Analyze>Measure* e uma janela será aberta com o tamanho de área definida pela seleção retangular, em pixels, e a porcentagem de área selecionada através do limiar, como apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Janela de medições



Fonte: Produção do próprio autor