

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS
TECNOLOGIA EM MICROELETRÔNICA

FELIPE DAMASCENO VIEIRA

CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DE UM REATOR DE DESCARGA DE BARREIRA
DIELÉTRICA (DBD)

São Paulo

2024

FELIPE DAMASCENO VIEIRA

CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DE UM REATOR DE DESCARGA DE BARREIRA
DIELÉTRICA (DBD)

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em
Microeletrônica da Faculdade de Tecnologia de São
Paulo como requisito para a obtenção do título de
Tecnólogo em Microeletrônica.

Orientador: Prof. Roberto Katsuhiro Yamamoto

São Paulo

2024

Agradecimento

Agradeço a Deus por ter me guiado e sustentado ao longo desta jornada acadêmica. Sem sua graça e misericórdia, certamente não teria alcançado este momento tão significativo em minha vida.

Agradeço minha família por todo o apoio e incentivo que recebi durante toda minha jornada acadêmica.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu professor e orientador, Roberto Katsuhiko Yamamoto, pela sua orientação, paciência e incentivo ao longo de todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência, conhecimento e dedicação foram fundamentais para que eu pudesse desenvolver o trabalho. Agradeço por sua disponibilidade em tirar minhas dúvidas, pelos conselhos valiosos, e pelos desafios que me ajudaram a crescer como estudante e como pessoa.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao auxiliar de docente Filipe de Oliveira Pereira Delboni pela sua inestimável ajuda e orientação durante minhas atividades no Laboratório de Processos e Dispositivos (LPD) da FATEC-SP. Sua experiência, paciência e disponibilidade foram fundamentais para que eu pudesse realizar minhas atividades de forma eficiente e segura.

Gostaria de agradecer ao Gabriel de Almeida Filgueira por sua ajuda inestimável em responder às minhas dúvidas e pela fabricação da proteção do sensor de umidade desenvolvida nos laboratórios do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos os professores e à minha faculdade por sua dedicação e contribuição inestimáveis à minha formação acadêmica. Cada um de vocês desempenhou um papel importante no meu sucesso e crescimento pessoal, compartilhando seu conhecimento, sabedoria e experiência. Eu aprendi tanto com vocês e sou grato por cada momento em que pude absorver a sabedoria de vocês.

“Faça o teu melhor, nas condições que você tem,
enquanto não tem condições melhores para fazer
melhor ainda.”

Mario Sergio Cortella

RESUMO

Este estudo aborda a aplicação de plasma frio na modificação de superfícies de materiais, com foco em acetato, politereftalato de etileno (PET) e polietileno de baixa densidade (PEBD). Inicialmente, explora-se a origem do conceito de plasma, desde sua identificação por William Crookes em 1879 até a introdução do termo por Irving Langmuir na década de 1920. O trabalho concentra-se na técnica de Descarga de Barreira Dielétrica (DBD) para gerar plasmas sem equilíbrio térmico. Os objetivos incluem a construção de um reator capaz de gerar plasma em pressão atmosférica, visando tratar superfícies de polímeros para melhorar a molhabilidade. A conclusão destaca a eficácia consistente do reator de descarga elétrica de alta tensão nos materiais estudados. Observa-se uma sensibilidade particular do acetato ao tempo de exposição, enquanto o PET revela características distintas de resistência e interação com espécies reativas. O PEBD apresenta respostas complexas, requerendo tempos mais curtos para otimização. A comparação entre os materiais revela comportamentos divergentes, destacando a necessidade de compreensão aprofundada das variáveis experimentais. O estudo evidencia não apenas a eficácia do plasma frio na modificação de superfícies, mas também ressalta a importância da consideração cuidadosa das características dos materiais e das variáveis experimentais para aplicações práticas futuras desses plasmas, por exemplo, em tratamento de superfície.

Palavra-chave: Plasmas Frios, Descarga de Barreira Dielétrica (Dielectric Barrier Discharge), Tratamento de Superfície.

ABSTRACT

This study addresses the application of cold plasma in modifying material surfaces, focusing on acetate, polyethylene terephthalate (PET), and low-density polyethylene (LDPE). Initially, the origin of the plasma concept is explored, from its identification by William Crookes in 1879 to the term's introduction by Irving Langmuir in the 1920s. The work focuses on the Dielectric Barrier Discharge (DBD) technique to generate non-thermally equilibrated plasmas. Objectives include constructing a reactor capable of generating plasma at atmospheric pressure, aiming to treat polymer surfaces to improve wettability. The conclusion highlights the consistent efficacy of the high-voltage electrical discharge reactor in the studied materials. There is a particular sensitivity of acetate to exposure time, while PET reveals distinct characteristics of resistance and interaction with reactive species. LDPE presents complex responses, requiring shorter times for optimization. The comparison between materials reveals divergent behaviors, emphasizing the need for a deep understanding of experimental variables. The study not only demonstrates the effectiveness of cold plasma in surface modification but also underscores the importance of careful consideration of material characteristics and experimental variables for future practical applications of these plasmas, for example, in surface treatment.

Keywords: Cold Plasmas, Dielectric Barrier Discharge (DBD), Surface Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo Atômico de Thomson	11
Figura 2. 5 estados físicos da matéria devido à transferência de energia.	12
Figura 3. Polímero hidrofóbico	14
Figura 4. óculos com e sem tratamento de lentes	14
Figura 5. Esterilização de instrumentos em uma clínica.....	15
Figura 6. Aplicações de Plasma em plantas	15
Figura 7. Representação esquemática do sistema de plasma DBD.....	17
Figura 8. Projeto desenvolvido no tinkercad	18
Figura 9. Arranjo construído.....	18
Figura 10. Máquina de Corte a laser 1080.....	19
Figura 11. Base para amostras 5x5 cm	19
Figura 12. Tubo de acrílico com eletrodo exterior (a) Eletrodo interno (b) e Eletrodo externo (c)	20
Figura 13. Bomba de aquário (a) e rotâmetro (b).....	20
Figura 14 Circuito da Fonte.....	21
Figura 15 Arranjo para fazer a medição da tensão (a) e Print do osciloscópio (b).....	22
Figura 16. Amostras de Acetato.....	22
Figura 17. Amostras de PEBD	23
Figura 18. Amostras de PET	24
Figura 19. Ângulo de contato e suas características	26
Figura 20. Microscópio Digital (a) e dispositivo para fotos (b)	26
Figura 21. Controlador de gotas	27
Figura 22. Controlador de gotas com arranjo feito em 3D.....	27
Figura 23. Arranjo experimental.....	28
Figura 24. Descarga no tubo de acrílico.....	29
Figura 25. Ângulo de contato da amostra Acetato com distância de 0,5cm de distância e tempo de 10 segundos. Figura A) sem tratamento e Figura B com tratamento.....	29
Figura 26. Ângulo de contato da amostra Acetato com distância de 0,5cm de distância e tempo de 10 segundos. Figura A) sem tratamento e Figura B com tratamento.....	30
Figura 27. Variação da distância com tempo fixo de 10 Segundos.	30
Figura 28. Ângulo de contato da amostra Acetato com distância de 0,5cm de distância e tempo de 10 segundos. Figura A) sem tratamento e Figura B com tratamento.....	31
Figura 29. Variação da distância com tempo fixo de 20 segundos.....	31
Figura 30 Variação da distância com tempo fixo de 30 segundos.....	32

Figura 31. Variação da distância com tempo fixo de 40 segundos.....	33
Figura 32. Variação da distância com tempo fixo de 60 segundos.....	33
Figura 33. Variação da distância com tempo fixo de 50 segundos.....	34
Figura 34. Variação da distância com tempo fixo de 120 segundos.....	34
Figura 35. Variação do tempo com distância fixa de 0,5 centímetros.....	35
Figura 36. Variação do tempo com distância fixa de 1 centímetros.....	35
Figura 37. Variação do tempo com distância fixa de 2 centímetros.....	36
Figura 38. Variação da distância com tempo fixo de 10 segundo (PET).	37
Figura 39. Variação da distância com tempo fixo de 20 segundos (PET).....	37
Figura 40. Variação da distância com tempo fixo de 30 segundos (PET).....	38
Figura 41. Variação da distância com tempo fixo de 40 segundos (PET).....	38
Figura 42. Variação da distância com tempo fixo de 50 segundos (PET).....	39
Figura 43. Variação da temperatura com tempo fixo de 60 segundos (PET).	39
Figura 44. Variação da distância com tempo fixo de 120 segundos (PET).....	40
Figura 45. Variação do tempo com distância fixa em 0,5 centímetros (PET).	40
Figura 46. Variação do tempo com distância fixa em 1 centímetro (PET).	41
Figura 47. Variação do tempo com a distância fixa em 2 centímetros.....	42
Figura 48. Variação da distância com tempo fixo em 10 segundos (PEBD).....	43
Figura 49. Variação da distância com tempo fixo de 20 segundos (PEBD).....	43
Figura 50. Variação da distância com tempo fixo em 30 segundos (PEBD).	44
Figura 51. Variação da distância com tempo fixo em 40 segundos (PEBD).	44
Figura 52. Variação da distância com tempo fixo de 50 segundos (PEBD).....	45
Figura 53. Variação da distância com tempo fixo de 60 segundos (PEBD).....	46
Figura 54. Variação da distância com tempo fixo de 120 segundos (PEBD).....	46
Figura 55. Variação do tempo com distância fixa em 0,5 centímetros (PEBD).....	47
Figura 56. Variação do tempo com distância fixa em 1 centímetro (PEBD).	47
Figura 57. Variação do tempo com distância fixa de 2 centímetro (PEBD).	48
Figura 58. Comparação das 3 amostras Acetato, PET e PEBD sem tratamento.	49
Figura 59. Comparação das 3 amostras tratadas com 0,5 centímetros de distância.....	50
Figura 60. Comparação das 3 amostras tratadas com 1 centímetros de distância.....	51
Figura 61. Comparação das 3 amostras tratadas com 1 centímetros de distância.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBD	Descarga de Barreira Dielétrica (<i>Dielectric Barrier Discharge</i>).
Fab Lab	Laboratório de Fabricação (<i>Fabrication Laboratory</i>).
MDF	Placa de Fibra de Média Densidade (<i>Medium Density Fiberboard</i>).
PLA	Ácido Polilático (<i>Polylactic Acid</i>).
PVC	Policloreto de Vinilo (<i>Polyvinyl Chloride</i>).
PEBD	Polietileno de baixa Densidade.
PET	Politereftalato de Etileno.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Plasma	11
1.2	Os cinco estados da matéria	12
1.3	Descarga de Barreira Dielétrica (DBD)	13
1.4	Aplicações de DBD em superfícies.....	13
1.5	Objetivos	16
1.5.1	Objetivos gerais.....	16
1.5.2	Objetivos específicos.....	16
2	MATERIAIS E MÉTODOS	17
2.1	DESENVOLVIMENTO DO GERADOR DE ALTA TENSÃO	17
2.2	MATERIAIS.....	18
2.3	Fonte de alta tensão.....	20
2.4	Amostras	22
2.5	Goniometria.....	25
2.5.1	Lei de Young	25
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
3.1	Reator de Descarga elétrica de alta tensão.....	28
3.2	Aplicação de plasma frio em Acetato.....	29
3.2.1	Medidas quantitativas com goniometria	29
3.2.2	Acetato	29
3.3	Aplicação de plasma frio em Polietileno tereftalato (PET).....	36
3.3.1	Teste de goniometria	36
3.3.2	Polietileno de tereftalato	36
3.4	Aplicação de plasma frio em Polietileno de baixa densidade (PEBD).....	42
3.4.1	Teste de goniometria	42
3.4.2	Aplicação de plasma frio em polietileno de baixa densidade (PEBD)	42
4	COMPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	49
5	CONCLUSÃO	53
5.1	Sugestão de trabalhos futuros.....	54
	Referências	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Plasma

O plasma foi primeiramente identificado pelo físico inglês William Crookes em 1879 em um experimento elétrico constituído por um tubo de descarga (Figura 1), parcialmente no vácuo, e descrito por ele como "matéria radiante". Neste experimento, os raios catódicos foram descobertos [8].

Figura 1. Modelo Atômico de Thomson



Fonte: <https://www.coladaweb.com>

O termo plasma foi introduzido por Irving Langmuir, quando estava estudando descargas elétricas em vapor de mercúrio, na década de 1920, na General Electric Research Laboratory, nos Estados Unidos. Ele notou que as características do gás ionizado produzido nessas descargas eram razoavelmente uniformes em todo o seu volume e que ele se moldava à forma do tubo onde era produzido. Somente em 1928 que Irving Langmuir deu a esses raios o nome de plasma porque a forma do fluido elétrico obtido lembrava o plasma sanguíneo. O plasma sanguíneo é a parte líquida do sangue e corresponde a 55% do volume total [8].

1.2 Os cinco estados da matéria

Existem cinco estados conhecidos da matéria: sólido, líquido, gás, plasma e condensado de Bose-Einstein, como mostra a Figura 2. A principal diferença nas estruturas de cada estado está na densidade das partículas. [11]

Em 1995, os cientistas criaram um estado da matéria, o condensado de Bose-Einstein (BEC), quinto estado da matéria. Usando uma combinação de lasers e ímãs, Eric Cornell e Carl Weiman resfriaram uma amostra de rubídio a temperaturas muito próximas do zero absoluto. Nesta temperatura extremamente baixa, o movimento molecular praticamente para [11].

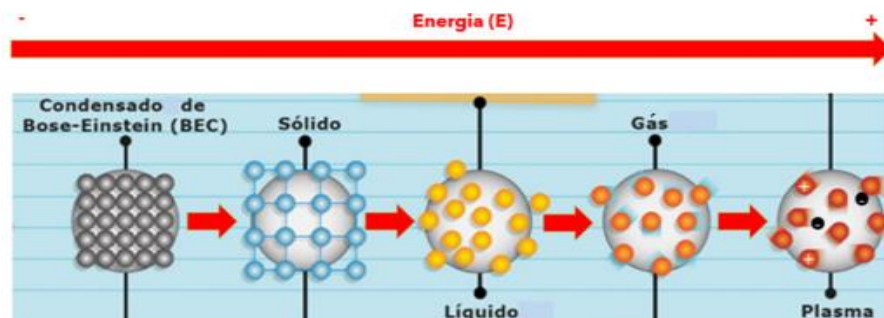
No estado sólido, a força coesiva da matéria é forte o suficiente para manter as moléculas ou átomos nas posições dadas, restringindo a mobilidade térmica. Assim, um sólido tem uma forma definitiva e um volume determinado.

No estado líquido, as partículas de uma substância têm mais energia cinética que as de um sólido. As partículas líquidas não são mantidas em um arranjo regular, mas ainda estão muito próximas uma da outra, de modo que os líquidos têm um volume definido [11].

No estado gasoso, as partículas do gás têm muito espaço entre elas e possuem alta energia cinética. Se não confinadas, as partículas de um gás se espalharão indefinidamente; se confinado, o gás se expandirá para preencher o recipiente.

O plasma não é um estado comum da matéria aqui na Terra, mas pode ser o estado mais comum da matéria no universo. O plasma é constituído por partículas carregadas com energia cinética extremamente alta [11].

Figura 2. 5 estados físicos da matéria devido à transferência de energia.



Fonte: <https://medium.com/> [Adaptado]

1.3 Descarga de Barreira Dielétrica (DBD)

Os plasmas frios que podem ser gerados em pressão atmosférica desempenham papéis importantes em várias aplicações de processamento de materiais e superfícies. Embora haja muitos métodos para se gerar um plasma frio, uma das maneiras mais simples e práticas é usar a configuração de descarga de barreira dielétrica (DBD). Este tipo de descarga usa um dielétrico para cobrir pelo menos um dos dois eletrodos e o plasma gerado no espaço entre os eletrodos é geralmente filamentar, mas sob algumas condições podem ser uniformemente difusas. Uma das suas primeiras aplicações foi para gerar ozônio para tratamento de fontes de água. DBD também ganhou amplo uso em aplicações biomédicas desde meados de 1990, quando foi demonstrado que o plasma produzido por DBD possui fortes propriedades germicidas [8].

O plasma gerado entre os eletrodos pode ser “soprado” para fora da região de descarga em direção a um substrato. Esse tipo de arranjo possibilitou muitos tipos de aplicações, principalmente, em tratamentos de superfícies de diversos materiais [8].

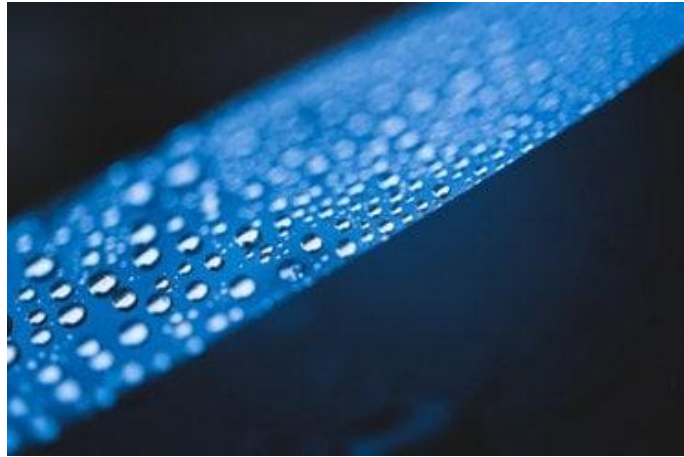
1.4 Aplicações de DBD em superfícies

A descarga de barreira dielétrica (DBD) é uma técnica de plasma que pode ser usada em uma variedade de aplicações de superfície, incluindo:

Modificação de superfície: A DBD pode ser usada para modificar as propriedades de superfícies de materiais, como polímeros, metais e vidro. Isso inclui a melhoria da adesão de revestimentos, aprimoramento da hidrofobicidade da superfície (Figura 3), alteração da rugosidade e limpeza de superfície.

Síntese de materiais: A DBD pode ser usada para sintetizar novos materiais, como filmes finos e nanopartículas. Por exemplo, a deposição de filmes finos pode ser realizada através da excitação de gases reativos na DBD, que reagem com a superfície do material para formar um revestimento. A Figura 4 mostra um exemplo de lentes de óculos com e sem tratamento com plasma.

Figura 3. Polímero hidrofóbico



Fonte: l1nq.com/Y0eo0

Figura 4. óculos com e sem tratamento de lentes.



Fonte: encr.pw/z9Mux

Tratamento de materiais: A DBD pode ser usada para tratar materiais antes de processá-los, a fim de melhorar sua qualidade. Por exemplo, a esterilização de materiais médicos pode ser realizada com a DBD para eliminar micro-organismos e prevenir infecções (Figura 5).

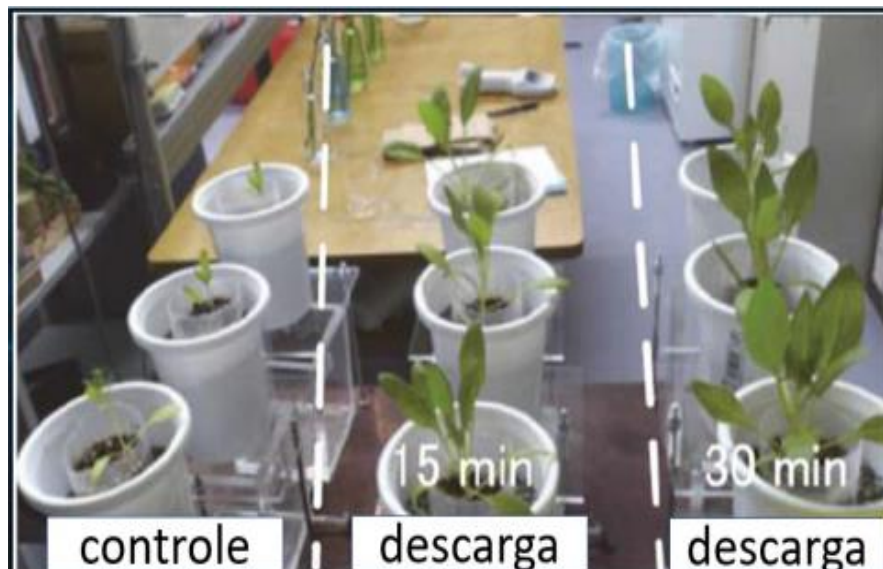
Aplicação na Agricultura: Aplicação do plasma frio na agricultura para produção de fertilizantes e no tratamento de solos (Figura 6). O plasma frio pode ser utilizado para converter resíduos orgânicos em compostos nitrogenados, que são nutrientes essenciais para o crescimento das plantas.

Figura 5. Esterilização de instrumentos em uma clínica



Fonte: 11nq.com/TNLn5

Figura 6. Aplicações de Plasma em plantas



Fonte: Reproduzido e adaptado por THIRUMDAS

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos gerais

O objetivo do projeto é construir um reator capaz de gerar plasma em pressão atmosférica usando a técnica de Descarga de Barreira Dielétrica (DBD). O plasma gerado por meio dessa técnica contém espécies altamente reativas, como íons, radicais, átomos e moléculas excitadas, que podem ser usadas para tratar a superfície de polímeros, aumentando a molhabilidade e facilitando a adesão de tintas e adesivos.

1.5.2 Objetivos específicos

Apresentar a técnica de Descarga de Barreira Dielétrica (DBD) para obtenção de plasmas frios em pressão atmosférica e como essa técnica pode ser utilizada para tratamento de superfícies de polímeros, aumentando a adesão de tintas e adesivos. Além disso, tem como objetivo descrever a configuração do gerador DBD, com dois eletrodos e um dielétrico, que evita que o plasma entre em regime de arco e distribui a descarga uniformemente em forma de filamentos ocupando todo o volume. Por fim, construir um reator para geração de plasma usando DBD e realizar aplicações em tratamentos de superfície de acetato de celulose, polietileno de baixa densidade (PEBD), Polietileno de tereftalato (PET).

A detecção da efetividade da superfície por plasma frio em função do tempo deve ser realizada por goniometria.

Com isso, realizar testes dos diferentes grupos de polímeros e fazer o registro. Ao final deste trabalho e a partir desse registro, as discussões dos resultados obtidos devem ser feitas, mediante uma possível comparação com os efeitos presentes na literatura.

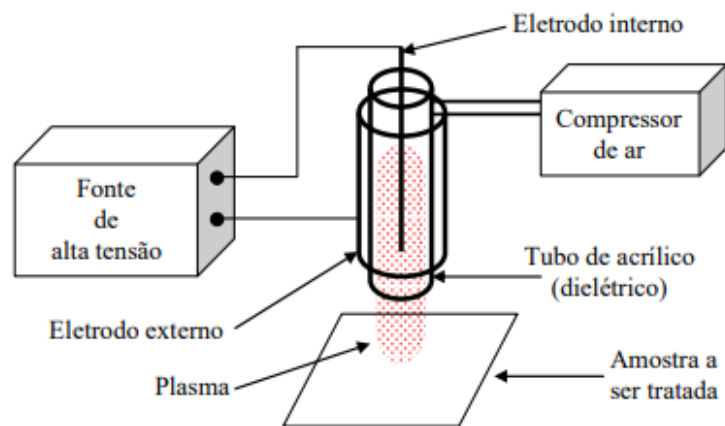
2 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho consiste das seguintes etapas: O gerador de plasma DBD será construído em forma cilíndrica com tubo de acrílico como dielétrico. A descarga (plasma) será do próprio ar, que será bombeado através do tubo por meio de um compressor de aquário. A Figura 7 mostra esquematicamente o sistema a ser desenvolvido.

Além disso, na Figura 8 é apresentado o projeto desenvolvido no Tinkercad. O Tinkercad é uma ferramenta online de modelagem 3D que permite criar e editar modelos tridimensionais de forma intuitiva, sendo amplamente utilizada em projetos de engenharia, arquitetura, design e educação.

Na Figura 9, temos o resultado da construção do gerador de plasma, demonstrando o projeto final obtido.

Figura 7. Representação esquemática do sistema de plasma DBD



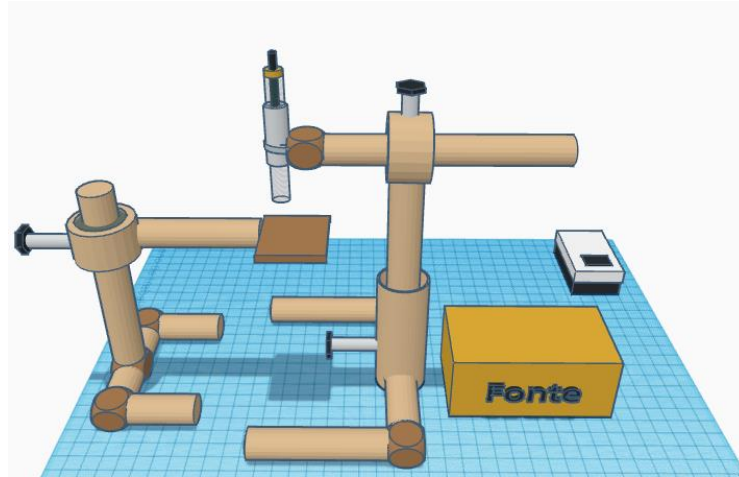
Fonte: Próprio Autor

2.1 DESENVOLVIMENTO DO GERADOR DE ALTA TENSÃO

Para o desenvolvimento do gerador de alta tensão, foram utilizados materiais como PVC e MDF para suporte de aplicação do plasma e base de amostras. Esses materiais foram escolhidos por serem isolantes elétricos, fáceis de manusear, moldar

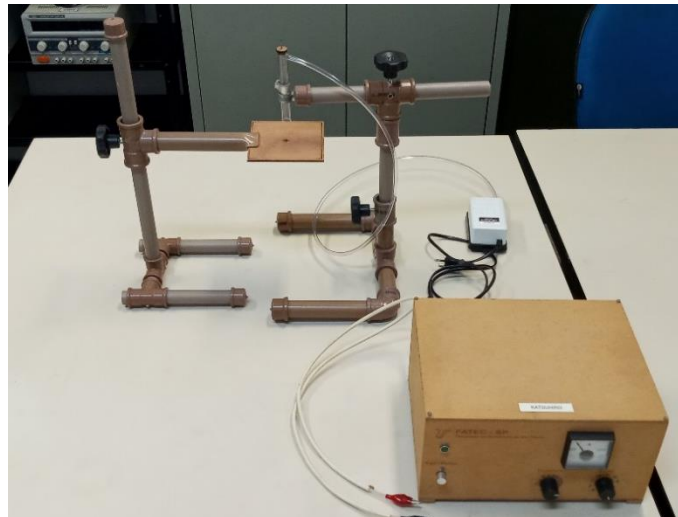
e terem resistência mecânica e térmica suficientes para os experimentos. Além disso, são de fácil obtenção e apresentam bom custo-benefício. Em caso de perda ou danos em alguma peça, pode-se repô-la de maneira fácil e rápida.

Figura 8. Projeto desenvolvido no tinkercad



Fonte: Próprio Autor

Figura 9. Arranjo construído



Fonte: Próprio Autor

2.2 MATERIAIS

Foi utilizada uma chapa de MDF cru com as seguintes medidas: espessura de 0,3 cm, largura de 21 cm, comprimento de 29,7 cm e peso aproximado de 172 gramas.

O MDF foi cortado com dimensões de 5x5 cm para que seja feita a base das amostras e foi feita uma gravação com o sinal de mais (+) no centro da base (Figura 11). Para a obtenção do corte, foi utilizada a máquina de gravação a laser Co2 com *spot* de diâmetro de 10mm do Fab Lab de Itaquera (Figura 10).

Figura 10. Máquina de Corte a laser 1080



Fonte: Próprio Autor

Figura 11. Base para amostras 5x5 cm

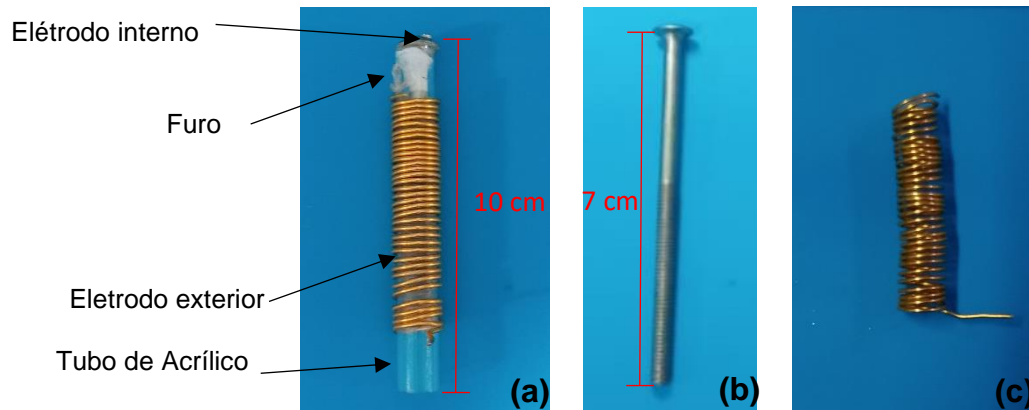


Fonte: Próprio Autor

O acrílico utilizado tem diâmetro de 12 mm e espessura de parede de 1 mm, com comprimento de 10 cm. Na figura 12, é mostrado o tubo de acrílico com um furo na lateral, feito para encaixar a mangueira da bomba de ar do aquário (Figura 13), a fim de direcionar o ar ionizado para as amostras. O eletrodo interno é um parafuso de aço com 7 cm de comprimento, enquanto o eletrodo externo consiste em um arame

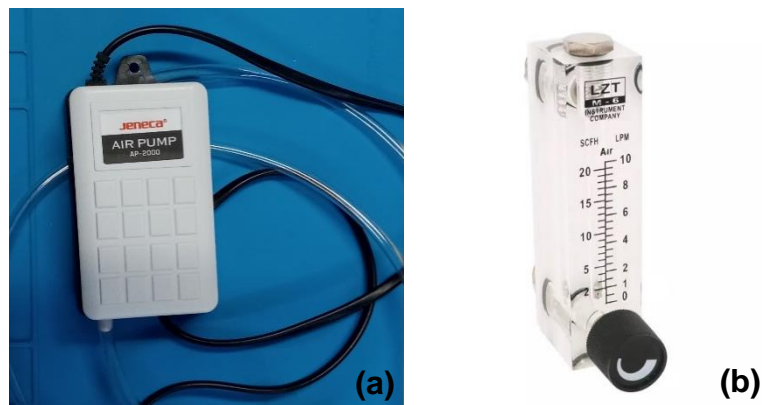
banhado a ouro disposto em forma de espiral. Idealmente, o eletrodo externo deveria cobrir o tubo de acrílico com o mesmo tamanho do eletrodo interno para possibilitar descargas que preencha o tubo de acrílico. A bomba de aquário possui uma vazão de 1,6 litros por minuto de fábrica. No entanto, ao utilizar um rotâmetro, foi constatado que a vazão real é de 1,5 litros por minuto.

Figura 12. Tubo de acrílico com eletrodo exterior (a) Eletrodo interno (b) e Eletrodo externo (c)



Fonte: Próprio Autor

Figura 13. Bomba de aquário (a) e rotâmetro (b)



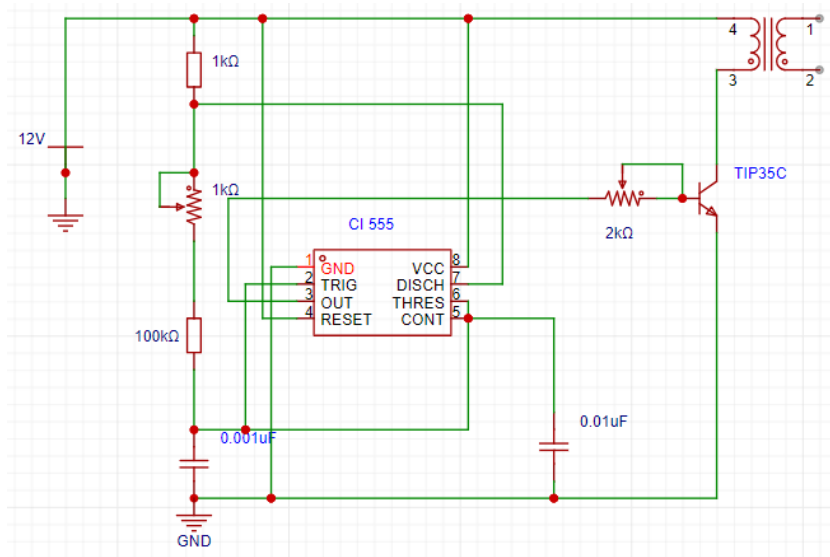
Fonte: Próprio Autor

2.3 Fonte de alta tensão

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) não poderia ter sido realizado sem a valiosa contribuição de trabalhos anteriores conduzidos por Fernando Átila da Rosa e Rafael da Cruz Oliveira, sob a orientação do Professor Roberto Katsuhiko Yamamoto,

em 2006. Seu projeto, intitulado Projeto e Construção de uma Fonte de Alta-Tensão para Gerador de Microplasma, serviu como alicerce essencial para pesquisa atual.

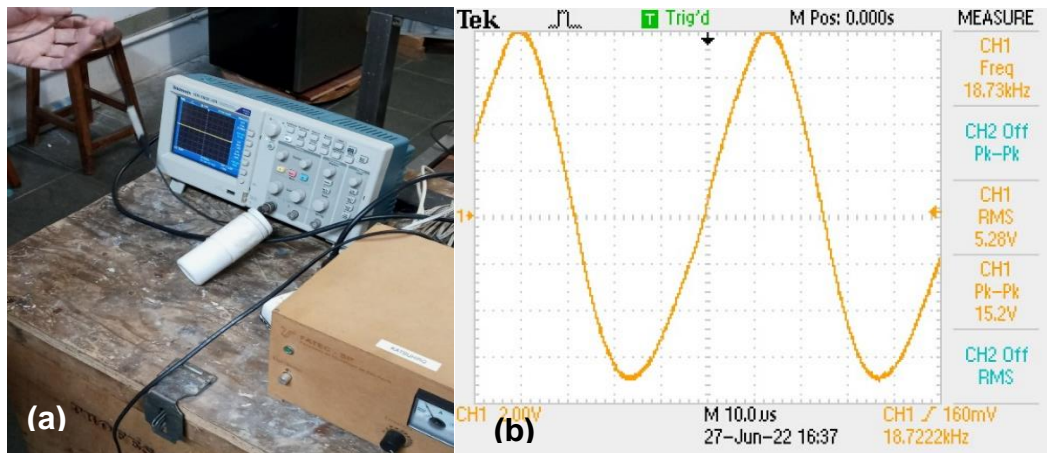
Figura 14 Circuito da Fonte



Fonte: TCC Projeto e construção de uma fonte de alta-tensão para um gerador de microplasma.

A fonte de alta tensão concebida por eles foi meticulosamente projetada e construída para atender às necessidades específicas de geradores de microplasma (Figura 14). Com base em seu trabalho, adquirimos a fonte e a integramos em nossos experimentos. No laboratório do Professor Edson Moriyoshi Ozono, localizado na Fatec de São Paulo, realizamos medições para determinar a tensão *root mean square* (RMS) de saída da fonte. A figura 15 (a) mostra o arranjo utilizado para realizar a medição da tensão e a fonte. Ao lado, na figura 15 (b), encontra-se um *print* da tela do osciloscópio com as informações de frequência e tensão. O arranjo utilizado consiste em um conjunto de capacitores para formar um divisor de tensão, permitindo a medição da tensão da fonte. Como não se tinha conhecimento da quantidade de tensão que a fonte produzia e o osciloscópio não é capaz de medir altas tensões, havia o risco de danificar o equipamento. Portanto, para determinar o valor da tensão, basta multiplicar o valor RMS indicado no osciloscópio pelo fator multiplicador 494, resultando em um valor de 2608 volts. A ponta de prova tem uma redução de 494 vezes permitindo usar o osciloscópio. Para assegurar que essa tensão fosse utilizada em todas as amostras, foi realizada uma marcação nos controles de tensão e frequência da fonte.

Figura 15 Arranjo para fazer a medição da tensão (a) e Print do osciloscópio (b)



Fonte: Próprio Autor

2.4 Amostras

Figura 16. Amostras de Acetato

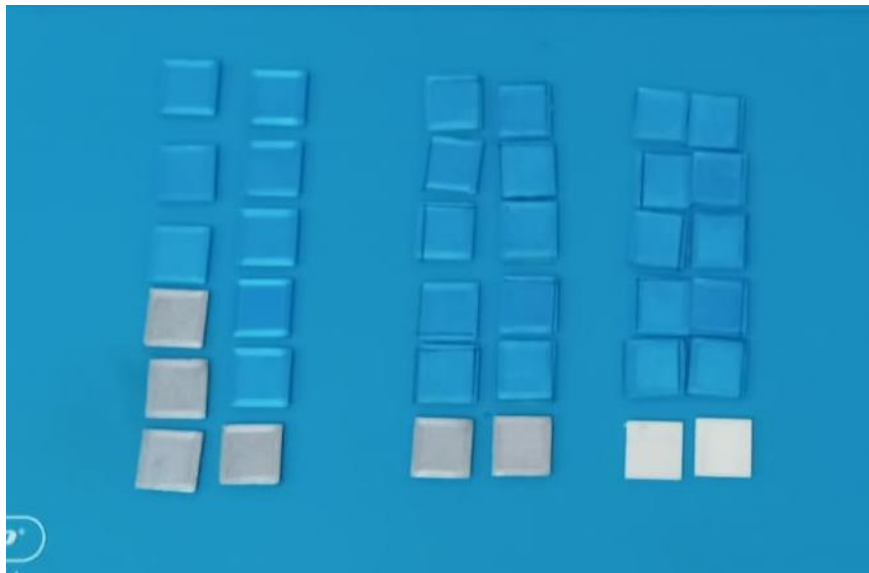


Fonte: Próprio Autor

O acetato de celulose foi o primeiro material a ser tratado (Figura 16). Este tipo de acetato é facilmente encontrado em lojas que vendem material escolar. Para a preparação das amostras, foram utilizado uma folha A4 de acetato, na qual foi desenhado quadrados de aproximadamente 1,5x1,5 cm com a ajuda de uma caneta para fazer as marcações. Em seguida, foram feitos os cortes das amostras com uma tesoura, totalizando 63 amostras.

Os tempos de exposição ao plasma frio variaram, incluindo intervalos de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 120 segundos. Para cada um desses tempos, foram estabelecidas três distâncias distintas: 0,5 cm, 1 cm e 2 cm. Em cada distância, foi realizado três aplicações e utilizado a média dessas três aplicações como o valor de referência. Além disso, foi calculado o desvio padrão dessas amostras como medida da incerteza. A tensão permaneceu inalterada ao longo do experimento, garantindo a consistência dos resultados, uma vez que os controles de tensão e frequência não foram modificados.

Figura 17. Amostras de PEBD



Fonte: Próprio Autor

Existem diversos tipos de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), como, por exemplo, sacolas plásticas de supermercado e sacos de lixo, devido à sua flexibilidade e capacidade de produção. Para este experimento, utilizamos PEBD de material escolar, como os saquinhos utilizados para armazenar folhas em fichários (Figura 17).

O Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) foi o segundo material utilizado no estudo. Diferentemente do acetato, o PEBD é muito fino e flexível, o que exigiu que as amostras fossem coladas em uma base plana para evitar deformações. Para isso, foi utilizado 63 peças de impressora 3D, cada uma com dimensões de 1,5cm x 1,5cm, que foram fixadas com cola escolar. As amostras aderiram bem à superfície do PLA

(polímero utilizado em impressão 3D). Da mesma forma que as amostras de acetato, as amostras de PEBD foram submetidas a tempos de exposição de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 120 segundos, mantendo distâncias de 0,5 cm, 1 cm e 2 cm. Não houve alteração nas configurações de controle da fonte de alta tensão, mantendo-se a configuração para garantir a uniformidade da tensão.

Figura 18. Amostras de PET



Fonte: Próprio Autor

O polietileno de Tereftalato, comumente conhecido como PET (Figura 18), é um polímero amplamente utilizado na indústria moderna devido às suas notáveis propriedades e características. Seu uso se estende desde o armazenamento de bebidas em garrafas até a preparação de roupas, embalagens, filmes transparentes e muito mais. O PET (polietileno de tereftalato) foi o terceiro material a ser utilizado nas experiências. Diferentemente do PEBD, o PET apresenta uma resistência maior sem a necessidade de uma base para sua fixação. O processo de obtenção das peças de PET foi semelhante ao do acetato. Inicialmente, marcou-se com uma caneta, formando quadrados com aproximadamente 1,5 x 1,5 cm, e em seguida, realizou-se o recorte. Ao todo, foram produzidas 63 amostras, e as aplicações tiveram os tempos de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 120 segundos, com distâncias de 0,5 cm, 1 cm e 2 cm. As aplicações do plasma na superfície do PET mantiveram as características aplicadas nos outros materiais.

2.5 Goniometria

A goniometria, ciência que se dedica à medição de ângulos e à análise das relações angulares, desempenha um papel fundamental em diversas áreas do conhecimento, desde a engenharia até a medicina, passando pela física e pela astronomia. Nos últimos anos, a goniometria emergiu como uma ferramenta crucial na análise de superfícies de materiais submetidos a tratamentos inovadores. Ela é uma técnica precisa e confiável para medir o ângulo de contato em superfícies, e sua aplicação nesse contexto visa revelar alterações no ângulo de contato como evidência de que o plasma frio está reagindo com a superfície do material (Figura 19).

O ângulo de contato (θ) é definido pela geometria de uma gota líquida em contato com uma superfície sólida. É o ângulo interno formado entre a tangente à superfície da gota no ponto de contato e a superfície sólida.

A molhabilidade de uma superfície pode ser categorizada da seguinte maneira:

- Ângulo de contato $\theta < 90^\circ$: Superfície hidrofílica (boa molhabilidade).
- Ângulo de contato $\theta > 90^\circ$: Superfície hidrofóbica (pouca molhabilidade).

2.5.1 Lei de Young

A relação entre o ângulo de contato e as tensões superficiais é descrita pela equação de Young:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos\theta$$

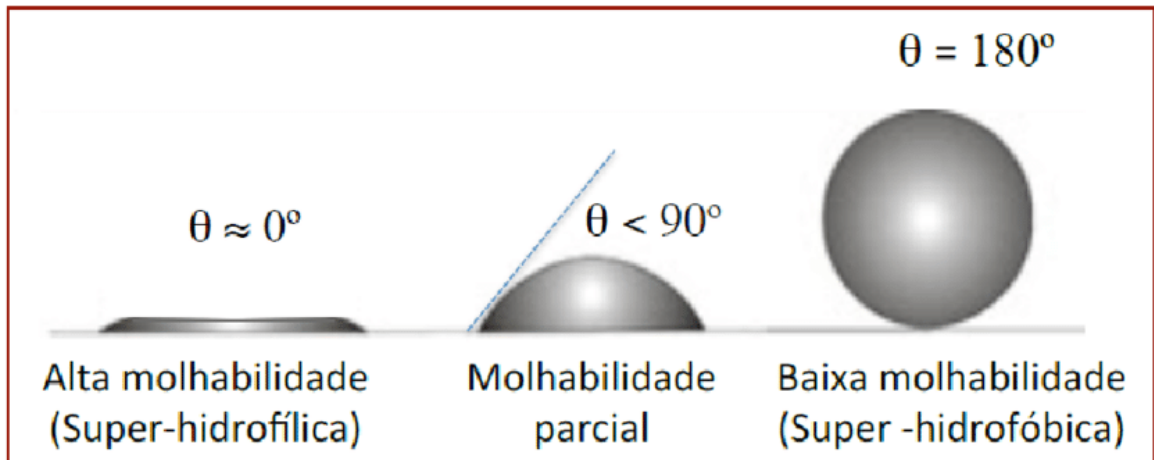
onde:

γ_{SV} é a tensão superficial entre o sólido e o vapor,

γ_{SL} é a tensão superficial entre o sólido e o líquido,

γ_{LV} é a tensão superficial entre o líquido e o vapor,

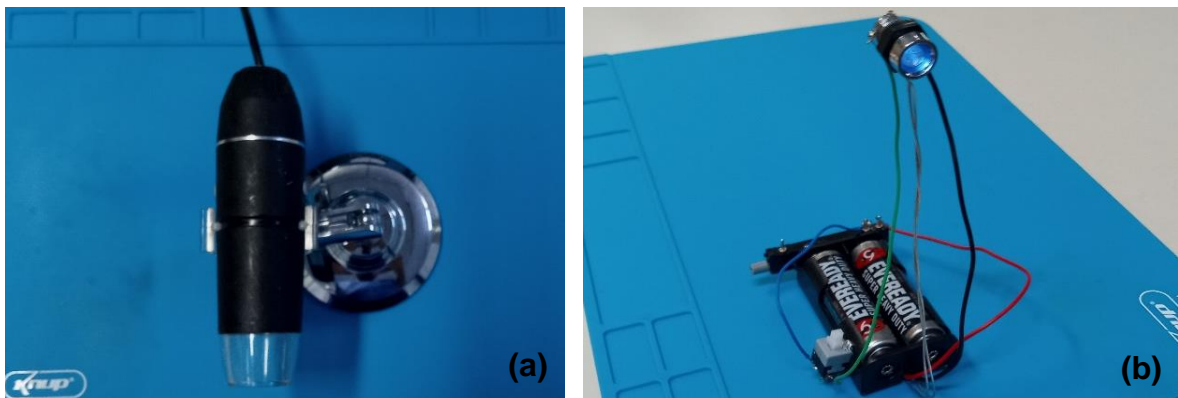
Figura 19. Ângulo de contato e suas características



Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/Figura1-Angulo-de-contato>

Para realizar as medições do ângulo de contato, foram utilizados equipamentos específicos, como o Microscópio Profissional Digital Zoom 1000x com conexão USB de 2.0 MP para capturar imagens da gota de água. A fim de melhorar o contraste e facilitar a visualização da base da gota para a medição do ângulo de contato, desenvolveu-se um dispositivo de iluminação específico (Figura 20).

Figura 20. Microscópio Digital (a) e dispositivo para fotos (b)



Fonte: Próprio Autor

Figura 21. Controlador de gotas



Fonte: Próprio Autor

Foi desenvolvido um controlador de gotas utilizando uma seringa acoplada a um parafuso e uma agulha sem chanfro na extremidade, com o objetivo de obter gotas de volume entre 1 e 13 microlitros (Figura 21). Foram realizados alguns testes para avaliar o desempenho do controlador. Foi utilizado uma tampa de remédio com marcações conhecidas e foram pingadas gotas até atingir uma medida específica. Em seguida, foi feita a divisão do volume pelo número de gotas, resultando em valores de 39 microlitros, 14 microlitros e 12,8 microlitros. A variação do volume da gota está relacionada ao diâmetro da agulha, que foi sendo trocada. Dessa forma, em todos os testes, o volume das gotas foi de 12,8 microlitros. No decorrer do trabalho foi encontrado um sistema controlador de gota feito na impressora 3D (Figura 22).

Figura 22. Controlador de gotas com arranjo feito em 3D

Fonte: <https://www.thingiverse.com/thing:3723903>

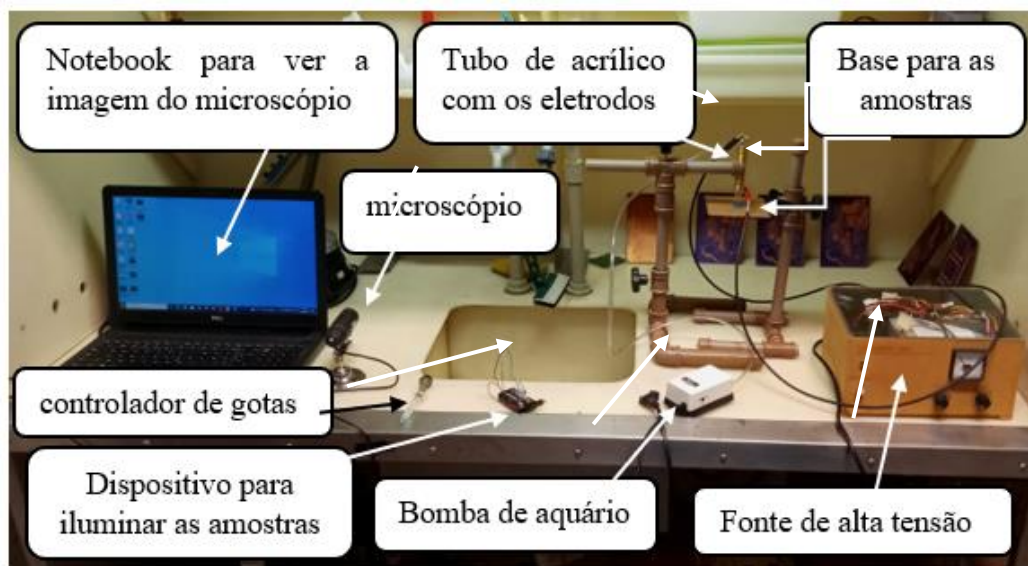
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Reator de Descarga elétrica de alta tensão

A figura 23 apresenta o reator de descarga de alta tensão juntamente com o *setup* utilizado para a realização das experimentações. Cada ensaio foi conduzido em um ambiente controlado, dentro de uma capela equipada com um exaustor em funcionamento, garantindo que o gás produzido, ozônio, fosse adequadamente canalizado e não se dispersasse pelo ambiente. Embora o ozônio, em pequenas quantidades, não represente riscos à saúde, seu odor peculiar pode ser desconfortável.

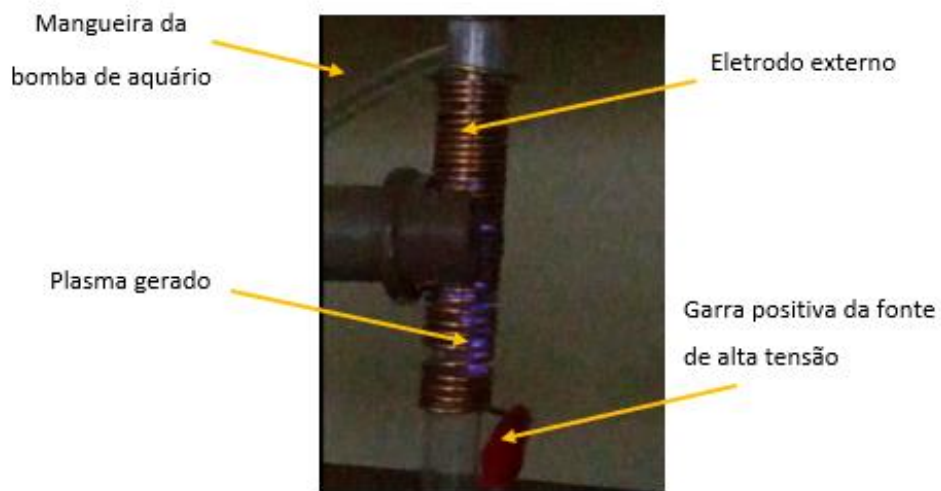
O reator demonstrou eficácia ao longo de todos os testes realizados, evidenciando seu desempenho consistente. Como é possível ver na Figura 24, o plasma gerado manteve-se constante durante todo o processo. Todos os testes foram realizados no Laboratório de Circuitos Impressos, localizado na Fatec de São Paulo (Figura 23).

Figura 23. Arranjo experimental



Fonte: Próprio Autor

Figura 24. Descarga no tubo de acrílico



Fonte: Próprio Autor

3.2 Aplicação de plasma frio em Acetato

3.2.1 Medidas quantitativas com goniometria

Foram feitos apenas teste de goniometria para identificar alteração na superfície a partir do ângulo de contato.

3.2.2 Acetato

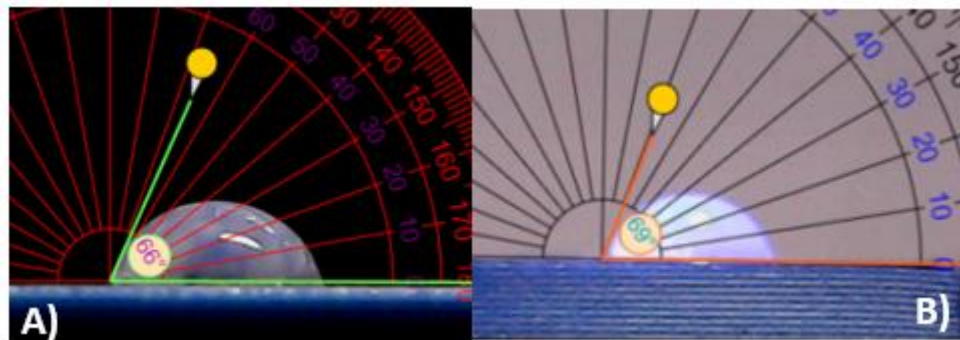
Figura 25. Ângulo de contato da amostra Acetato com distância de 0,5cm de distância do plasma e tempo de 10 segundos. Figura A) sem tratamento e Figura B) com tratamento.



Fonte: Próprio Autor

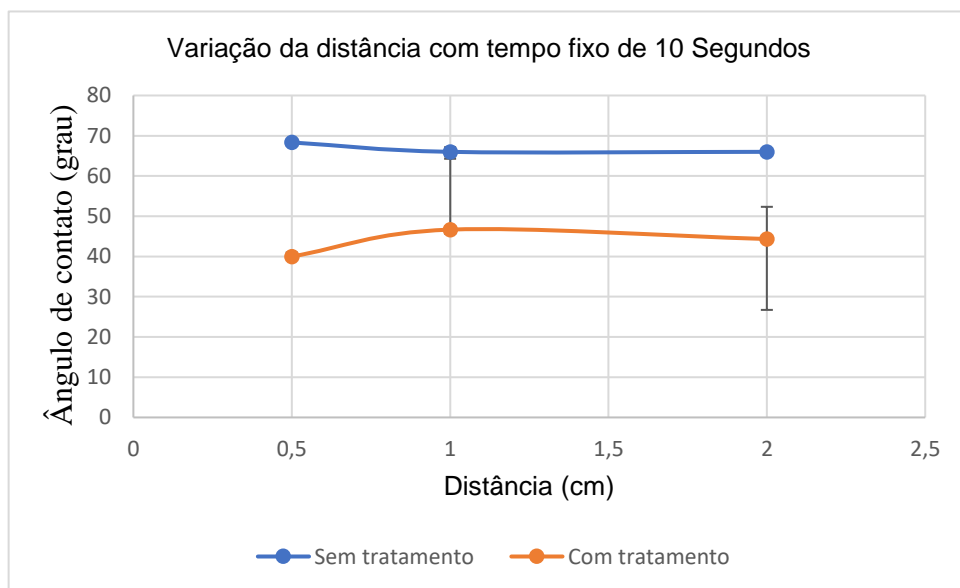
Os testes com as amostras de acetato foram iniciados (Figura 25,26 e 28). No total, foram realizados sete intervalos de tempo, cada um com três distâncias diferentes, e a média de três testes foi utilizada como valor da variação do ângulo de contato. Na Figura 27, apresentam-se os resultados da aplicação do plasma por 10 segundos, variando as distâncias de 0,5 cm, 1 cm e 2 cm. Isso permite avaliar a eficácia do plasma. É evidente que ocorreu uma alteração no ângulo de contato, sendo observável que, conforme a distância aumenta, a modificação na superfície tende a diminuir, conforme indicado pela tendência do gráfico.

Figura 26. Ângulo de contato da amostra Acetato com distância de 0,5cm de distância e tempo de 10 segundos. Figura A) sem tratamento e Figura B) com tratamento.



Fonte: Próprio Autor

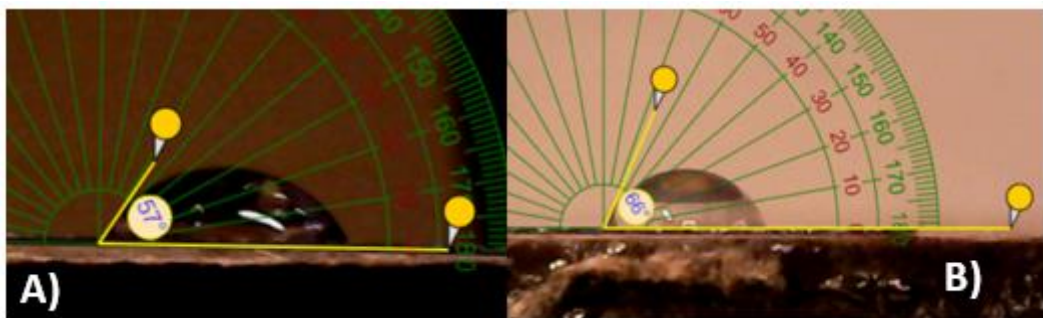
Figura 27. Variação da distância com tempo fixo de 10 Segundos.



Fonte: Próprio Autor

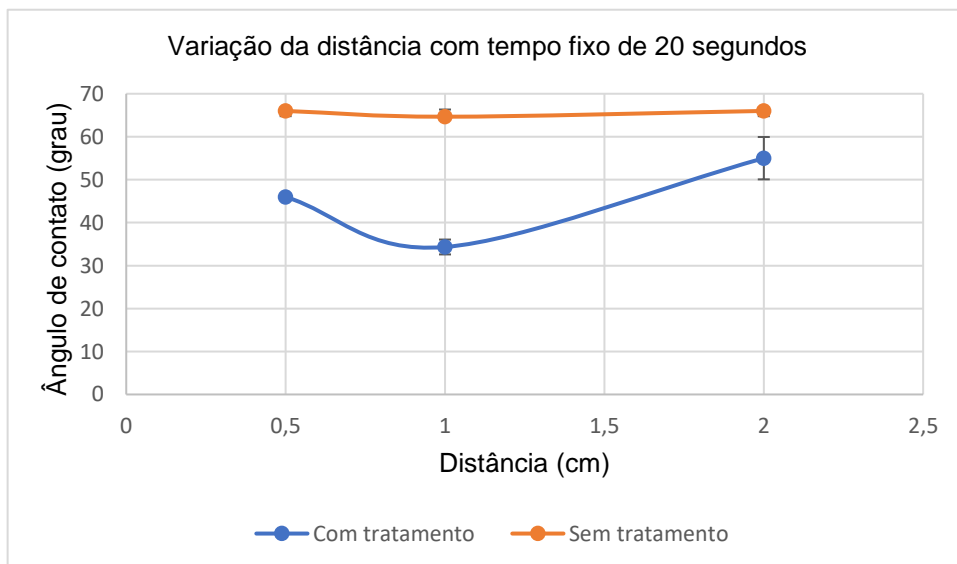
No gráfico da Figura 27, é possível verificar uma diminuição no ângulo de contato. Na distância de 1 cm, o ângulo de contato foi menor do que na distância de 0,5 cm. Isso também é evidenciado na figura 30, onde o tempo foi mantido fixo em 30 segundos. Ele exibe uma curva de tratamento semelhante à de 20 segundos, porém com ângulos de contato maiores. Isso sugere que existe uma tendência de que os tempos entre 10 e 20 segundos sejam mais eficientes para a alteração no ângulo de contato, enquanto 30 segundos é menos eficaz.

Figura 28. Ângulo de contato da amostra Acetato com distância de 0,5cm de distância e tempo de 10 segundos. Figura A) sem tratamento e Figura B) com tratamento.



Fonte: Próprio Autor

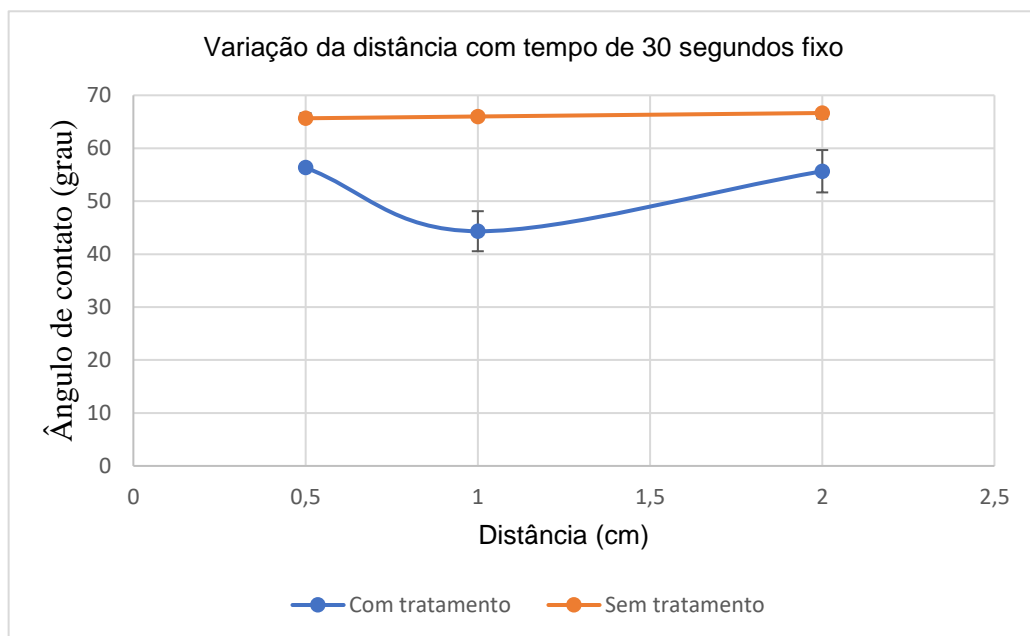
Figura 29. Variação da distância com tempo fixo de 20 segundos.



Fonte: Próprio Autor

Nos gráficos da Figura 29 e 30, observa-se que a distância de 0,5 centímetros não resultou no menor ângulo de contato, o que contradiz as expectativas, pois, geralmente, espera-se que quanto mais próxima a amostra estiver, maior será a concentração de espécies reativas depositadas na superfície. O que pode ter ocorrido, conforme relatado na literatura, é que aplicações em que a amostra fica muito próxima da vazão do gás podem levar a resultados inesperados devido a alterações não controladas na superfície. Por exemplo, se a intensidade do plasma for muito alta, pode ocorrer um desgaste excessivo ou danos mecânicos à superfície do material. [9]

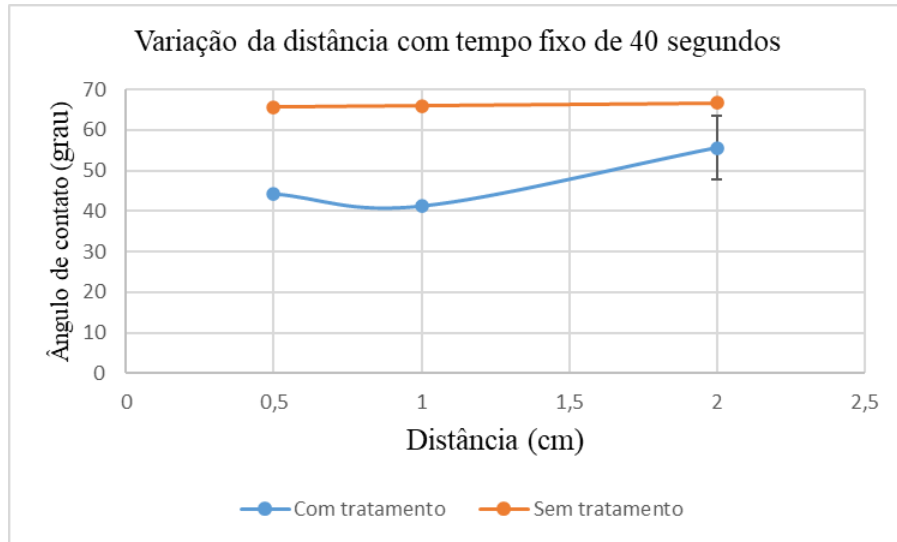
Figura 30 Variação da distância com tempo fixo de 30 segundos



Fonte: Próprio Autor

No gráfico da figura 31, onde o tempo é fixo em 40 segundos, observam-se as mesmas características dos tempos de 20 e 30 segundos, com a distância de 1 cm apresentando um ângulo de contato menor do que a distância de 0,5 centímetros. No entanto, há uma diferença pequena entre o ângulo de contato com 0,5 centímetros e 1 centímetro. Nos gráficos da Figura 29 e 30, essa diferença é maior.

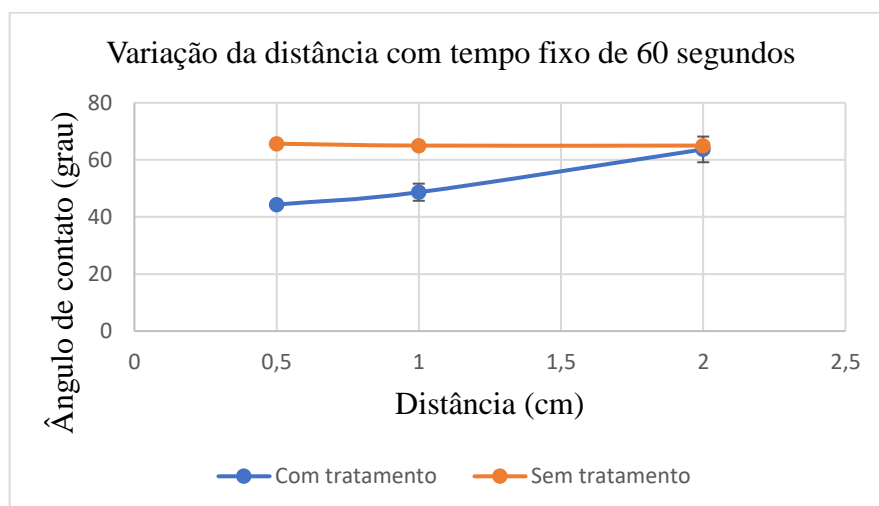
Figura 31. Variação da distância com tempo fixo de 40 segundos.



Fonte: Próprio Autor

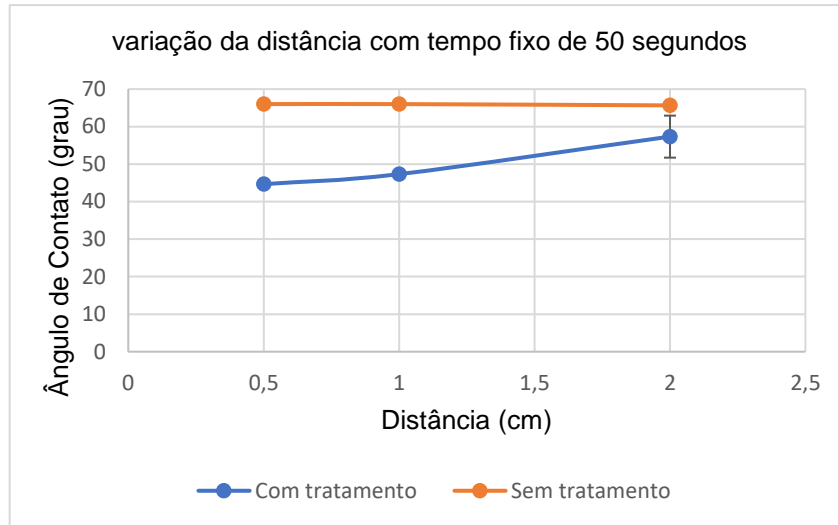
Nos gráficos das Figuras 32, 33 e 34, observam-se características distintas em comparação com os outros intervalos de tempo. Não se repetiram as características dos gráficos com tempos de 10, 20, 30 e 40 segundos, nos quais o ângulo de contato a uma distância de 1 centímetro era menor do que a distância de 0,5 centímetros. É possível constatar que houve uma perda de qualidade na alteração do ângulo de contato com o aumento do tempo de exposição ao plasma. Os tempos de 50 e 60 segundos apresentaram alterações no ângulo de contato muito próximas entre si.

Figura 32. Variação da distância com tempo fixo de 60 segundos.



Fonte: Próprio Autor

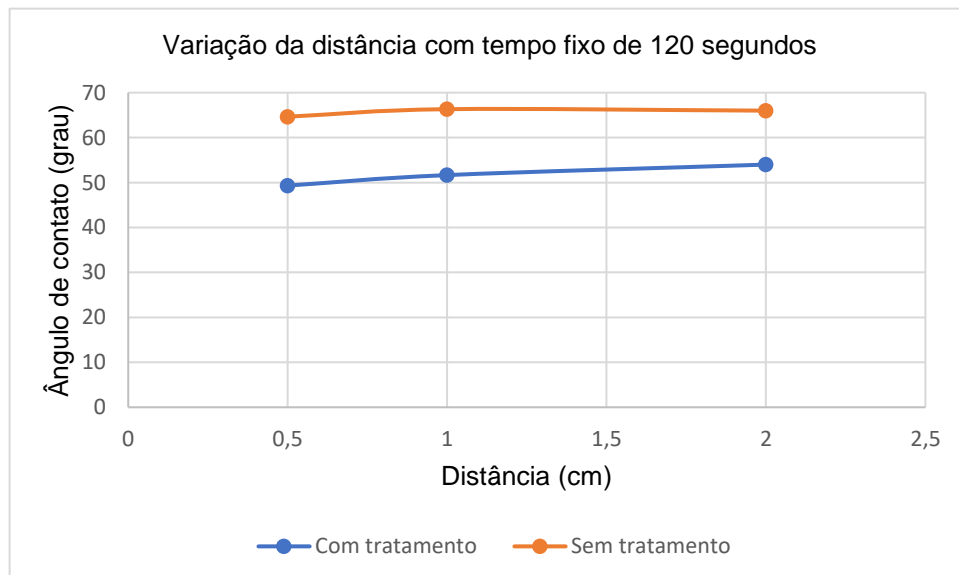
Figura 33. Variação da distância com tempo fixo de 50 segundos.



Fonte: Próprio Autor

O gráfico da Figura 34 mostra o resultado com a aplicação de 120 segundos, o maior tempo utilizado neste projeto devido às características da fonte. A fonte de alta tensão utilizada não consegue permanecer um tempo maior gerando a descarga de forma contínua, em alguns testes feitos com tempos mais longos, ela apresenta perda da descarga. O tempo de 120 segundos mostrou uma perda de qualidade no ângulo de contato e não teve uma grande diferença ao alterar a distância.

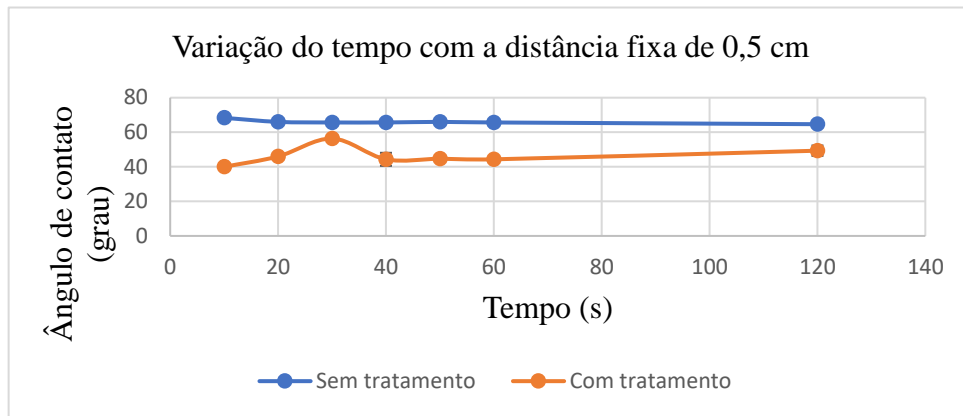
Figura 34. Variação da distância com tempo fixo de 120 segundos.



Fonte: Próprio Autor

Ao iniciar uma análise focalizada na distância fixa e nas variações no tempo, torna-se possível examinar os efeitos temporais nas amostras. Notavelmente, ao considerarmos a distância de 0,5 centímetros (Figura 35), observamos que as diferenças são mínimas ao longo do tempo, com exceção do intervalo de 30 segundos.

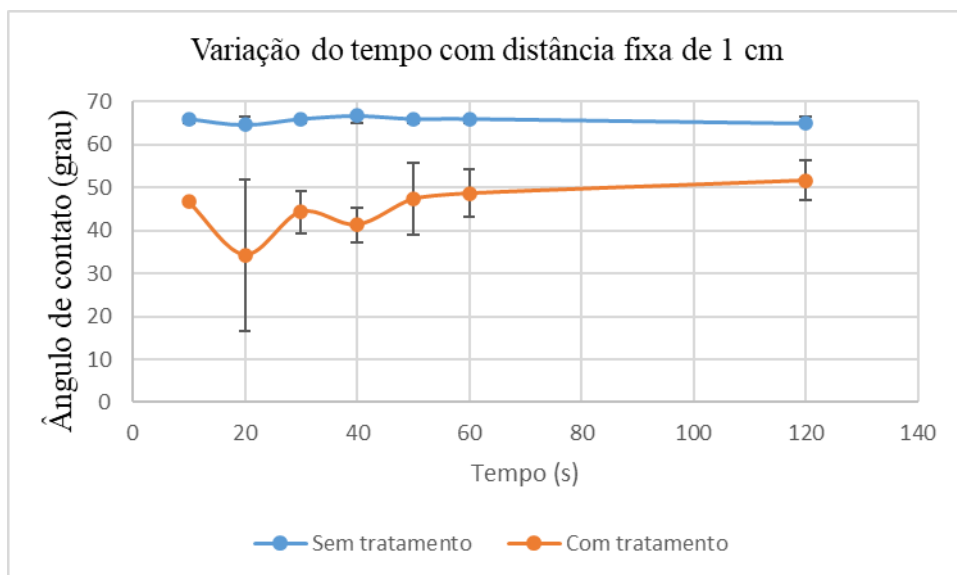
Figura 35. Variação do tempo com distância fixa de 0,5 centímetros.



Fonte: Próprio Autor

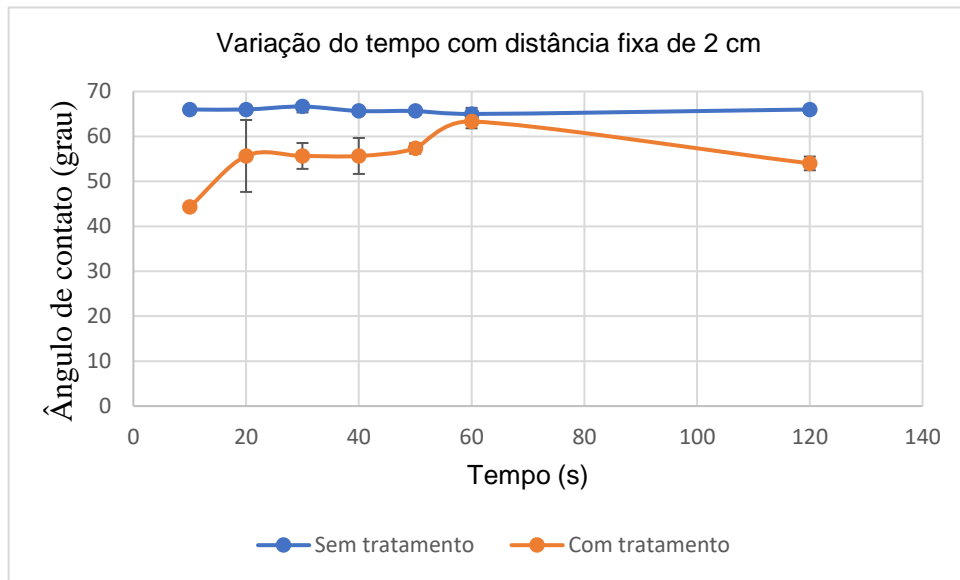
A distância de 1 centímetro evidenciou uma variação mais expressiva ao longo do tempo em comparação com a distância de 0,5 centímetros. Apesar de apresentar uma variação mais notável com tempos de aplicação mais extensos, é possível observar um aumento no ângulo de contato nos intervalos de 50, 60 e 120 segundos (Figura 36).

Figura 36 Variação do tempo com distância fixa de 1 centímetros



Fonte: Próprio Autor

Figura 37. Variação do tempo com distância fixa de 2 centímetros.



Fonte: Próprio Autor

Com a distância de 2 centímetros, é possível verificar estabilidade nos intervalos de tempo de 20 segundos até 50 segundos, havendo apenas uma pequena alteração no ângulo de contato entre as amostras tratadas e não tratadas no tempo de 60 segundos (Figura 37). Nota-se também que o tempo de 120 segundos é mais comparável aos tempos de 10, 20, 30, 40 e 50 segundos. Isso indica que o tempo mais eficaz para obter uma alteração no ângulo de contato da superfície é de 10 segundos.

3.3 Aplicação de plasma frio em Polietileno tereftelato (PET)

3.3.1 Teste de goniometria

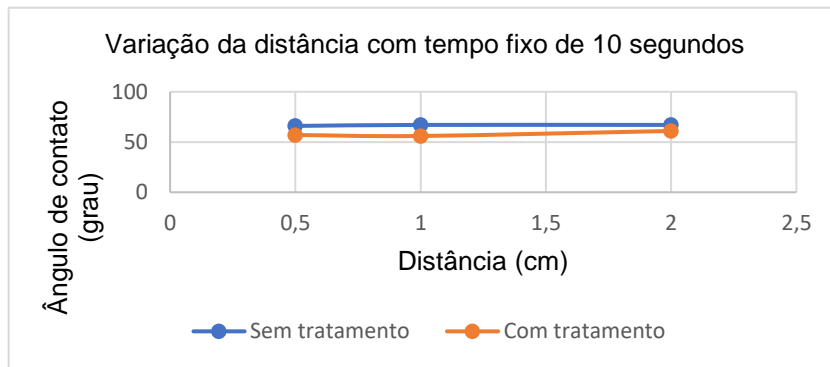
Para verificar se houve alguma alteração na superfície do pet foi usado o teste de goniometria.

3.3.2 Polietileno de tereftelato

O PET e o acetato compartilham semelhanças em sua forma física, sendo, em alguns casos, desafiador distinguir se uma folha é feita de PET ou acetato. O PET exibe uma resistência física superior à do acetato e é capaz de suportar temperaturas mais elevadas. Devido a essas propriedades, alguns resultados da aplicação de

plasma frio em PET assemelham-se aos resultados obtidos com acetato. A Figura 38 demonstra que um tempo de 10 segundos é suficiente para causar alterações na superfície do PET. Entretanto, mesmo com o aumento da distância, não foi observada uma alteração significativa no ângulo de contato em comparação com a aplicação em acetato no mesmo intervalo de tempo.

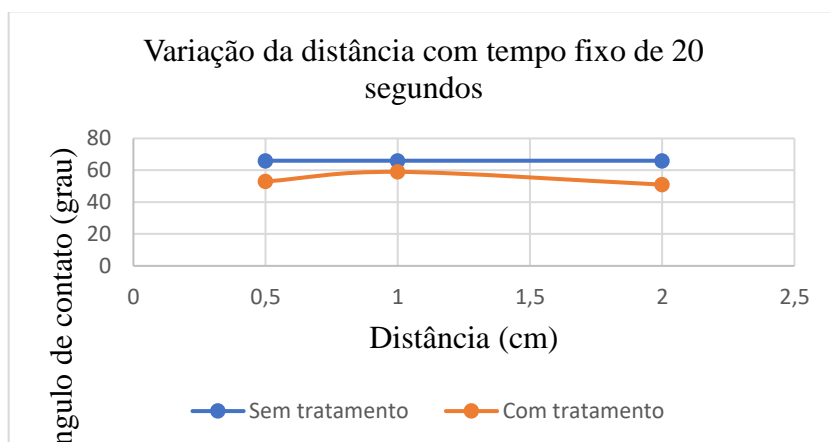
Figura 38. Variação da distância com tempo fixo de 10 segundo (PET).



Fonte: Próprio Autor

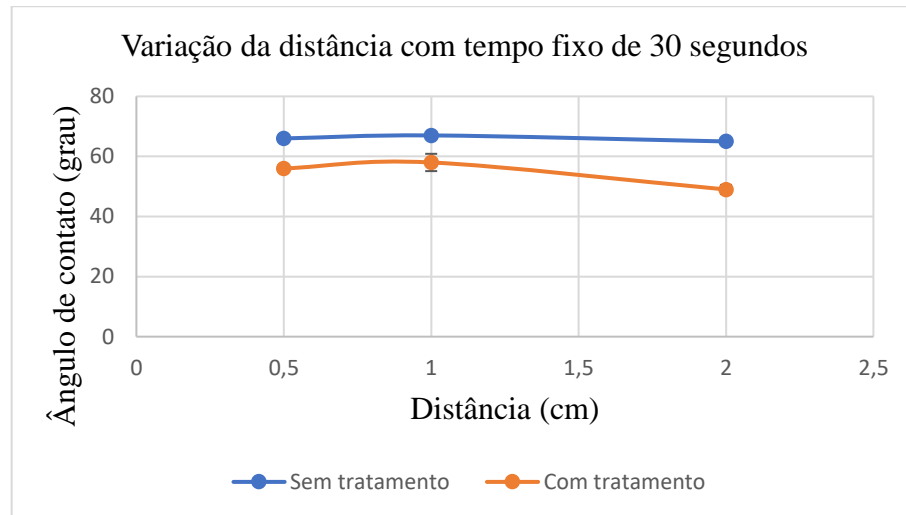
Na figura 39 e 40 é possível verificar uma semelhança na curva com tratamento onde o tratamento com tempo fixo de 20 segundo mostra que conforme a distância vai aumentando o ângulo de contato também aumenta, mas na distância de 2 centímetros se tem um ângulo próximo ao ângulo de contato com a distância de 0,5 centímetros e isso é visto com a amostra com tempo de 30 segundos, porém com o ângulo de contato com a distância de 1 centímetro mais próximo ao ângulo de contato da distância de 0,5 centímetros, isso pode ser devido ao maior tempo de tratamento da amostra.

Figura 39. Variação da distância com tempo fixo de 20 segundos (PET).



Fonte: Próprio Autor

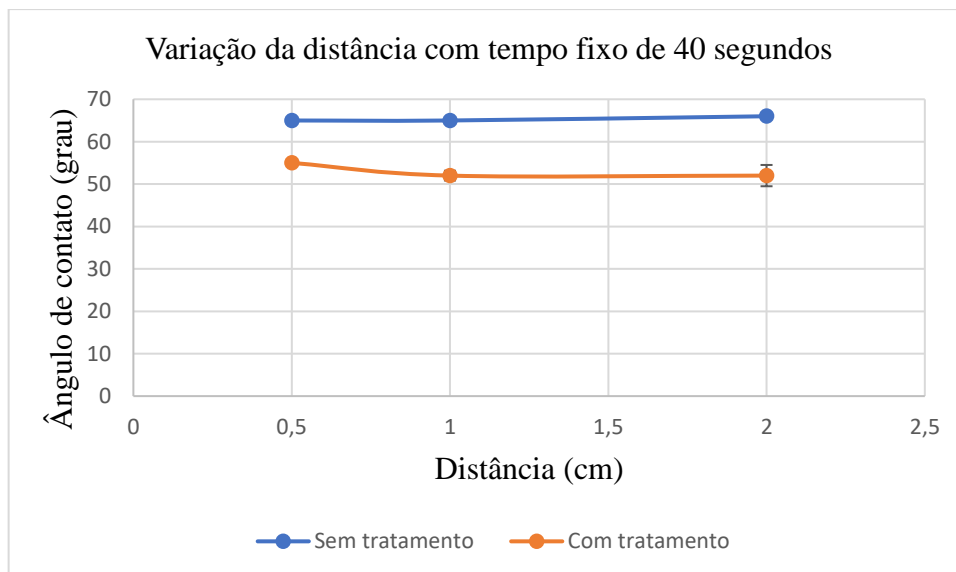
Figura 40. Variação da distância com tempo fixo de 30 segundos (PET).



Fonte: Próprio Autor

Na figura 41 é possível verificar que a distância não está fazendo diferença para alteração no ângulo de contato.

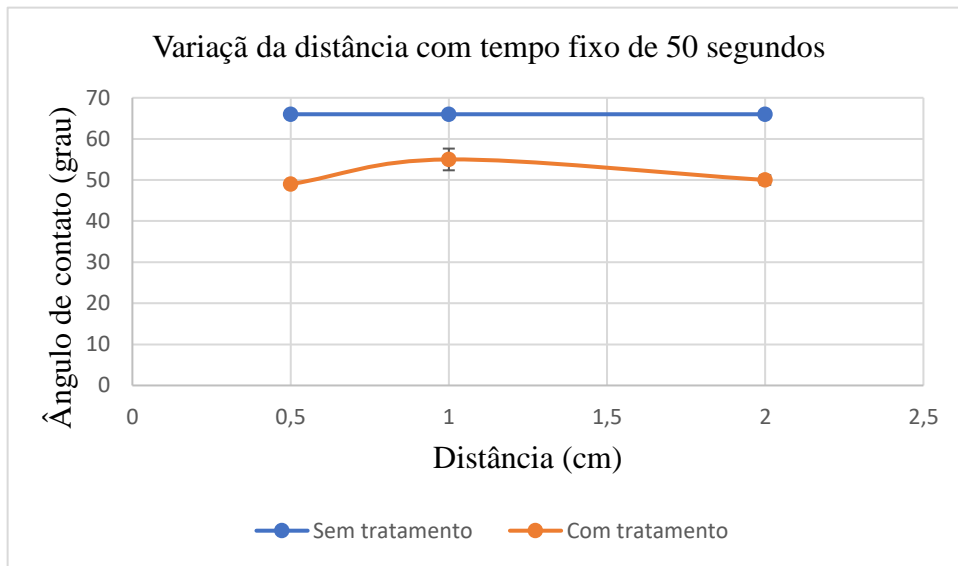
Figura 41. Variação da distância com tempo fixo de 40 segundos (PET).



Fonte: Próprio Autor

Na figura 42 onde mostra o tratamento com tempo fixo de 50 segundos é possível verificar a mesma tendência em relação a distância e o ângulo de contato.

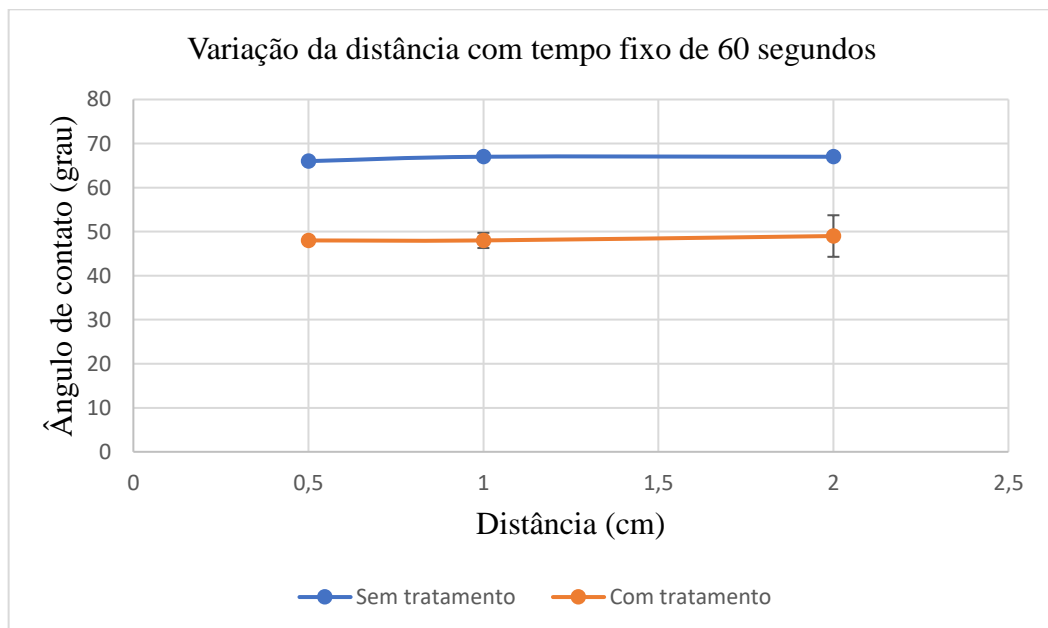
Figura 42. Variação da distância com tempo fixo de 50 segundos (PET).



Fonte: Próprio Autor

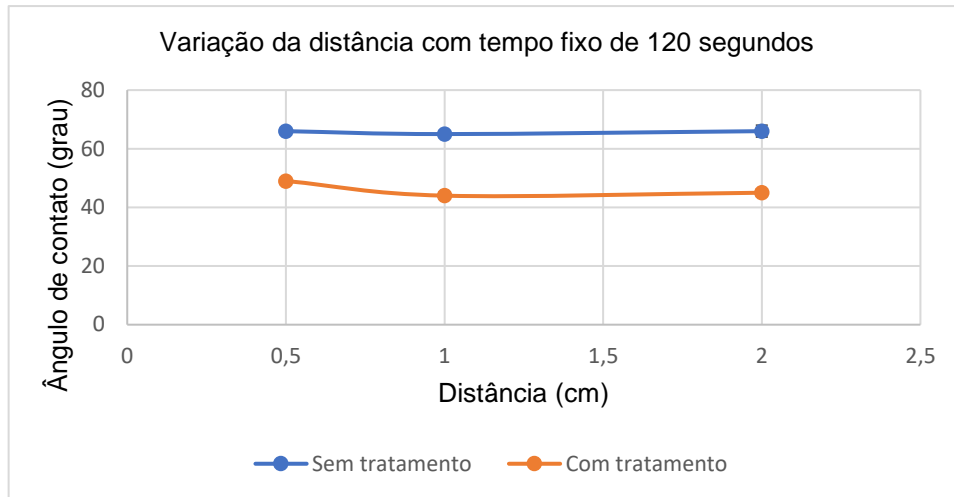
Os gráficos com os tempos de 60 segundos e 120 segundos (Figura 43 e 44) é possível perceber também que a distância não está fazendo efeito tão significativo comparado as amostras de acetato, porém se comparamos o ângulo de contato em relação ao tempo de exposição é possível verificar que com o aumento do tempo o ângulo de contato continua a diminuir.

Figura 43. Variação da temperatura com tempo fixo de 60 segundos (PET).



Fonte: Próprio Autor

Figura 44. Variação da distância com tempo fixo de 120 segundos (PET).

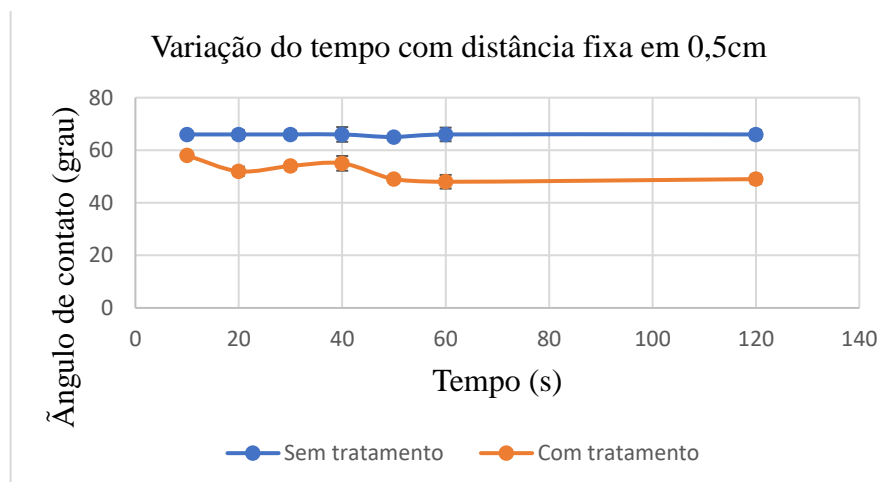


Fonte: Próprio Autor

Isso mostra que o pet tem uma característica de maior resistência que o acetato para receber partículas de ions, neutras e outras espécies reativas. Deve ser levando em consideração que a composição do pet influencia na interação das espécies reativas podendo ser positiva para uma melhora no ângulo de contato ou gerando algum dano na sua superfície se a distância for muito próxima.

Partindo para fazer uma análise da variação do tempo com a distância fixa é possível verificar na figura 45 que conforme o tempo aumenta o ângulo de contato tende a diminuir sugerindo que a superfície do pet acumula bastante espécie reativa. Mas nos tempos de 50,60 e 120 segundos é mostrado uma tendência de não haver mais alteração no ângulo de contato já que a curva tende a ficar linear.

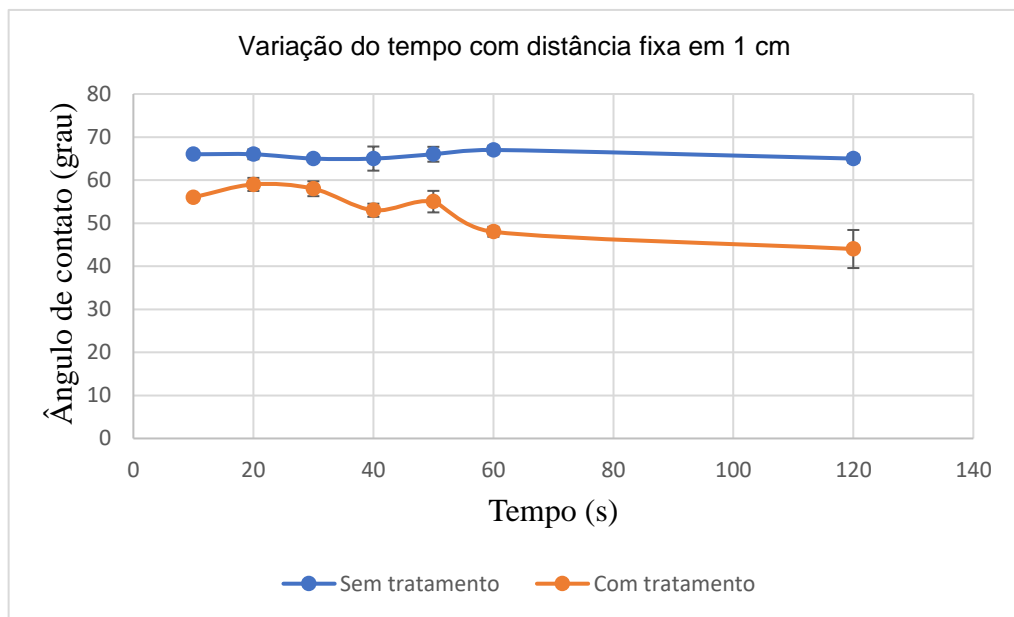
Figura 45. Variação do tempo com distância fixa em 0,5 centímetros (PET).



Fonte: Próprio Autor

A figura 46 é possível verificar que a distância de 1 centímetro fixa com variação no tempo mostrou no tempo de 10,20 e 30 segundos um crescimento no ângulo de contato e partir dos 40 segundos houve uma queda no ângulo de contato e assim foi para os tempos de 50,60 e 120 segundos, confirmando que quanto maior o tempo menor será o ângulo de contato.

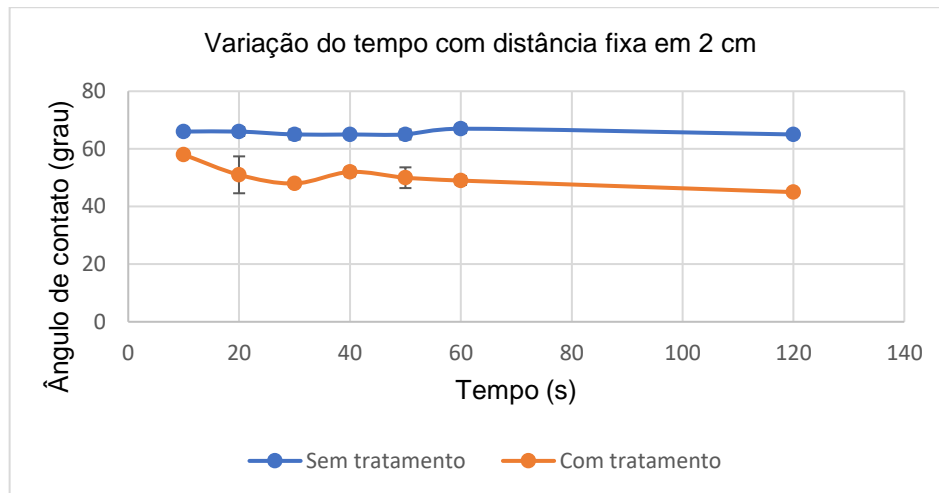
Figura 46. Variação do tempo com distância fixa em 1 centímetro (PET).



Fonte: Próprio Autor

Na figura 47, é possível verificar uma tendência na curva de tratamento que não foi observada em outras curvas. Os ângulos de contato demonstraram uma tendência a diminuir conforme os tempos de 10, 20 e 30 segundos passavam. Em seguida, é possível reparar em uma tendência de aumento da curva com os tempos de 40, 50, 60 e 120 segundos. Assim, é possível dizer que a eficiência do plasma na superfície de PET, com distância de 2 centímetros, está nos tempos de 10, 20 e 30 segundos para se obter uma região hidrofílica.

Figura 47. Variação do tempo com a distância fixa em 2 centímetros.



Fonte: Próprio Autor

3.4 Aplicação de plasma frio em Polietileno de baixa densidade (PEBD)

3.4.1 Teste de goniometria

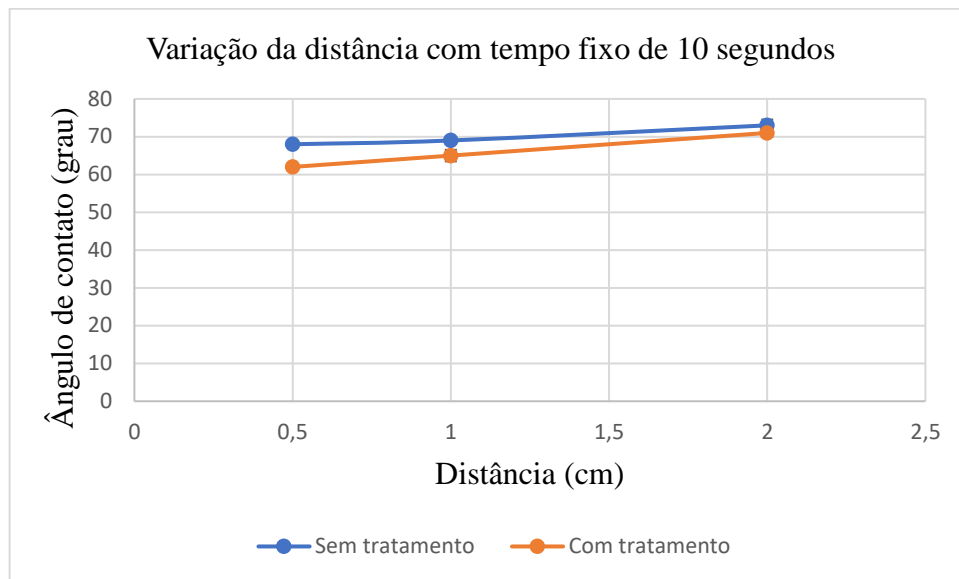
Assim como as demais amostras foi feito teste de goniometria nas amostras de polietileno de baixa densidade.

3.4.2 Aplicação de plasma frio em polietileno de baixa densidade (PEBD)

Dentro as 3 matérias usado o polietileno de baixa de densidade é o que apresenta característica físicas distintas. Ele é flexível sua plasticidade e resistência é maior que as dos outros. Devido a isso foi necessário colar as amostras em uma superfície rígida.

Os testes se mostraram positivo, é possível observar na figura 48 que o tempo de 10 segundo fixo variando a distância de 0,5 centímetros, 1 centímetros e 2 centímetros constatou uma diminuição no ângulo de contato, com o aumento da distância percebe que o ângulo de contato tende aumentar.

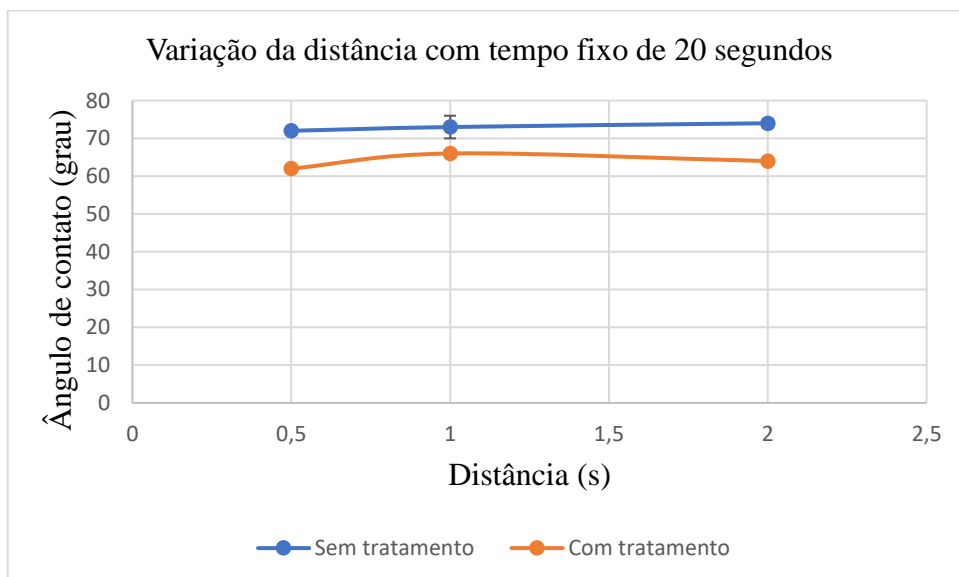
Figura 48 Variação da distância com tempo fixo em 10 segundos (PEBD)



Fonte: Próprio Autor

Na figura 49 é possível verificar que com o tempo de 20 segundos a curva de tratamento foi semelhante à de 10 segundos, porém com uma tendência de se torna uma curva mais linear. Mesmo com essa tendência o ângulo de contato diminuiu com o aumento do tempo.

Figura 49. Variação da distância com tempo fixo de 20 segundos (PEBD).

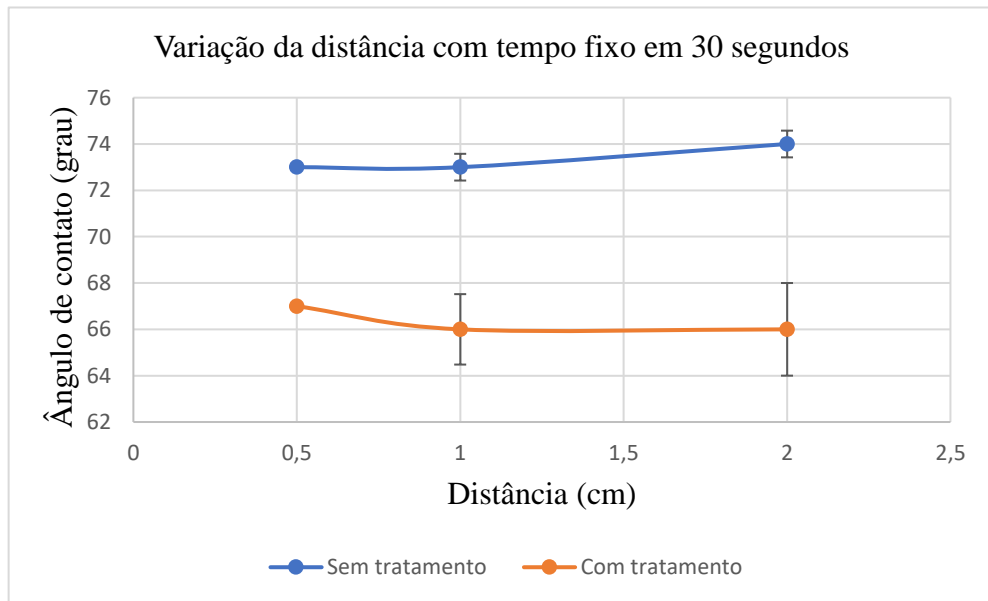


Fonte: Próprio Autor

Assim com visto na figura 49, a tendência de diminuir o ângulo de contato com o aumento do tempo, isso é verificado na figura 50 onde o tempo é de 30 segundos é

possível verificar uma diminuir significativa em relação aos tempos de 10 e 20 segundos.

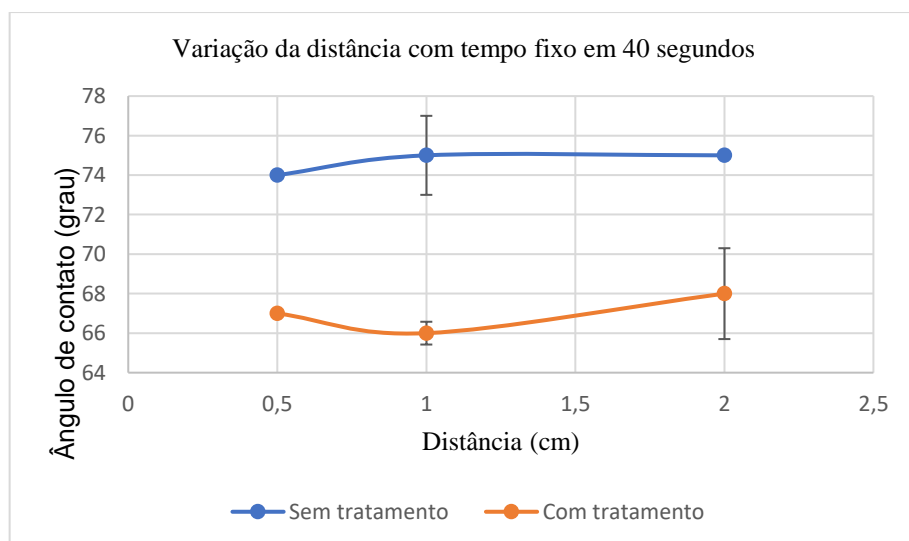
Figura 50. Variação da distância com tempo fixo em 30 segundos (PEBD).



Fonte: Próprio Autor

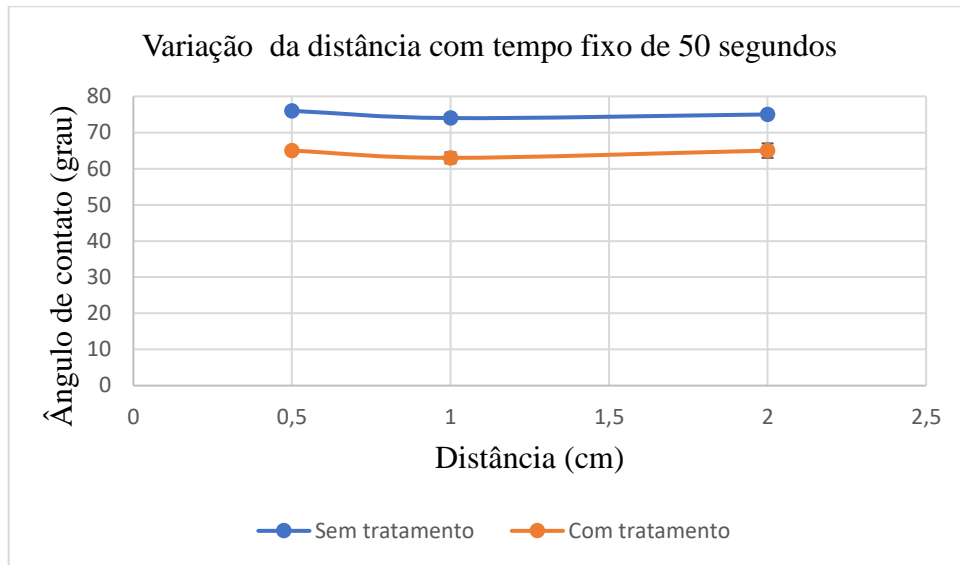
Na figura 51 onde a aplicação de plasma é feita por 40 segundos é possível verificar que a curva trata é semelhante a curva de 30 segundo o que se pode considerar que tempos de 30 e 40 segundos atingem o mesmo resultado em relação ao ângulo de contato.

Figura 51. Variação da distância com tempo fixo em 40 segundos (PEBD).



Fonte: Próprio Autor

Figura 52. Variação da distância com tempo fixo de 50 segundos (PEBD).

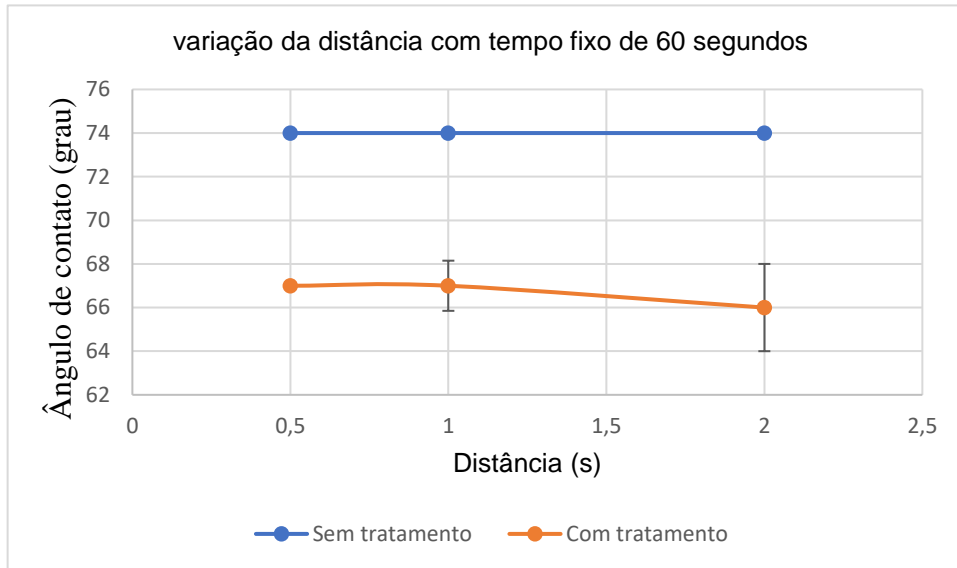


Fonte: Próprio Autor

Na figura 52 onde o tempo de aplicação foi de 50 segundos é possível verificar uma diminuição no ângulo de contato, porém a variação da distância não mostra um aumento no ângulo de contato significativo em relação aos outros tempos. Isso pode ter ocorrido devido às características do plasma que não são conhecidas e por se tratar de uma fonte de alta tensão não comercial é possível que exista uma variação no plasma criado e que as espécies reativas criadas nos outros tempos não sejam criadas com tempos de 40 segundos.

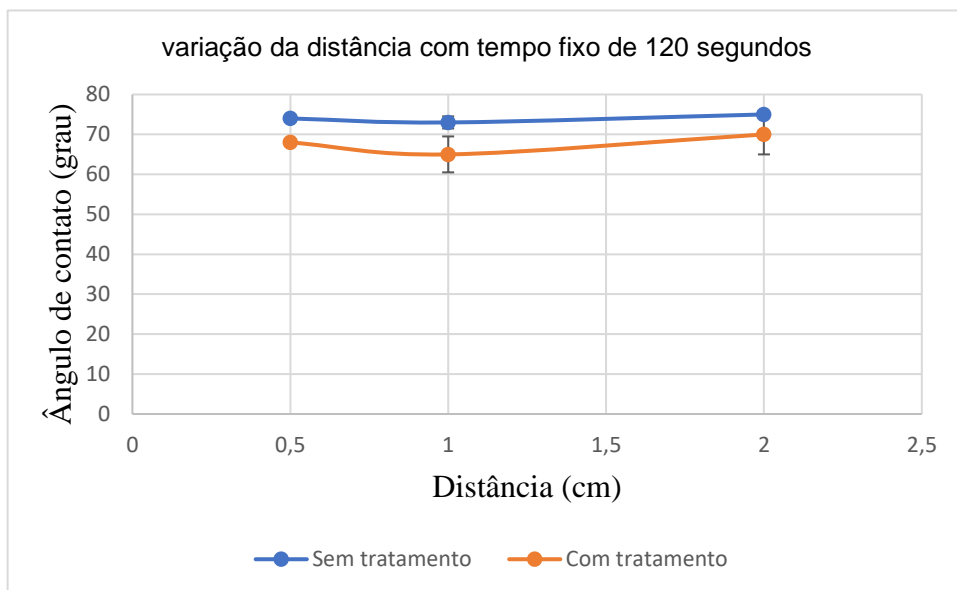
As figuras 53 e 54 mostram os gráficos com aplicação de 60 segundos e 120 segundos. É possível verificar que houve alteração no ângulo de contato, porém o tempo de aplicação não causou uma alteração no ângulo de contato. Se comparados aos outros tempos é possível concluir que tempos menores de exposição ao plasma têm mais interação na superfície do polietileno de baixa densidade do que os tempos maiores com 60 segundos e 120 segundos. Podemos considerar esses tempos como a saturação da alteração do ângulo de contato.

Figura 53. Variação da distância com tempo fixo de 60 segundos (PEBD).



Fonte: Próprio Autor

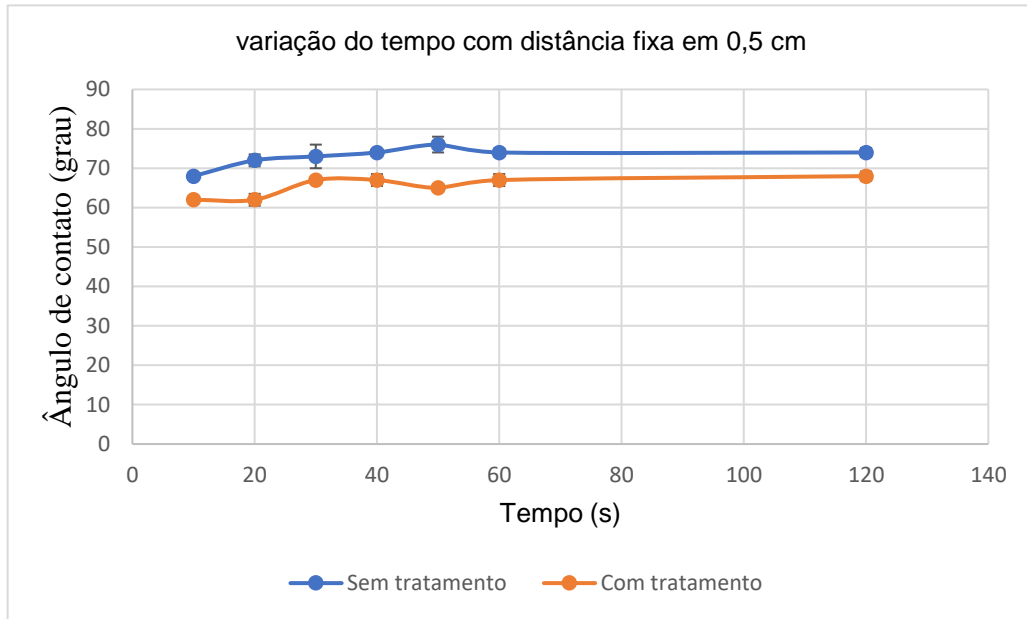
Figura 54 Variação da distância com tempo fixo de 120 segundos (PEBD)



Fonte: Próprio Autor

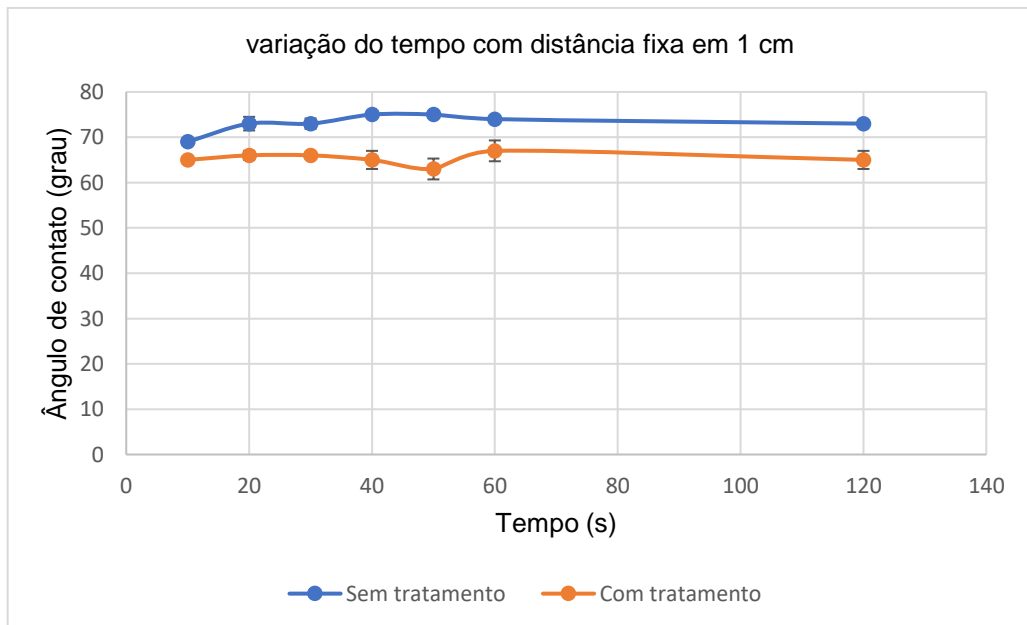
Figura 55 é possível verificar que no gráfico de distância fixa em 0,5 centímetros e variação no tempo. É possível verificar que os tempos de 10 e 20 segundos foram os que deram o menor ângulo de contato, porém aumentando o tempo o ângulo de contato teve um aumento e mostrou uma tendencia de ficar linear.

Figura 55. Variação do tempo com distância fixa em 0,5 centímetros (PEBD).



Fonte: Próprio Autor

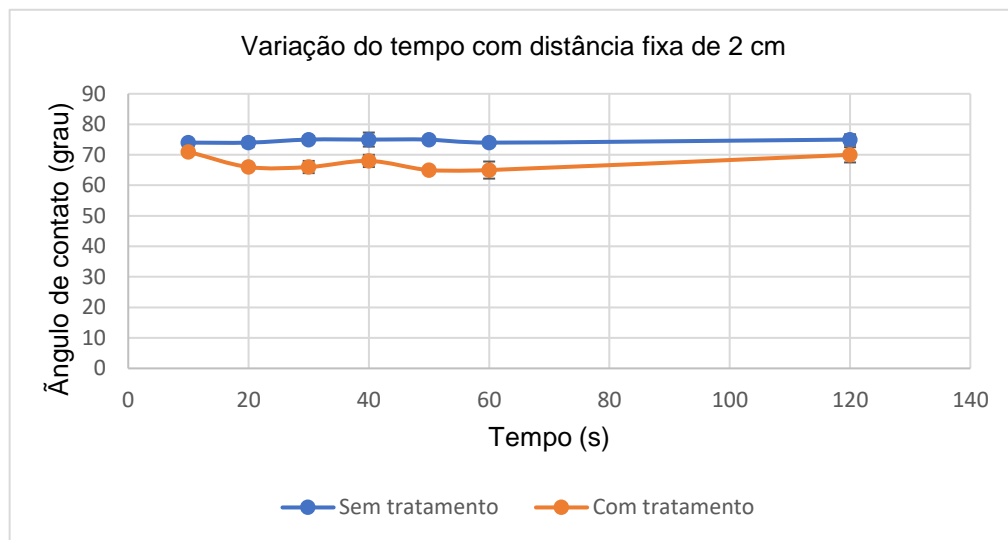
Figura 56. Variação do tempo com distância fixa em 1 centímetro (PEBD).



Fonte: Próprio Autor

Figura 56 mostra o gráfico com a distância fixa em 1 centímetro e assim como gráfico com a distância fixa em 0,5 centímetro ele demonstra não ter uma diminuição no ângulo de contato conforme o tempo vai aumentando de exposição ao plasma. Os tempos de 10,20,30 e 40 segundos alteração no ângulo de contato podemos dizer que foi a mesma é linear o resultado. Tempo de 50 segundos foi o que deu menor ângulo de contato, mas se consideramos o desvio padrão poderíamos considerar que ele teve mesmo resultado que os de 10 até 40 segundos. Os tempos de 60 e 120 segundos teve o mesmo padrão do gráfico da figura 55 os ângulos de contato saíram maiores com maior tempo de exposição enquanto os tempos de 10 até 40 segundos tiveram um ângulo de contato menor.

Figura 57. Variação do tempo com distância fixa de 2 centímetro (PEBD).



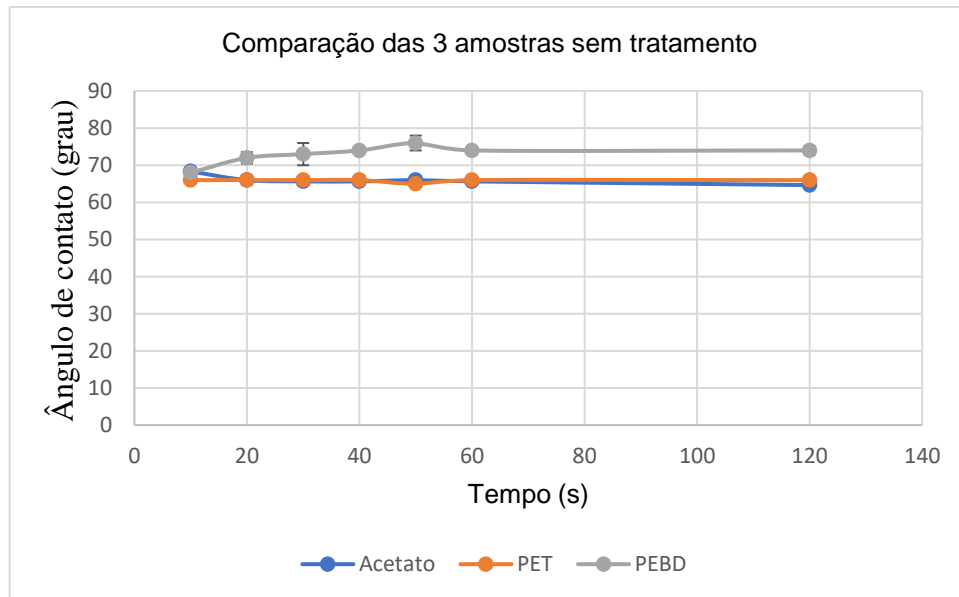
Fonte: Próprio Autor

Figura 57 mostrou um resultado diferente. É possível verificar que quanto maior o tempo menor é o ângulo de contato, porém é possível ver uma certa variação pequena, mas a tendência é esperada de acordo com a literatura quanto maior a exposição o plasma maior são seus efeitos. Os tempos de 20,30,40,50 e 60 mostraram uma linearidade, mas em comparação ao tempo de 10 segundos os efeitos são mais satisfatórios. O tempo de 120 acabou tendo um resultado bem próximo ao de 10 segundos

4 COMPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Na Figura 58, é possível verificar a comparação dos três materiais sem tratamento usados neste trabalho: Acetato, Polietileno Tereftalato (PET) e Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). Observa-se que o material PEBD parece ser o mais hidrofóbico. O acetato e o PET demonstram ter níveis semelhantes de hidrofobicidade.

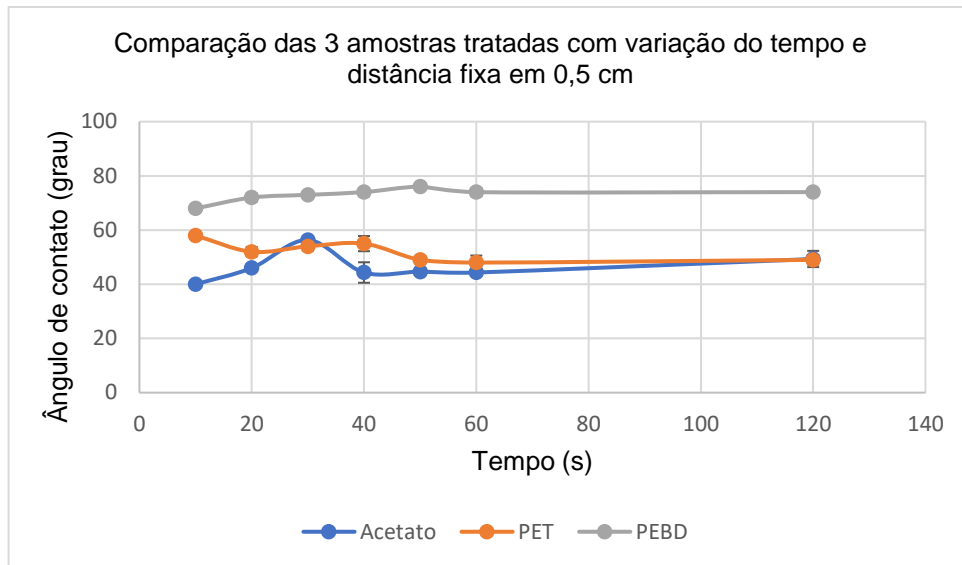
Figura 58. Comparação das 3 amostras Acetato, PET e PEBD sem tratamento.



Fonte: Próprio Autor

No gráfico da Figura 59, é possível verificar o ângulo de contato com a variação do tempo, com a distância fixa em 0,5 centímetros. Como mostrado nos gráficos da Figura 58, o PEBD manteve-se mais hidrofóbico do que o acetato e o PET e praticamente não teve alteração do ângulo com a variação do tempo. Porém, percebe-se uma diferença no ângulo de contato entre o acetato e o PET. O PET demonstrou que quanto maior a exposição ao plasma, menor será o ângulo de contato e os tempos de 60 e 120 segundos, já demonstram uma estabilidade no ângulo de contato. O acetato mostrou nos tempos de 10, 20 e 30 segundos um aumento no ângulo de contato e logo após os 30 segundos houve uma queda, mostrando uma instabilidade no ângulo de contato. Mesmo com essa instabilidade, o acetato mostrou ser o material que mais ficou hidrofílico.

Figura 59. Comparação das 3 amostras tratadas com 0,5 centímetros de distância.



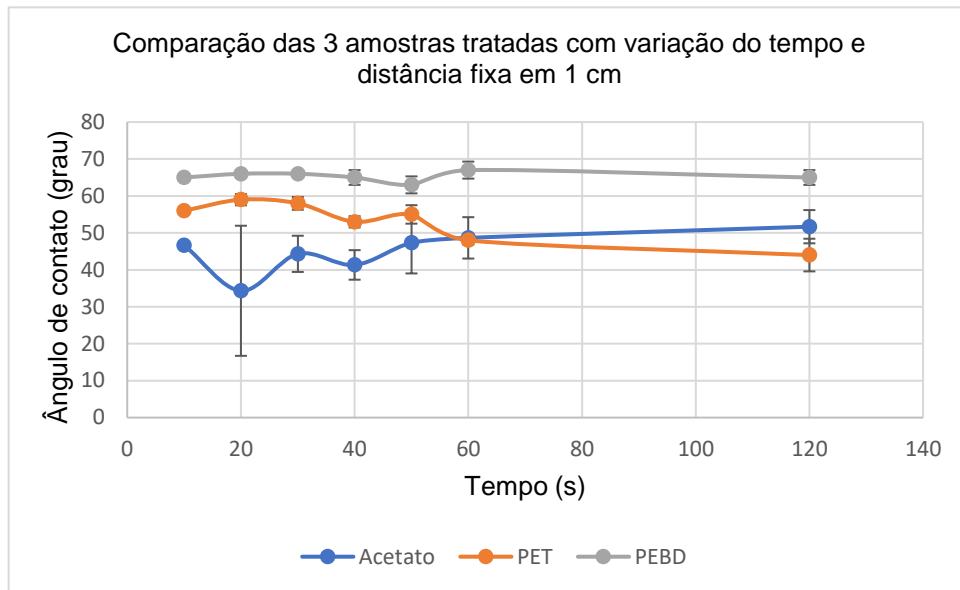
Fonte: Próprio Autor

Na Figura 60, o gráfico com a distância de 1 centímetro de tratamento revela comportamentos específicos dos materiais após a exposição ao plasma. Novamente, o PEBD destaca-se ao apresentar o maior ângulo de contato. Contudo, ao longo do tempo, observa-se uma diminuição progressiva desse ângulo, indicando que as modificações superficiais estão tornando o PEBD menos hidrofóbico. Notavelmente, a partir do tempo de 50 segundos, o ângulo de contato atinge uma estabilidade, sugerindo que a superfície atingiu um estado de equilíbrio em relação à sua hidrofobicidade.

Para o PET, o ângulo de contato aumenta até o tempo de 30 segundos, seguido por uma queda, indicando uma tendência de diminuição da hidrofobicidade com o tempo. Em contraste, o acetato, mantendo sua posição como o material mais hidrofílico dos três, desta vez apresenta uma distância considerável em relação ao PET. À medida que o tempo aumenta, o ângulo de contato do acetato também aumenta, comportamento oposto à curva de tratamento do PET, que diminui com o aumento do tempo.

Esse aumento no ângulo de contato do acetato ao longo do tempo pode ser atribuído à possibilidade de ter atingido uma saturação na modificação da superfície. Isso sugere que a quantidade de grupos funcionais ou modificações atingiu um limite, levando a um aumento no ângulo de contato.

Figura 60. Comparação das 3 amostras tratadas com 1 centímetros de distância.



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 61, que exibe o gráfico com uma distância fixa de 2 centímetros, observamos comportamentos distintos nos materiais tratados com plasma. O PEBD, embora mantenha sua característica de ser o mais hidrofóbico dos três, demonstra uma diminuição no ângulo de contato à medida que o tempo de tratamento aumenta. Esse padrão sugere que a modificação de sua superfície durante o tratamento resulta em uma redução da hidrofobicidade.

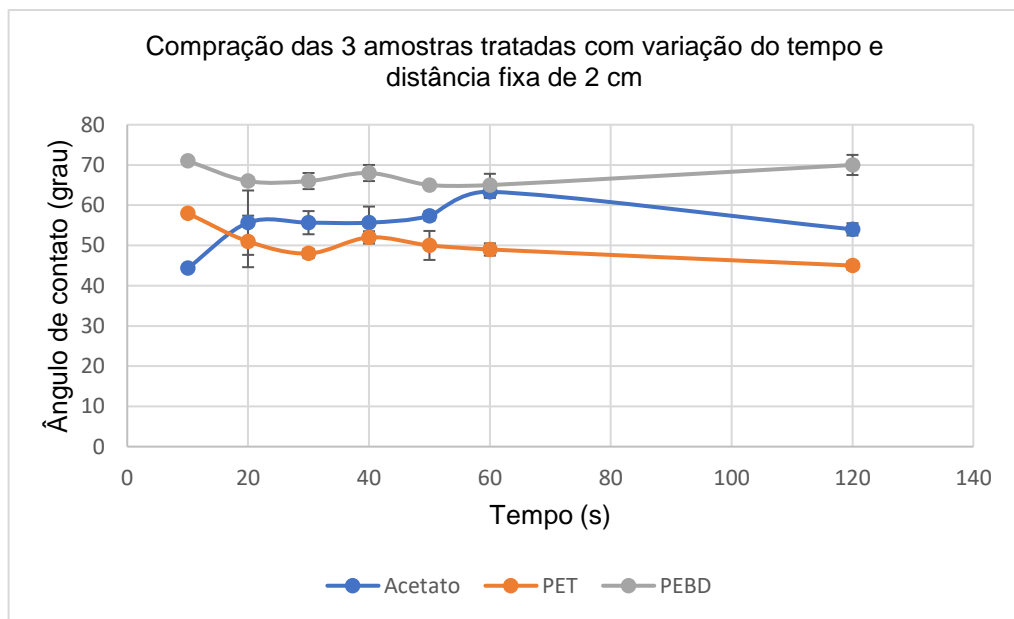
Em contraste, o acetato apresenta uma dinâmica mais complexa. Após um aumento inicial no ângulo de contato nos primeiros 10 segundos, mantém-se estável até o tempo de 50 segundos. Contudo, no intervalo de 60 segundos, ocorre um aumento, seguido de uma diminuição no último tempo de 120 segundos. Essa variação pode indicar uma resposta específica desse material às condições de tratamento, como reações químicas complexas ou alterações morfológicas que impactam sua hidrofobicidade.

O PET, por sua vez, exibe um comportamento inverso. Apresenta uma clara diminuição no ângulo de contato nos tempos iniciais (10, 20 e 30 segundos), indicando um aumento na hidrofobicidade após o tratamento com plasma. Posteriormente, mantém-se com pouca alteração, sugerindo que as modificações superficiais podem

ter atingido um equilíbrio ou que as mudanças adicionais não são significativas nesse contexto.

Esses resultados destacam a complexidade das interações entre os materiais e o tratamento com plasma. A variação ao longo do tempo indica processos dinâmicos de modificação de superfície, sendo influenciados por fatores como a natureza intrínseca dos materiais, a intensidade do tratamento, a distância do plasma e a composição do gás utilizado.

Figura 61. Comparação das 3 amostras tratadas com 1 centímetros de distância.



Fonte: Próprio Autor

5 CONCLUSÃO

A aplicação de plasma frio emergiu como uma abordagem promissora para modificar as propriedades de superfície de materiais diversos. O reator de descarga elétrica de alta tensão revelou uma eficácia consistente, proporcionando resultados notáveis nos materiais examinados: acetato, polietileno tereftalato (PET) e polietileno de baixa densidade (PEBD).

Os experimentos detalhados indicaram nuances significativas nas respostas dos materiais ao tratamento com plasma. No caso do acetato, observou-se uma sensibilidade particular ao tempo de exposição, com períodos entre 10 e 20 segundos demonstrando maior eficácia na modificação da superfície. O PET, por sua vez, revelou características distintas de resistência e interação com espécies reativas, influenciando diretamente os resultados. Já o PEBD, de características físicas únicas, apresentou respostas complexas, destacando-se pela necessidade de tempos mais curtos para otimizar a alteração.

A comparação entre os materiais, analisada através de ângulos de contato em diferentes distâncias e tempos, revelou comportamentos divergentes. O PEBD, embora inicialmente mais hidrofóbico, demonstrou uma redução da hidrofobicidade com o tempo de tratamento. Em contraste, o PET exibiu uma dinâmica de aumento inicial na hidrofobicidade, estabilizando-se posteriormente. O acetato, sendo o material mais hidrofílico, indicou saturação na modificação superficial com o aumento do tempo.

Os resultados fornecem resultados valiosos sobre a interação dinâmica entre os materiais e o plasma, ressaltando a complexidade desses processos. A sensibilidade à intensidade do tratamento, distância do plasma e composição do gás utilizado destaca a importância de uma compreensão aprofundada desses fatores para otimizar futuras aplicações práticas.

Este estudo não apenas evidencia a eficácia do plasma frio na modificação de superfícies, mas também destaca a necessidade de consideração cuidadosa das características intrínsecas dos materiais e das variáveis experimentais.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

1. **Avaliação de Outros Polímeros:** Expandir a pesquisa para incluir outros tipos de polímeros e avalie como diferentes materiais respondem à exposição ao plasma frio.
2. **Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR):**A FTIR pode ser usada para identificar alterações na composição química dos polímeros. Essa técnica é eficaz para detectar grupos funcionais, o que pode indicar modificações superficiais.
3. **Análise de Energia de Superfície (ESA):** A ESA permite a avaliação das propriedades de energia de superfície, incluindo componentes polar e dispersivo. Mudanças na energia de superfície podem influenciar a molhabilidade e a adesão.
4. **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):** MEV pode oferecer uma visão detalhada da morfologia da superfície, destacando alterações na rugosidade e estrutura superficial após o tratamento com plasma.
5. **Espectroscopia Fotoeletrônica de Raios X (XPS):** O XPS é uma técnica que pode fornecer informações sobre a composição superficial, identificando elementos na camada superficial dos materiais.
6. **Testes de Adesão:** Realize testes específicos de adesão para avaliar a capacidade dos polímeros tratados de aderir a revestimentos ou outros materiais.

REFERÊNCIAS

1. LIEBERMAN, M. A.; LICHTENBERG, A. J. **Principles of plasma discharges and materials processing**. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2005.
2. CHAPMAN, B. N. **Glow discharge processes : sputtering and plasma etching**. New York: Wiley, 1980.
3. CARVALHO, A.T.DE et al. Hydrophobic plasma polymerized hexamethyldisilazane thin films: characterization and uses. **Materials Research**, v. 9, n. 1, p. 9–13, mar. 2006.
4. FRIDMAN, A. A. **Plasma chemistry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
5. **Gerador de alta tensão fácil tutorial com flyback**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=g25RC0MiuN0&ab_channel=Pedronetic>. Acesso em: 12 jan. 2022.
6. **Gerador de Alta Tensão - O mais simples do mundo! Com Reator de Lâmpada + Flyback de TV**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5jq5GB9EEKg&ab_channel=MundoMecaMaker>. Acesso em: 12 jan. 2022.
7. **GERADOR DE ALTA TENSÃO CASEIRO MUITO SIMPLES**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LoluH2wMXIs&ab_channel=ATELET R%C3%94NICA>. Acesso em: 12 jan. 2022.
8. SELECTED ARTICLES PUBLISHED MDPI. **COLD PLASMA: characteristics and applications in medicine**. S.L.: Mdpi Ag, 2020.
9. LAROUSSE, M. Plasma Medicine: A Brief Introduction. **Plasma**, v. 1, n. 1, p. 47–60, 19 fev. 2018.
10. GORBANEV et al. Applications of the COST Plasma Jet: More than a Reference Standard. **Plasma**, v. 2, n. 3, p. 316–327, 12 jul. 2019.
11. PAULO, U. • U. F. DE S. **Os Cinco Estados da Matéria**. Disponível em: <<https://unifesp.medium.com/cinco-estados-da-materia-4a820b5023e0#:~:text=O%20objetivo%2C%20enfim%2C%20consiste%20na>>. Acesso em: 17 jun. 2021.

12. **Polietileno (PE): Tipos, Aplicações e Propriedades do Material.** Disponível em: <<https://maispolimeros.com.br/2019/02/20/polietileno-pe/>>.
13. heidemann, h. m. **tratamento com plasma frio para melhorar a adesão de filmes de amido a filmes de poliCAPROLACTONA E POLI(ÁCIDO LÁCTICO).** https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/206086/PE_NQ0803-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
14. FILGUEIRA, GABRIEL. **Estudo do efeito da água ativada por plasma no crescimento de plantas.**
15. ROSA, F.; OLIVEIRA, R. **Projeto e construção de uma fonte de alta-tensão para um gerador de microplasmas.**
16. VESEL, A.; ROK ZAPLOTNIK; GREGOR PRIMC. Evolution of the Surface Wettability of PET Polymer upon Treatment with an Atmospheric-Pressure Plasma Jet. v. 12, n. 1, p. 87–87, 3 jan. 2020.
17. PRIMC, G. Strategies for Improved Wettability of Polyetheretherketone (PEEK) Polymers by Non-Equilibrium Plasma Treatment. *Polymers*, v. 14, n. 23, p. 5319, 1 jan. 2022.