

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

Coordenação de Formação Científica

Lihoy Aguiar Bellissimo

**Instrumentação para mitigação do acúmulo de poeira estática em espelhos de detectores
usados no controle da qualidade da fabricação de tubos de vidro FIOLAX® *clear***

Rio de Janeiro - RJ

2025

Lihoy Aguiar Bellissimo

**Instrumentação para mitigação do acúmulo de poeira estática em espelhos de detectores usados no controle da qualidade da fabricação de tubos de vidro
FIOLAX® *clear***

Dissertação apresentada à Coordenação de Formação Científica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Física com ênfase em Instrumentação Científica.

Orientador: Alexandre Mello
Coorientador: Fabrício Frizera Borghi

**Rio de Janeiro - RJ
2025**

**"INSTRUMENTAÇÃO PARA MITIGAÇÃO DO ACÚMULO DE POEIRA
ESTÁTICA EM ESPELHOS DE DETECTORES USADOS NO CONTROLE
DE QUALIDADE DA FABRICAÇÃO DE TUBOS DE VIDRO FIOLEX®
CLEAR."**

LIHOY AGUIAR BELLISSIMO

Dissertação de Mestrado Profissional em Física
com ênfase em Instrumentação Científica,
apresentada no Centro Brasileiro de Pesquisas
Físicas do Ministério da Ciência Tecnologia e
Inovação. Fazendo parte da banca examinadora
os seguintes professores:

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE MELLO DE PAULA SILVA**
Data: 06/05/2025 15:12:04-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Alexandre Mello de Paula Silva - Orientador/CBPF

Documento assinado digitalmente
 **FABRÍCIO FRIZERA BORGHI**
Data: 06/05/2025 13:59:24-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Fabício Frizera Borghi – Coorientador/ UFRJ

Documento assinado digitalmente
 **ELIEL ELEUTÉRIO FARIAS**
Data: 04/05/2025 15:05:03-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Eliel Eleuteiro Farias - UFRR

Documento assinado digitalmente
 **ELVIS OSWALDO LOPEZ MEZA**
Data: 05/05/2025 21:25:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Elvis Oswaldo López Meza – UFRJ

Rio de Janeiro, 24 de fevereiro de 2025.

AGRADECIMENTOS

À minha família:

. **Minha mãe** Sulani Ferreira Aguiar pelo apoio e amor incondicionais, incansável na preocupação com a minha formação pessoal e acadêmica. Me sinto feliz em poder orgulhá-la com os resultados de cada realização;

. **Meu irmão** Mario Aguiar Bellissimo pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis e pela cumplicidade. Me sinto feliz em poder servir de inspiração a cada conquista e realização;

. **Minha tia** Francisca Ferreira Aguiar a quem sou grato pela ajuda e suporte no âmbito familiar e em toda compreensão e paciência em todos os desafios. Gratidão.

Aos professores orientadores:

. **Dsc. Alexandre Mello de Paula Silva** por acreditar no projeto e confiar no desenvolvimento e pela compreensão e paciência. Muito obrigado de coração;

. **Dsc. Fabrício Frizera Borgui** por todo o apoio, dicas e orientação quanto a utilização de métodos e ferramentas técnicas para o desenvolvimento do projeto. Agradeço cada segundo investido e todo o tempo dedicado.

A SCHOTT Brasil:

. **Dsc. Eric Wanko** gerente do departamento de matéria prima por me dar todo o suporte, orientações e por dedicar parte do seu tempo nas discussões sobre o projeto e nas reuniões acadêmicas com os meus orientadores. Gratidão;

. **Jahir Resende** gerente do departamento de automação e instrumentação da SCHOTT Brasil divisão vitrofarma, a quem sou grato pelo suporte, orientações, apoio, financiamento e oportunidade de desenvolvimento e crescimento profissional. Uma pessoa incrível que sempre me ajudou no crescimento profissional e pessoal, dotado de um caráter excepcional e visão ampla para o futuro. Um agradecimento especial e uma gratidão imensa pela sua grandiosidade e generosidade comigo;

. **Joerg Wagner** diretor da planta da SCHOTT Brasil pela confiança e pelo apoio. Agradeço a sua confiança no meu trabalho.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo projeto FAPERJ no programa de auxílio emergencial às pós-graduações do Estado do Rio de Janeiro.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo abordar a construção de uma instrumentação para a mitigação do acúmulo de poeira estática na superfície de espelhos de detectores industriais usados no controle de qualidade da fabricação de tubos FIOLAX® *clear* instalados nas linhas de produção em ambiente de indústria vidreira. A produção de tubos de vidro conta com diversos equipamentos para garantir a qualidade de produção e as especificações do produto. Dentre esses equipamentos estão os detectores de defeitos que possuem espelhos que refletem a superfície do tubo de vidro para os sensores que posteriormente serão transformados em imagens e sinais a serem analisados por um software especialmente desenvolvido para essa finalidade. O acúmulo de poeira na superfície do espelho afeta diretamente a detecção pois interfere no sinal enviado às câmeras dos detectores, acarretando na parada da linha de produção devido a necessidade de manutenção no equipamento para limpeza ou troca dos espelhos, gerando uma perda de até quinze horas mensais de produção. O método utilizado aborda uma combinação de vidro recoberto por filme fino de *Fluorine doped Tin Oxide* (FTO) e jato de ar ionizado, mudando a energia elétrica estática de superfície para mitigar o acúmulo de poeira estática e a ação mecânica do sopro de ar para afastá-las da área de interesse. O tratamento com ar ionizado apresentou o melhor resultado, onde foram encontrados sete vezes menos concentração de grãos de poeira em comparação com apenas o fluxo de ar não-ionizado e quinze vezes menos se comparado com as amostras do grupo controle (sem nenhum tratamento).

Palavras-chave: Espelhos, Poeira Estática, Filme Fino, FTO, Ar ionizado.

ABSTRACT

This thesis aims to address the construction of an instrumentation to mitigate the accumulation of static dust on the surface of mirrors of industrial detectors used in the quality control of the manufacture of FIOLAX® clear tubes installed in production lines in a glass industry environment. The production of glass tubes relies on a variety of equipment to ensure production quality and product specifications. Among these equipment are the defect detectors that have mirrors that reflect the surface of the glass tube to the sensors that will later be transformed into images and signals to be analyzed by software specially developed for this purpose. The accumulation of static dust on the surface of the mirror directly affects the detection because it interferes with the signal sent to the cameras of the detectors, resulting in the stoppage of the production line due to the need for maintenance on the equipment to clean or change the mirrors, generating a loss of up to fifteen monthly production hours. The method used approaches a combination of glass covered by *Fluorine doped Tin Oxide* (FTO) thin film and ionized air jet, changing the surface static electrical energy to mitigate the accumulation of dust and the mechanical action of air blowing to move them away from the area of interest. The treatment with ionized air showed the best result, where seven times less concentration of dust grains were found in comparison with the non-ionized air flow alone and fifteen times less when compared to the samples of the control group (without any treatment).

Keywords: Mirrors, Static Dust, Thin-Film, FTO, Ionized Air.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Foto com exemplos de produtos que podem ser fabricados a partir de tubos de vidro: a) carpule, b) seringa, c) ampola e d) frasco [1].....	16
Figura 2: Diagrama ilustrado da montagem do equipamento detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro: a) tubo de vidro na linha de produção, b) imagem do tubo de vidro, c) espelho de 1ª Superfície, d) imagem do tubo de vidro refletida pelo espelho, e) câmera e f) computador com software de aquisição e processamento de imagem do detector.	18
Figura 3: Estrutura interna de um dos detectores de defeitos nos tubos de vidro.	18
Figura 4: Ilustração do processo de mistura da matéria prima. Adaptado de [9].	22
Figura 5: Gráfico da viscosidade pela temperatura do vidro e suas faixas de trabalho. Adaptado de [10].	22
Figura 6: Ilustração mostrando a fusão da composição no forno industrial. Adaptado de [9].	23
Figura 7: Ilustração do processo de formação do tubo de vidro. Adaptado de [9].	23
Figura 8: Ilustração da entrada do tubo de vidro nos equipamentos detectores. Adaptado de [9]...	24
Figura 9: Representação da atração entre moléculas polares: a) duas moléculas dipolares com orientação atrativa; b) duas moléculas dipolares com orientação neutra; c) duas moléculas dipolares com orientação repulsiva. Adaptado de [12].	25
Figura 10: Ilustração de um dipolo-dipolo induzido. Adaptado de [12].	26
Figura 11: Ilustração das interações eletrônicas entre dois átomos. Adaptado de [12].	26
Figura 12: Série triboelétrica [14].	27
Figura 13: Carregamento de superfícies triboeletrizadas. Adaptada de [15].	28
Figura 14: Montagem comparando a reflexão de espelhos onde a superfície espelhada está na primeira camada com os que a superfície espelhada está na camada traseira Adaptado de [4].	29
Figura 15: Gráfico de percentual de reflexão do espelho pelo comprimento de onda (em nanômetros). Adaptado de [4].	30
Figura 16: Ilustração do experimento de Gray sobre eletricidade estática. A figura representa um garoto pendurado por cordas, com as mãos e face atraindo lâminas finas de latão ao ter o seu corpo em contato com um tubo de vidro atritado [17].	31

Figura 17: Estrutura cristalina do óxido de estanho (SnO_2) [19].	32
Figura 18: Estrutura da rede cristalina de $\text{SnO}_2\text{:F}$. Adaptado de [22].	33
Figura 19: Ilustração do campo eletromagnético incluindo a faixa do visível e ultravioleta [23]...	33
Figura 20: Ilustração da luz incidente em um átomo causando a excitação de seus elétrons para diferentes níveis de energia. Adaptado de [22].	34
Figura 21: Espelho do equipamento detector de defeitos com a superfície coberta de poeira.....	35
Figura 22: Esboço de um experimento usando campo elétrico e eletrodos na mudança de trajetória de grãos de areia soprados por um ventilador. Adaptada de [25].	36
Figura 23: a) FTO de 20 cm x 20 cm + cortador de vidro manual; b) FTO cortado em retângulos de 4 cm x 10 cm; c) FTO cortado em retângulos de 4 cm x 8 cm, marcado a caneta com um gabarito; d) área analisada de 1 cm x 2,5 cm.	37
Figura 24: Foto da placa de circuito eletrônico montado em case para trilho DIN ao lado do diagrama eletrônico do registrador de temperatura e umidade.	39
Figura 25: Código fonte do registrador de dados de temperatura e umidade relativa do ar desenvolvido.	40
Figura 26: Diagrama em blocos representando os passos de execução do registrador de temperatura e umidade relativa do ar.	41
Figura 27: Colagem de fotos do sistema de compressor de ar com filtro desenvolvido.	42
Figura 28: Ilustração da montagem do experimento.	43
Figura 29: Bancada de testes na linha de produção: a. Pistola de ar ionizado apontada para o vidro recoberto por FTO montada em suporte plástico, conforme a figura 25; b. Fonte geradora de tensão eletrostática; c. Sistema de aquisição de dados de temperatura e umidade relativa do ar (capítulo 6.5); d. Mostrador de temperatura e umidade relativa do ar; e. Fonte de 24Vcc (capítulo 6.5); f. Osciloscópio digital com registrador de dados.	44
Figura 30: Comparativo entre: a) espelho empoeirado; e, b) espelho novo; c) imagem de microscopia óptica com magnificação de 10X mostrando os grãos de poeira.	45
Figura 31: Resultado da transmitância do FTO no UV/VIS.	46
Figura 32: Imagem das amostras de FTO sendo exposta no ambiente de produção vidreira, termo-higrômetro [49] ao lado.	48

Figura 33: Gráfico da concentração de poeira pelo tempo de amostragem.	48
Figura 34: Gráfico de temperatura e umidade relativa durante o experimento.	49
Figura 35: Colagem da janela com o sinal medido e da tabela com os valores de tensão e frequência medidos com o osciloscópio.	50
Figura 36: Fotos das amostras de exposição dos experimentos de jato de ar ionizado e não ionizado e as suas concentrações de poeiras analisadas pelo <i>software</i> ImageJ.	51
Figura 37: Gráfico das concentrações de poeira após aplicação de jato de ar ionizado e não ionizado no período de 72 horas.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos comerciais de FTO.....	47
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
FTO – Fluorine doped Tin Oxide
UV/Vis Spectroscopy – Ultraviolet/Visible Spectroscopy
NBR – Norma Brasileira
H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico
SiO₂ – Dióxido de sílica
Na₂O – Óxido de sódio
CaO – Óxido de cálcio
PVC – Polyvinyl Chloride
SnO₂ – Óxido de estanho
F⁻ – Flúor
O₂⁻ – Oxigênio
SnO₂:F – Dióxido de estanho dopado com flúor
LabNano – Laboratório de nanotecnologia
DIN – Deutsches Institut für Normung
SD – Solid Disc
RTC – Read Time Clock
DC – Direct Current
IDE – Integrated Development Environment
LED – Light Emitting Diode
W – Watt
A – Ampère
SMF – Sintered Metal Filter
V_{cc} - Volts Corrente Contínua
ml – Mililitros
mm – Milímetros
m – Metro
l/h – Litros por hora
mbar – Milibar
cm – Centímetros
kV – Kilovolt
Mhz – Megahertz
µm – Micrômetro
UR – Umidade Relativa
°C – Graus Celsius
mV – Miliolt
Khz – Kilohertz
V – Volts
U/cm² – Unidades por centímetro quadrado
JAI – Jato de Ar ionizado
JA – Jato de Ar
AP – Amostras Preliminares

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Contextualização.....	16
1.2 Motivação.....	17
1.3 Detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro.....	17
2 OBJETIVOS.....	19
3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TUBOS DE VIDRO FIOLAX® clear.....	20
3.1 Estrutura vítrea ou vidros.....	20
3.2 Classificação de tipos de vidro.....	20
3.3 Processo de fabricação dos tubos de vidro FIOLAX® clear.....	21
3.3.1 Linha de produção de tubos de vidro.....	23
3.3.2 Equipamentos detectores de defeitos nos tubos de vidro.....	24
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
4.1 Forças de Van der Waals.....	25
4.3 Efeito triboelétrico.....	27
4.2 Espelho de primeira superfície.....	28
4.3 Efeito eletrostático.....	30
4.4 Filme fino de fluorine doped tin oxide (FTO).....	31
4.5 Espectroscopia UV/Visível.....	33
5 EFEITO ELETROSTÁTICO NO ACÚMULO DE POEIRA NOS DETECTORES.....	35
6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
6.1 Vidro recoberto por filme fino de fluorine doped tin oxide (FTO).....	37
6.2 Preparação das amostras de vidro recoberto por filme fino de FTO.....	37
6.3 Procedimento para determinação da quantidade de poeira aderida à superfície do vidro recoberto por filme fino de FTO.....	37
6.4 Caracterização do vidro recoberto por filme fino de FTO.....	38
6.5 Monitoramento das condições ambientais do experimento.....	38
6.6 Compressor com filtro desenvolvido para o experimento.....	41
6.7 Montagem do experimento.....	43
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
7.1 Análise do espelho.....	44
7.2 Caracterização do FTO.....	45
7.3 Determinação da taxa de deposição dos grãos de poeira em condições de produção vidreira.....	47
7.4 Influência da ionização da superfície no acúmulo de poeira.....	49
8 CONCLUSÕES.....	53
9 DESAFIOS FUTUROS.....	54
BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS.....	55
ANEXO A - DATASHEET DO SENSOR DHT11.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Este trabalho de pesquisa é uma parceria entre o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e a empresa *SCHOTT Technologies Brazil Ltda.* A *SCHOTT Technologies Brazil* é parte da SCHOTT AG, um grupo industrial internacional de origem alemã dedicado à fabricação de vidros especiais para diversas finalidades, entre elas para a fabricação de vidros de envases farmacêuticos.

A produção de tubos de vidro é essencial para a indústria farmacêutica pois está diretamente ligada ao envase, armazenamento, transporte e aplicação de medicamentos e substâncias controladas nas áreas de pesquisa e medicina. Através de uma cadeia de indústrias de transformação, os tubos são moldados e se tornam ampolas, seringas, carpules, entre outros com finalidades similares, representados na figura 1.



Figura 1: Foto com exemplos de produtos que podem ser fabricados a partir de tubos de vidro: a) carpule, b) seringa, c) ampola e d) frasco [1].

Para garantir a qualidade e as especificações do produto, existem equipamentos medidores e detectores de defeitos nos tubos de vidro ao longo da linha de produção [2].

Em um ambiente industrial de produção vidreira há a presença de diversos particulados de grãos de poeira em suspensão no ar. Essa poeira afeta diretamente os detectores através do seu acúmulo sobre os espelhos onde a imagem da superfície do tubo de vidro é refletida para as câmeras que geram e enviam as imagens para um software de detecção e controle digital computadorizado.

1.2 Motivação

Em todo o processo de produção dos tubos de vidro das linhas de produção da fábrica existem equipamentos detectores ópticos de aquisição de imagens que garantem a qualidade na detecção de defeitos nos tubos de vidro. Devido ao acúmulo gradativo de poeira nas superfícies dos espelhos se faz necessário uma intervenção nos equipamentos detectores para realizar a limpeza dos espelhos e conjuntos ópticos das câmeras. Essa intervenção para a realização de limpeza nos espelhos dos equipamentos ocorre quando o percentual de perdas no processo produtivo está incompatível com as análises realizadas a cada hora por amostras manuais. A intervenção para a limpeza dos espelho também pode gerar risco de contaminação do produto pois durante o processo é necessário abrir o equipamento, expondo o seu interior, utilizar lenços, álcool isopropílico e jato de ar em spray [3] e, portanto, podendo espalhar poeira no seu interior. Durante o processo de intervenção para limpeza o equipamento é desligado, gerando perdas de produção que podem chegar a quinze minutos de pausa.

Outro risco inerente à realização da limpeza dos espelhos é a possibilidade de causar arranhões e ter que substituir o equipamento, pois não há como substituir o espelho com o equipamento instalado na linha de produção. Neste caso, o tempo entre a substituição do equipamento, movimentação para a oficina de manutenção, processos administrativos, parametrizações e *checklist* de operação para a retomada do processo produtivo pode chegar a cerca de uma hora.

1.3 Detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro

A linha de produção de tubos de vidro da SCHOTT *Technologies Brazil* possui alguns detectores de defeitos na superfície dos tubos de vidro. Dentre eles, alguns utilizam a técnica de reflexão da imagem da superfície do tubo de vidro através de um espelho de 1ª superfície com revestimento de alumínio [4]. O espelho de primeira superfície é aquele em que o revestimento reflexivo é aplicado diretamente sobre o vidro. Esse espelho é utilizado devido a sua característica reflexiva total dos objetos no primeiro plano a fim de não haver distorções e sombras fantasmas na imagem refletida [4]. O espelho é fixo na estrutura do medidor e faz um ângulo de 45° com a câmera, também fixa. A câmera, por sua vez, é conectada a um microcomputador que processa as imagens através de um *software* proprietário desenvolvido especificamente para essa finalidade. A figura 2 ilustra a montagem do aparato no equipamento detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro.

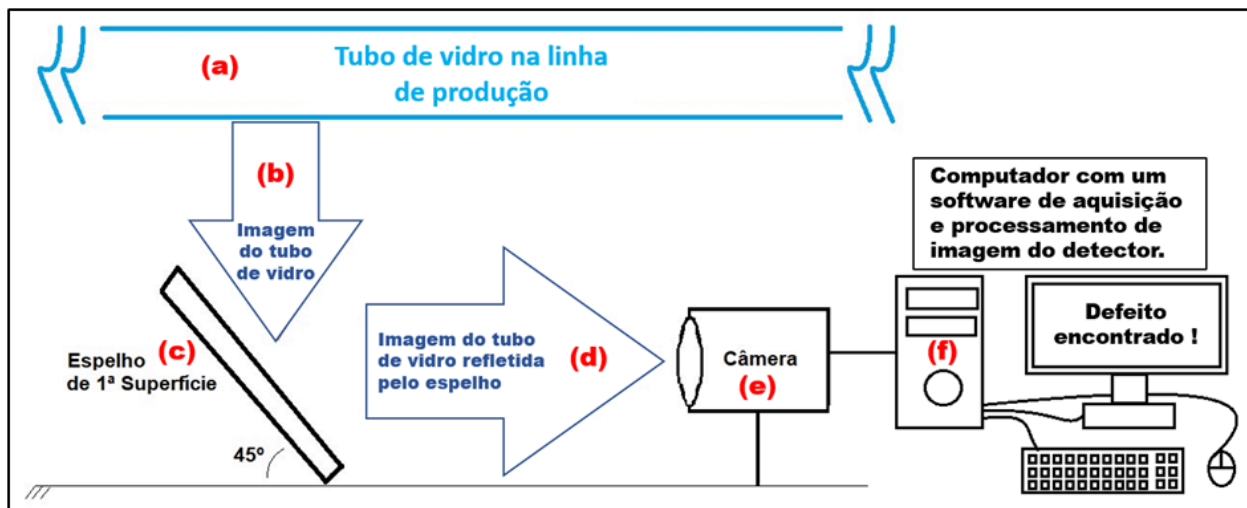


Figura 2: Diagrama ilustrado da montagem do equipamento detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro: a) tubo de vidro na linha de produção, b) imagem do tubo de vidro, c) espelho de 1ª Superfície, d) imagem do tubo de vidro refletida pelo espelho, e) câmera e f) computador com software de aquisição e processamento de imagem do detector.

O interior do equipamento detector de defeitos nos tubos de vidro possui uma câmera focada no espelho de primeira superfície que reflete a superfície do tubo de vidro em movimento na linha de produção, conforme pode ser observado na figura 3, abaixo.

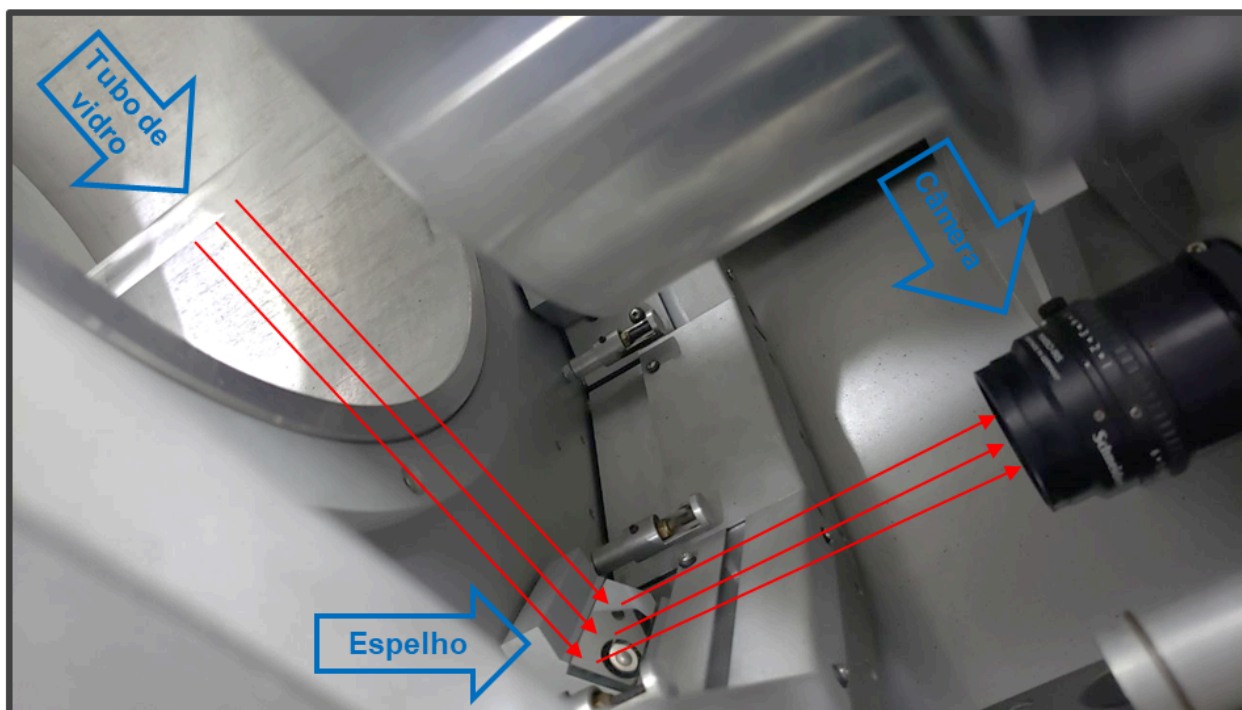


Figura 3: Estrutura interna de um dos detectores de defeitos nos tubos de vidro.

2 OBJETIVOS

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de desenvolver uma instrumentação para mitigar as perdas de produção de tubos de vidro da fábrica da empresa SCHOTT *Technologies Brazil* Ltda. As perdas são causadas pelas falhas de funcionamento de instrumentos industriais de detecção de defeitos por conta do acúmulo de grãos de poeira em suas superfícies. Durante o processo de produção e detecção, os tubos são descartados indevidamente pelo surgimento de artefatos gerados pelo acúmulo de poeira.

Objetivo principal:

- Desenvolver uma instrumentação para mitigar o acúmulo de poeira em superfícies espelhadas.

Entre os objetivos secundários, estão:

- a. Pesquisar a viabilidade de uso e aplicações de filmes finos que mitiguem a acumulação de poeira;
- b. Avaliar os efeitos de arraste do ar no afastamento físico dos grãos de poeira;
- c. Analisar a possibilidade de uso de ar comprimido ionizado para mudar a energia de superfícies espelhadas;

3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TUBOS DE VIDRO FIOLAX® *clear*

3.1 Estrutura vítrea ou vidros

Segundo Araújo [5], a história do vidro começa por volta de 4500 a.C., na Mesopotâmia e Egito, onde os primeiros artefatos de vidro foram criados, principalmente como objetos ornamentais e utilitários. Esses primeiros vidros eram compostos de uma mistura dos elementos sílica, sódio e cálcio, uma formulação que permanece essencial até hoje. O desenvolvimento do vidro sofreu um avanço significativo com os romanos, que introduziram técnicas como o sopro de vidro, permitindo a fabricação de recipientes em grande escala. No entanto, foi na Idade Média, especialmente em Veneza, que a produção de vidro alcançou novos níveis de sofisticação, com Murano se tornando o epicentro da produção de vidro de alta qualidade na Europa.

A definição de vidro tem sido objeto de debate entre os cientistas. De forma geral, o vidro é considerado um sólido amorfo, não cristalino, que é obtido pelo resfriamento rápido de um líquido. Essa definição, embora amplamente aceita, ainda gera controvérsias devido à complexidade da estrutura do vidro e às condições em que ele é produzido.

A transição vítrea, um fenômeno essencial na produção do vidro, ocorre quando um líquido super-resfriado se transforma em seu estado sólido sem passar por uma fase cristalina. Essa transição é determinada por parâmetros como a temperatura de transição vítrea, que varia conforme a composição do vidro e as condições de resfriamento.

Há uma gama grande de aplicação do vidro em diversas áreas da tecnologia moderna, desde sua utilização em fibras ópticas até a sua importância em dispositivos eletrônicos e na construção civil. O vidro, portanto, continua a desempenhar um papel crucial na inovação tecnológica e no avanço técnico e científico.

3.2 Classificação de tipos de vidro

Com base na Farmacopéia Européia [6], as embalagens de vidro para envase farmacêutico possuem quatro categorias, de acordo com tipo e aplicação:

- a. **Tipo I:** Essas embalagens são feitas de vidro borossilicato, que é neutro e altamente resistente a variações de temperatura e a reações químicas. São amplamente usadas para todos os tipos de preparações injetáveis, incluindo medicamentos administrados diretamente nas veias, como também para armazenar sangue e seus componentes.
- b. **Tipo II:** Essas embalagens são geralmente feitas de vidro sódico-cálcico, que é tratado para aumentar sua resistência química. Elas são apropriadas para armazenar soluções parenterais que são ácidas, neutras ou à base de água, garantindo que o conteúdo permaneça seguro e estável.
- c. **Tipo III:** Essas embalagens também são feitas de vidro sódico-cálcico, mas sem o tratamento adicional. Elas são adequadas para armazenar produtos que não são à base de água e para medicamentos injetáveis em forma de pó. Também são usadas para preparações farmacêuticas não injetáveis.

- d. **Tipo IV ou NP:** Essas embalagens são feitas de vidro sódico-cálcico com menor resistência química e são destinadas ao armazenamento de produtos sólidos não injetáveis. Também podem ser usadas para algumas preparações líquidas ou semi-sólidas que não precisam ser injetadas.

Conforme a Norma NBR 11819 (2004) [7], a classificação dos tipos de vidro baseia-se na resistência do material à água (resistência hidrolítica) ou na quantidade de álcali que ele libera, bem como nas propriedades mecânicas da embalagem, descritas a seguir:

- a. **Tipo I:** Vidro neutro do tipo borossilicato, não alcalino, de alta resistência térmica, mecânica e hidrolítica, com alcalinidade de até 1,0 mL de H₂SO₄ (0,01 mol/L) (ensaio em vidro moído). É usado para armazenar medicamentos que são administrados diretamente na corrente sanguínea e outras aplicações parenterais.
- b. **Tipo II:** Vidro alcalino do tipo sodo-cálcico, de resistência hidrolítica elevada, resultante do tratamento apropriado da superfície interna do vidro tipo III, de modo que sua alcalinidade seja no máximo 0,7 mL de H₂SO₄ (0,01 mol/L) para frascos de até 100 mL e 0,2 mL de H₂SO₄ (0,01 mol/L) para capacidade acima de 100 mL (ensaio em frasco de vidro inteiro). Destinado ao acondicionamento de soluções de uso parenteral, neutras e ácidas, que não tenham seu pH alterado.
- c. **Tipo III:** Vidro alcalino do tipo sodo-cálcico, de resistência hidrolítica média, porém com boa resistência mecânica, sem qualquer tratamento superficial, com alcalinidade máxima de 8,5 mL de H₂SO₄ (0,01 mol/L) (ensaio em frasco de vidro moído). Destinado ao acondicionamento de soluções para o uso tópico e oral, podendo ser utilizado para soluções parenterais, quando aprovado por ensaios de estabilidade.
- d. **NP (não parenteral):** Vidro alcalino do tipo sodo-cálcico, de resistência hidrolítica baixa e alta alcalinidade, de no máximo 15 mL de H₂SO₄ (0,01 mol/L) (ensaio em frasco de vidro moído). Indicado para produtos não parenterais, ou seja, de uso tópico ou oral.

O vidro sódico-cálcico é a principal classe usada na fabricação de frascos para produtos farmacêuticos. Ele é composto principalmente de dióxido de sílica (SiO₂), óxido de sódio (Na₂O) e óxido de cálcio (CaO), e sua diferença está na resistência à água ou quantidade de álcali que libera [7].

3.3 Processo de fabricação dos tubos de vidro FIOLAX® *clear*

O vidro FIOLAX® *clear* [8] é do tipo I e o processo de fabricação de tubos de vidro da empresa SCHOTT *Technologies Brazil* consiste em uma cadeia de processos industriais que iniciam na seleção da matéria prima e sua posterior mistura, conforme figura 4 [9].

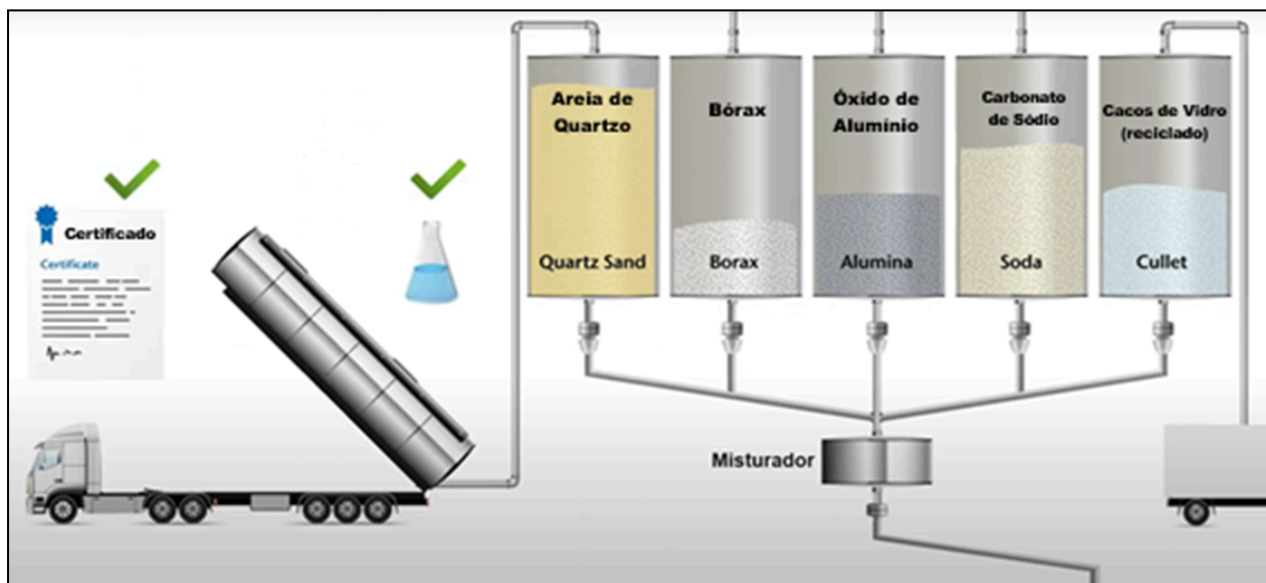


Figura 4: Ilustração do processo de mistura da matéria-prima. Adaptado de [9].

Em seguida, a mistura entra no forno com a temperatura sendo controlada, aumentando gradativamente até o ponto de fusão, e, temperaturas de trabalho que podem chegar a 1600 °C (figura 5), até o ponto onde a mistura se torna liquefeita [10].

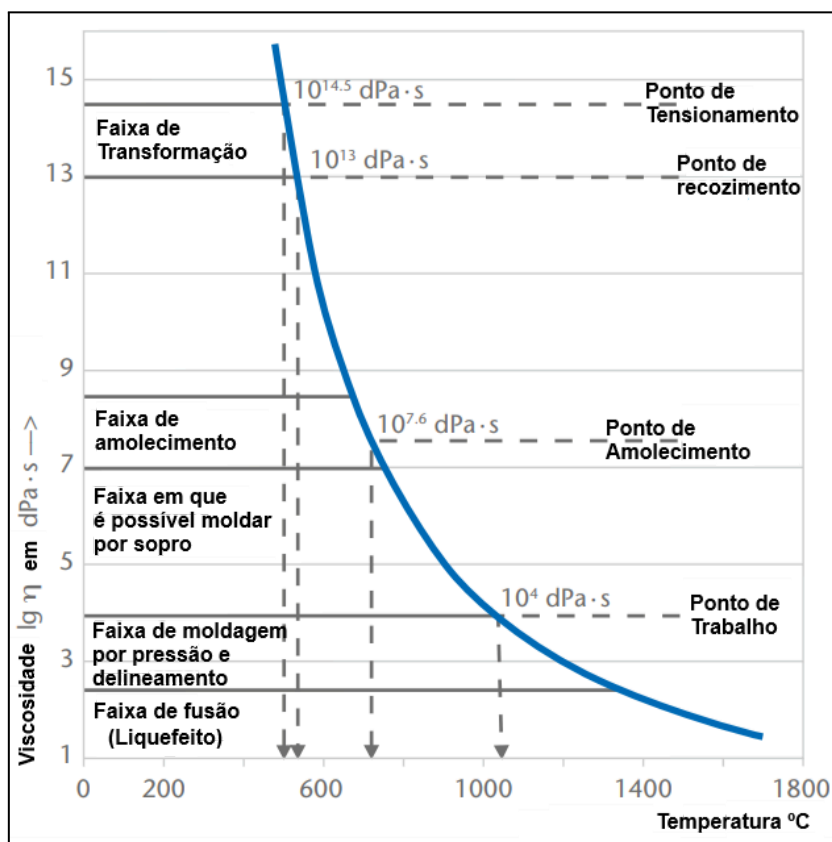


Figura 5: Gráfico da viscosidade pela temperatura do vidro e suas faixas de trabalho. Adaptado de [10].

A ilustração da figura 6, demonstra a mistura sendo jogada na entrada dos fornos de fusão (chamado de alimentador) e sendo fundida no seu interior, os maçaricos nas laterais do forno realizam a queima controlada para poder realizar um aumento de temperatura gradual no interior e para manter o estado pastoso do vidro durante todo o processo. Este processo de entrada da mistura, sua fusão, e a manutenção do vidro pastoso é realizado por anos consecutivos em um mesmo forno. O forno está posicionado a cerca de dez metros acima das linhas de produção, o que ajuda na queda do vidro liquefeito para os próximos passos de produção de tubos de vidro.

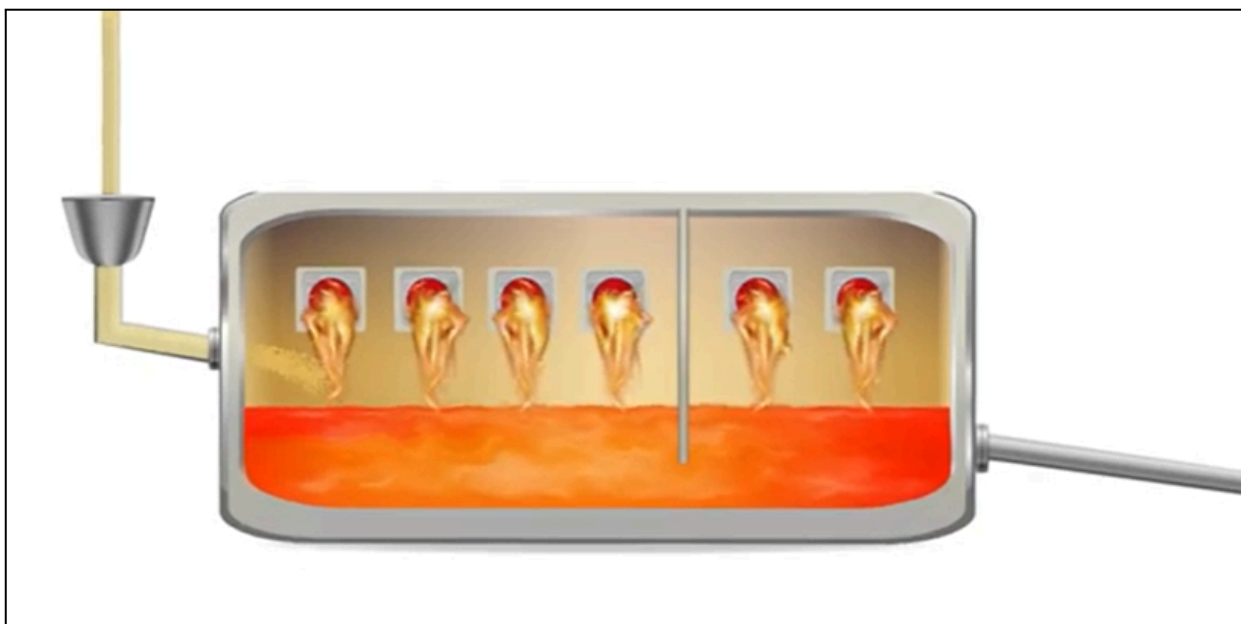


Figura 6: Ilustração mostrando a fusão da composição no forno industrial. Adaptado de [9].

3.3.1 Linha de produção de tubos de vidro

O vidro pastoso sai dos fornos e cai por cima de um equipamento em formato cônico que gira com um furo no meio por onde é injetado ar comprimido a fim de controlar o diâmetro interno desse tubo de vidro que está em formação, conforme ilustrado na figura 7.

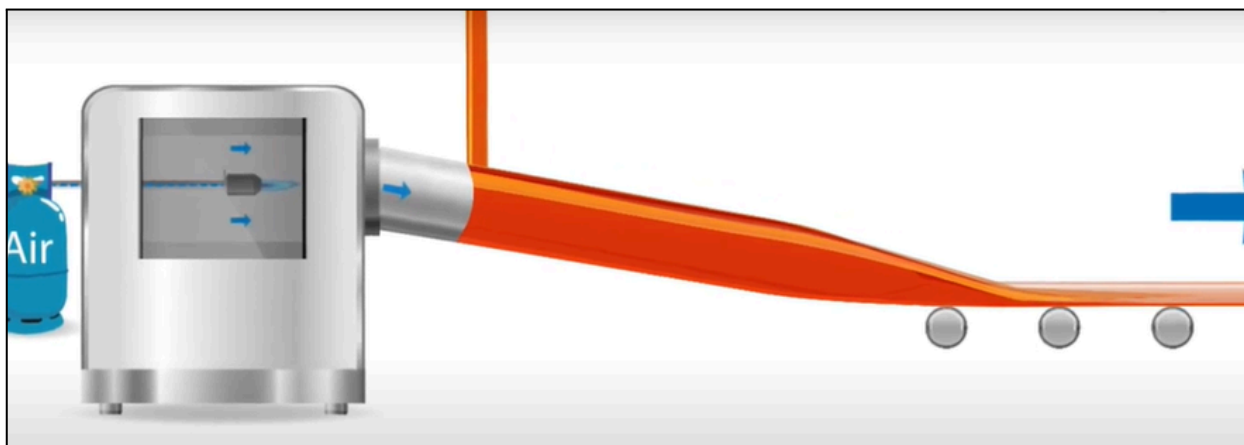


Figura 7: Ilustração do processo de formação do tubo de vidro. Adaptado de [9].

3.3.2 Equipamentos detectores de defeitos nos tubos de vidro

O tubo de vidro desliza por uma longa linha de produção diminuindo a temperatura sob os roletes compostos por um material não abrasivo ao vidro e passa por dentro de equipamentos detectores de defeitos desenvolvidos pelo método patenteado pela SCHOTT AG. O método *The perfeXion® Quality Process* [2] garante o controle de qualidade das dimensões do tubo e da detecção dos principais defeitos durante o processo de produção, conforme ilustrado na figura 8.

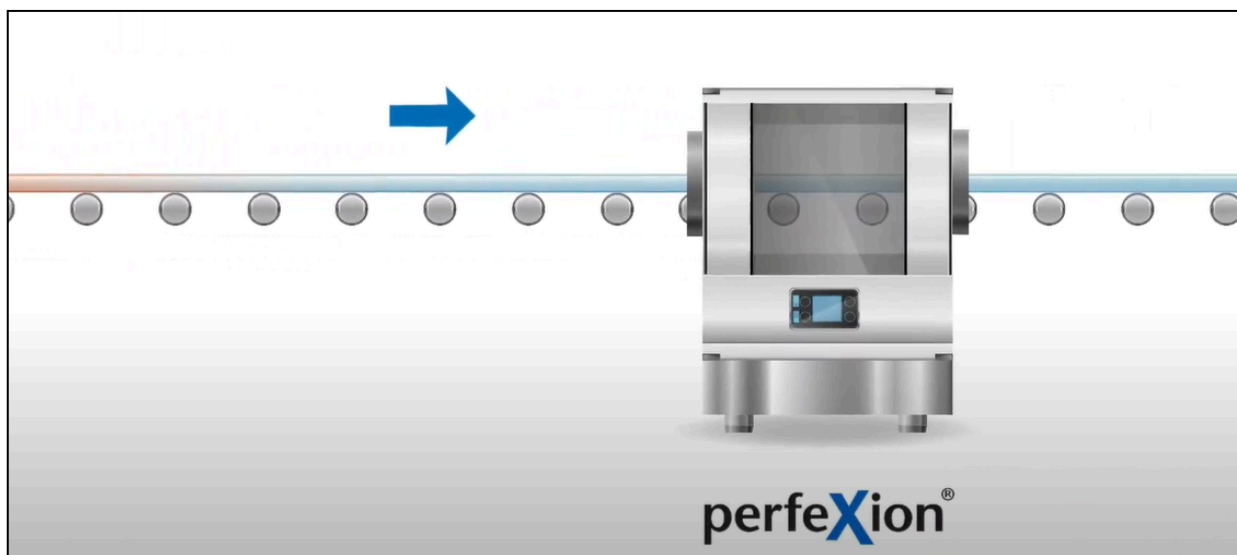


Figura 8: Ilustração da entrada do tubo de vidro nos equipamentos detectores. Adaptado de [9].

Os principais defeitos dentro do controle de inspeção visual computacional no detector são:

- a. Pedras: São formadas principalmente pela composição que não fundiu de forma homogênea nos fornos;
- b. Nós: São formados principalmente por resíduos de composição, respingos de materiais diversos no processo de produção e poeira em suspensão no ar que se prende a superfície do tubo de vidro, entre outras pedrinhas (nozinhos) transparentes ou de cores diversas a depender do material que adira à superfície do tubo de vidro seja ainda quente ou durante o processo de resfriamento ao longo da linha de produção;
- c. Bolhas de ar: São bolhas de ar que ocorrem na maioria dos casos pela dinâmica do processo de estiramento do tubo de vidro ao longo do processo de produção. Podem surgir entre as paredes externa e interna do tubo de vidro, chamadas de bolhas fechadas, ou nas paredes externas ou internas, chamadas de bolhas abertas.

O controle e seleção de bolhas é extremamente importante no processo de produção, pois as bolhas afetam a rigidez das paredes dos tubos de vidro, o que pode causar fragilidade nas paredes dos envases fabricados com os tubos de vidro FIOLAX® *clear*.

Os próximos passos são o tratamento das extremidades a fim de tornar as superfícies abauladas e não cortantes, empacotar e enviar ao cliente para posterior trabalho de fabricação de ampolas, seringas, frascos, entre outras vidrarias de envase e similares [11].

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fenômenos que geram o acúmulo de poeira na superfície dos espelhos precisam ser analisados e compreendidos, bem como, todo o conhecimento necessário para realizar os experimentos, verificações, medições e o desenvolvimento da instrumentação para a elaboração da pesquisa. Este capítulo trata de alguns fundamentos teóricos e conhecimentos necessários para a condução dos passos deste trabalho de pesquisa.

4.1 Forças de Van der Waals

Segundo Melo & Guedes [12], as forças de Van der Waals são interações eletrostáticas fracas entre átomos e moléculas com orbitais saturados, nomeadas em homenagem a Johannes D. Van der Waals. Elas são essenciais na determinação da geometria molecular e na liquefação de gases, como oxigênio e nitrogênio. As forças podem ser de três tipos:

- a. Interação íon-dipolo permanente e dipolo permanente-dipolo permanente: conhecidas como forças de Keesom, variam inversamente com a temperatura e a sexta potência da distância. Portanto, quando moléculas polares se aproximam, o pólo positivo de uma atrai o pólo negativo da outra, fazendo com que elas se alinhem de forma específica. A figura 9 demonstra como essa atração entre as moléculas pode variar conforme a orientação delas.

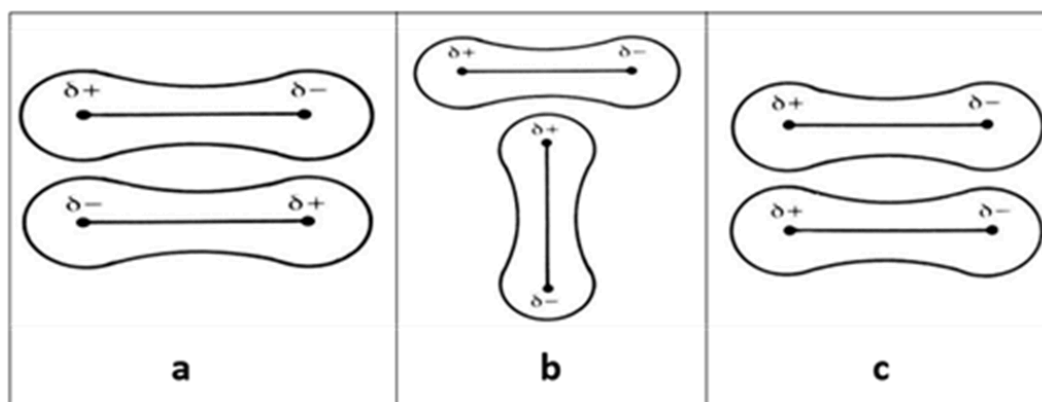


Figura 9: Representação da atração entre moléculas polares: a) duas moléculas dipolares com orientação atrativa; b) duas moléculas dipolares com orientação neutra; c) duas moléculas dipolares com orientação repulsiva. Adaptado de [12].

- b. Interação íon-dipolo induzido e dipolo permanente-dipolo induzido: chamadas de forças de Debye, também diminuem rapidamente com a distância e dependem da polarizabilidade das moléculas. A figura 10 mostra uma molécula polar formando um dipolo induzido em um átomo neutro eletricamente.

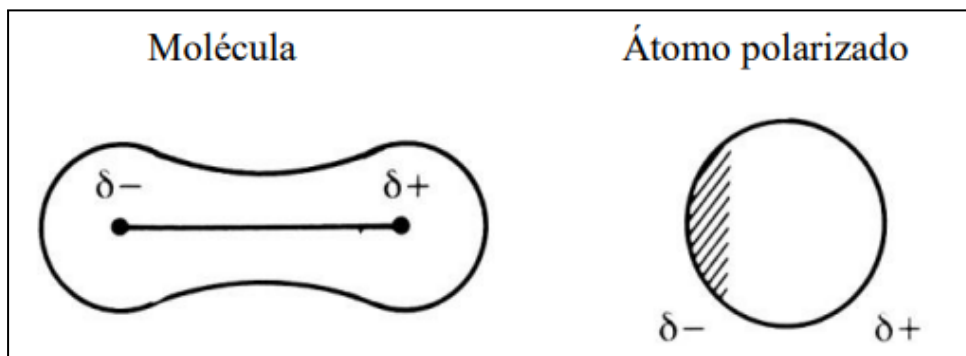


Figura 10: Ilustração de um dipolo-dipolo induzido. Adaptado de [12].

- c. Interação dipolo instantâneo-dipolo induzido: são forças que podem provocar a formação de dipolos em átomos ou moléculas apolares próximas, gerando forças conhecidas como de atração ou dispersão de London. Presentes em moléculas polares e não-polares, são mais intensas em átomos com maior polarizabilidade e aumentam com o peso molecular. Essas forças reduzem a energia total dos átomos e moléculas participantes, à medida que suas nuvens eletrônicas começam a oscilar de forma sincronizada. A figura 11, a seguir, ilustra esquematicamente as forças de atração e repulsão entre dois átomos neutros.

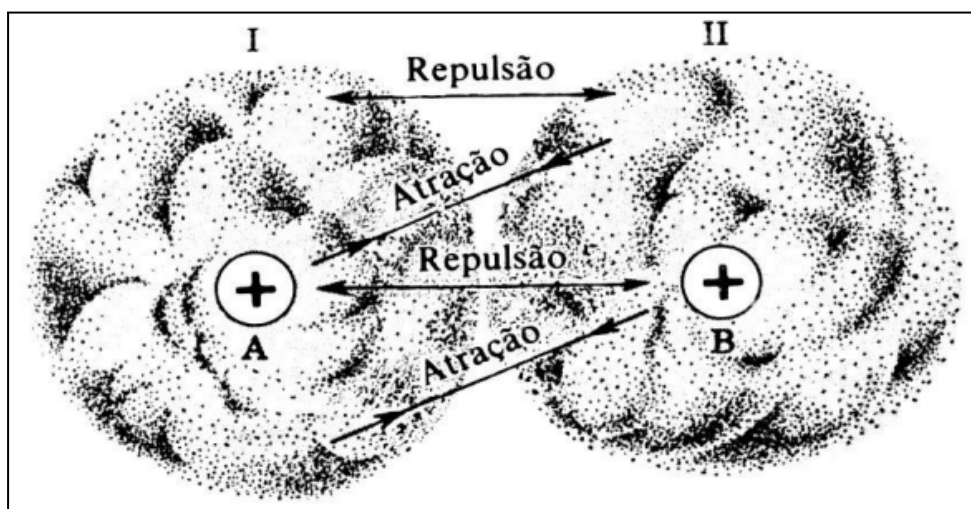


Figura 11: Ilustração das interações eletrônicas entre dois átomos. Adaptado de [12].

As ligações de hidrogênio são interações secundárias entre um átomo de hidrogênio covalentemente ligado e um par de elétrons não ligantes de outro átomo. Estas ligações ocorrem quando o hidrogênio está ligado a um átomo altamente eletronegativo (como oxigênio, nitrogênio ou flúor). Elas são representadas por linhas tracejadas e são cruciais em várias propriedades físicas e químicas das substâncias, como o aumento dos pontos de ebulição. A energia das ligações de hidrogênio é geralmente baixa, mas significativamente altera as propriedades das substâncias.

As ligações de hidrogênio elevam pontos de ebulição e influenciam no comportamento de misturas de líquidos. Por exemplo, a água apresenta um ponto de ebulição muito maior devido às ligações de hidrogênio, essencial para a existência de vida na Terra [12].

4.2 Efeito triboelétrico

O termo "tribo" vem do grego "tribein", que significa esfregar, trata-se de um fenômeno de transferência de cargas elétricas que ocorre devido à transferência de elétrons entre materiais com diferentes afinidades eletrônicas. Materiais que têm uma afinidade menor perdem elétrons e tornam-se positivamente carregados, enquanto materiais com maior afinidade ganham elétrons, adquirindo carga negativa. Este fenômeno, um dos mais antigos registrados na história da eletricidade, foi observado inicialmente por Tales de Mileto, que percebeu que o âmbar, quando atritado, adquire a capacidade de atrair pequenos objetos [13].

Um exemplo comum no cotidiano é o atrito entre um balão e o cabelo humano. Nesse caso, o cabelo, perde elétrons e se carrega positivamente, enquanto o balão, ganha elétrons e adquire carga negativa. Como uma tentativa de organizar e compreender os fenômenos de eletricidade estática observados durante o atrito entre diferentes materiais surgiu a série triboelétrica que através de uma tabela organiza os materiais de acordo com sua afinidade eletrônica, classificando-os quanto à capacidade de ganhar ou perder elétrons quando submetidos ao atrito (figura 12). Essa tabela permite prever qual material ficará carregado positivamente e qual ficará carregado negativamente após o contato e separação, auxiliando na análise de fenômenos de eletrização por atrito [14].

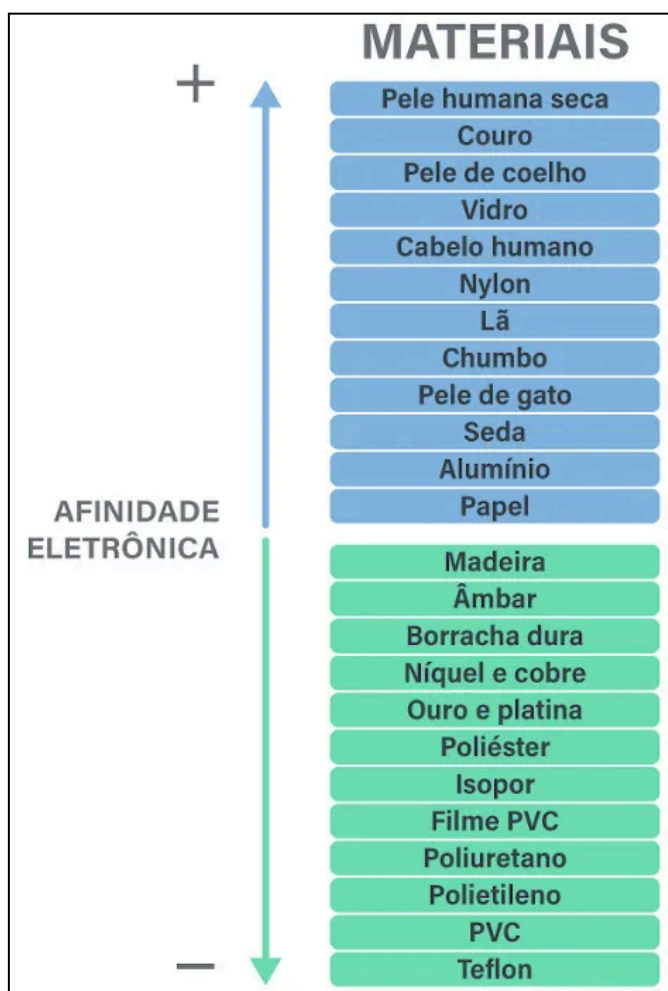


Figura 12: Série triboelétrica [14].

Segundo Moreira [15], a triboeletricidade é impulsionada por três mecanismos principais encontrados na literatura científica: a transferência de elétrons; a transferência de íons; e, a transferência de massa. A figura 13, ilustra de forma detalhada esses mecanismos de transferências de cargas durante o processo do efeito triboelétrico.

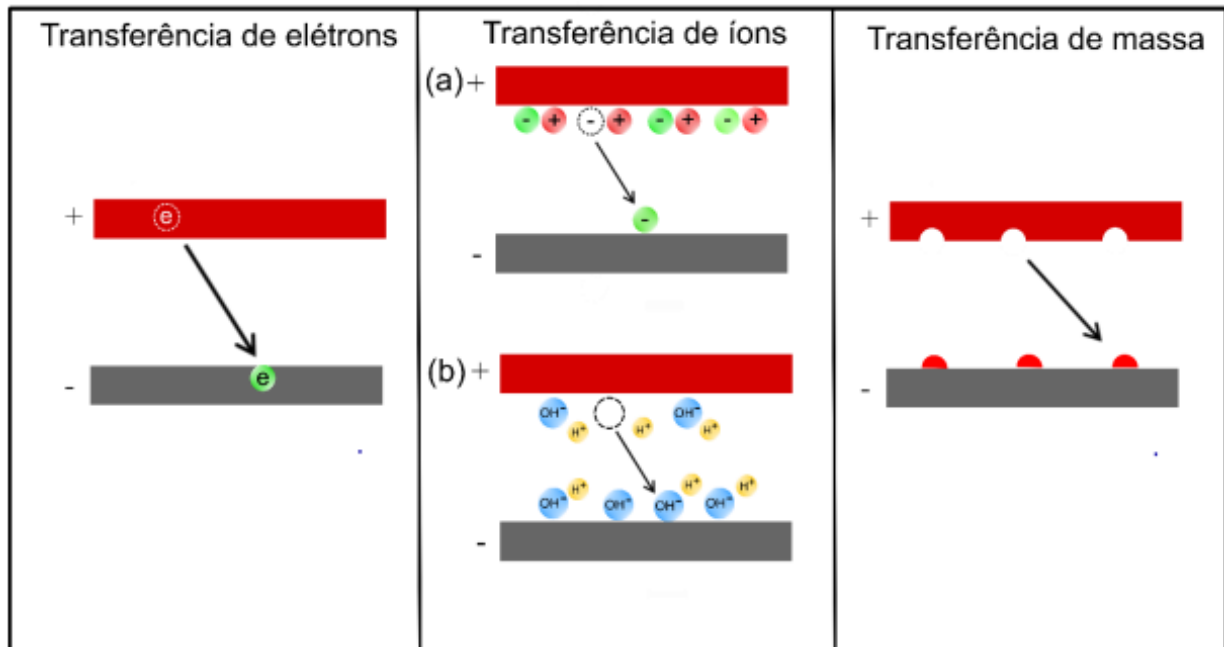


Figura 13: Carregamento de superfícies triboeletrizadas. Adaptada de [15].

4.3 Espelho de primeira superfície

Os espelhos de primeira superfície possuem uma camada reflexiva na parte frontal do vidro, diferente dos espelhos comuns onde a reflexão ocorre na parte traseira (figura 14). Essa característica elimina a formação de imagens duplas, resultando em reflexões mais nítidas e fidedignas. Essa propriedade é crucial em aplicações que exigem alta fidelidade e nitidez de imagem, como aplicações em microscópios, scanners e espectrômetros ópticos.

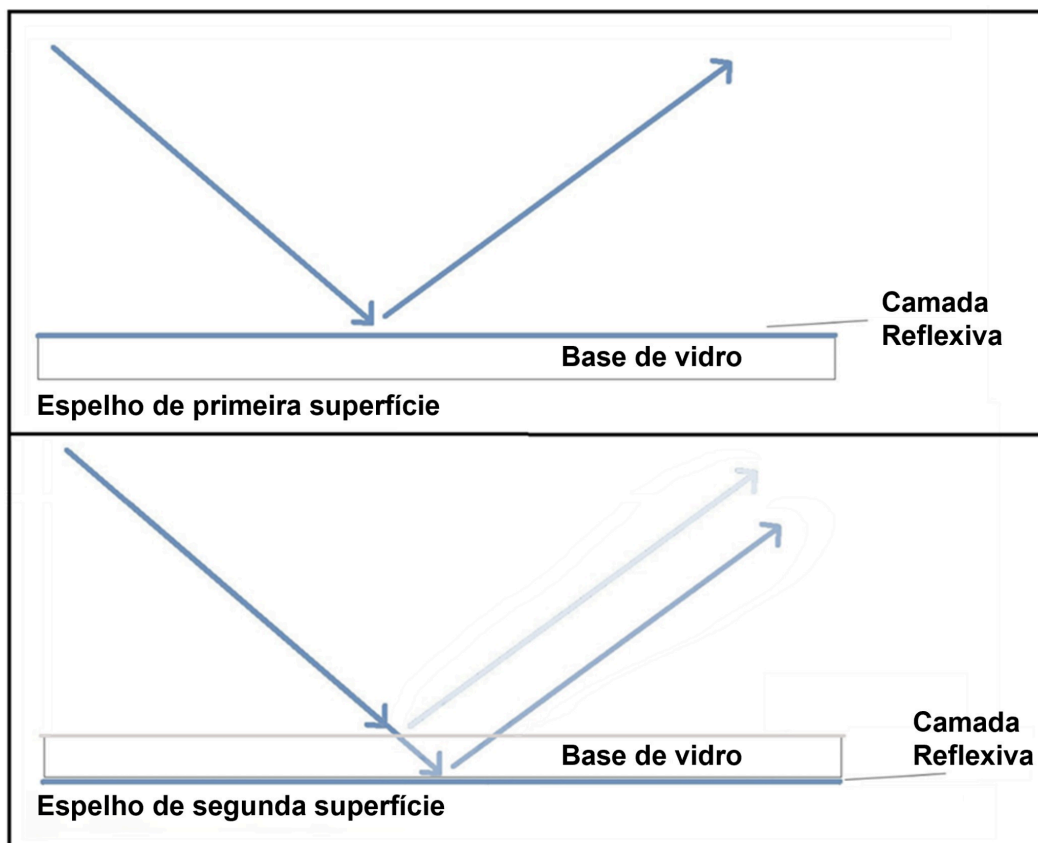


Figura 14: Montagem comparando a reflexão de espelhos onde a superfície espelhada está na primeira camada com os que a superfície espelhada está na camada traseira. Adaptado de [4].

Os espelhos de primeira superfície oferecem excelente reflectância no espectro visível pois a camada metálica utilizada é altamente eficiente em refletir luz visível, garantindo que a maior parte da luz incidente seja refletida com mínima absorção, figura 15. Isso é particularmente importante em aplicações científicas e industriais.

A fim de tornar os espelhos de primeira superfície mais duráveis, eles são frequentemente revestidos com um recobrimento dielétrico que protege a camada de alumínio de danos mecânicos como arranhões e também previne a oxidação, mantendo a alta reflectância e confiabilidade ao longo do tempo. Essa proteção é vital em ambientes onde o espelho pode ser exposto a condições adversas.

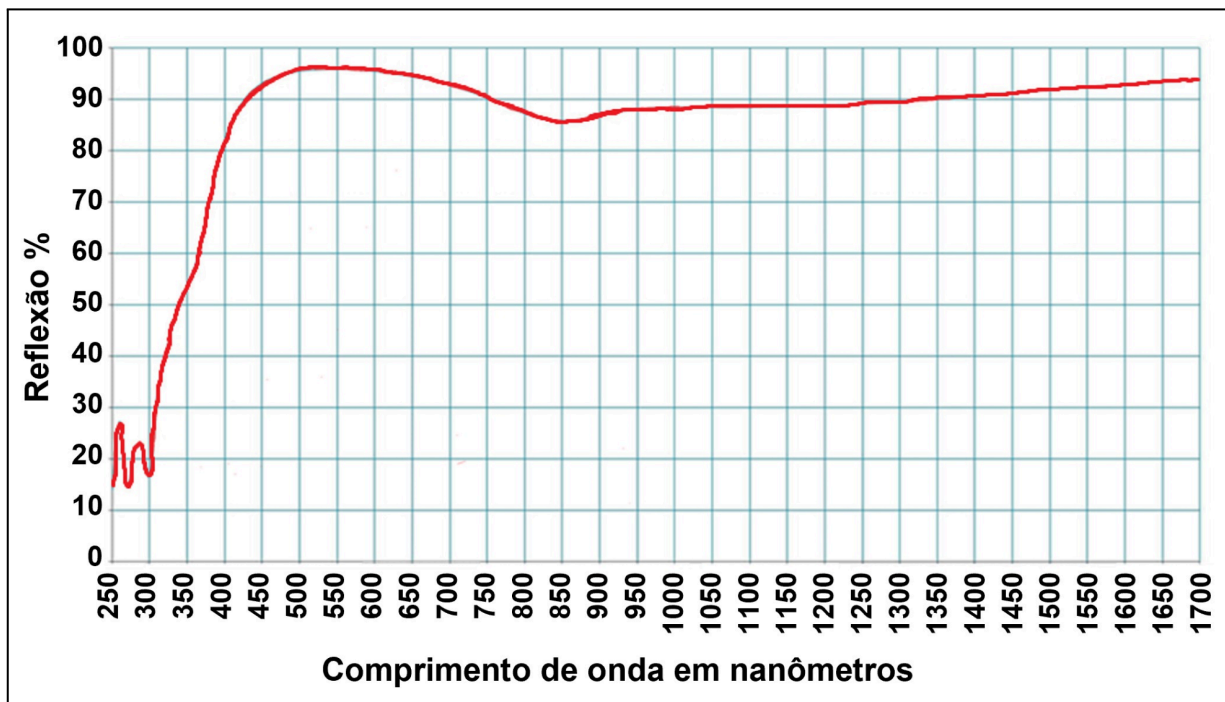


Figura 15: Gráfico de percentual de reflexão do espelho pelo comprimento de onda (em nanômetros). Adaptado de [4].

4.4 Efeito eletrostático

A descoberta e caracterização do efeito eletrostático remonta à Grécia Antiga, quando filósofos como Tales de Mileto observaram que o âmbar, ao ser esfregado com pele de animal, adquire a capacidade de atrair pequenos objetos, como penas ou folhas secas. Esse fenômeno intrigante foi uma das primeiras observações documentadas de eletricidade, muito antes de compreendermos sua verdadeira natureza. O termo "eletricidade" vem da palavra grega "elektron", que significa âmbar, refletindo essa descoberta inicial. No entanto, foi somente com o avanço das teorias científicas, no século XVII, que conceitos mais formais sobre as forças eletrostáticas começaram a ser estabelecidos [16].

O físico britânico Stephen Gray (1666-1736) realizou diversos experimentos sobre condutores, isolantes e eletricidade estática, dentre eles um experimento onde um garoto é suspenso por linhas muito finas e um tubo de vidro atritado é mantido próximo às suas pernas, e as mãos e o rosto do garoto atraem lâminas de latão conforme pode ser observado na ilustração da figura 16 [17]. As cargas elétricas são passadas do vidro atritado (ganhando elétrons) para o corpo do garoto em suspensão que acaba por atrair as lâminas de latão super leves e finas.



Figura 16: Ilustração do experimento de Gray sobre eletricidade estática. A figura representa um garoto pendurado por cordas, com as mãos e face atraindo lâminas finas de latão ao ter o seu corpo em contato com um tubo de vidro atritado [17].

As características do efeito eletrostático foram mais bem descritas a partir dos estudos de cientistas como Charles-Augustin de Coulomb, que formulou a lei que leva seu nome. A Lei de Coulomb descreve a interação entre duas cargas puntiformes, estabelecendo que a força de atração ou repulsão entre elas é diretamente proporcional ao produto de suas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa. O efeito eletrostático, portanto, refere-se ao fenômeno que ocorre quando cargas elétricas estão em repouso. Ele é resultado da interação entre corpos que adquirem carga elétrica devido ao atrito, indução ou contato. Quando materiais são esfregados ou aproximados, elétrons podem ser transferidos de um corpo para outro, causando um desequilíbrio nas cargas elétricas. Esta lei é fundamental pois descreve a força eletrostática entre partículas carregadas, sendo essencial para o entendimento das interações básicas em sistemas eletrostáticos e do comportamento de cargas em repouso [18].

Outro aspecto importante do efeito eletrostático são as propriedades de materiais isolantes e condutores. Materiais isolantes, como plásticos e borracha, mantêm suas cargas localizadas, o que permite a acumulação de eletricidade estática, enquanto materiais condutores, como metais, permitem o livre movimento de elétrons. Essa diferença é crucial para várias aplicações tecnológicas e científicas, como em processos de eletrização e dispositivos que utilizam princípios eletrostáticos, como capacitores e geradores eletrostáticos.

4.5 Filme fino de *fluorine doped tin oxide* (FTO)

Segundo Pirovani [19], o óxido de estanho (SnO_2) é um semicondutor do tipo N e apresenta uma estrutura cristalina tetragonal, na qual cada átomo de estanho está rodeado por seis átomos de oxigênio em um arranjo octaédrico e cada átomo de oxigênio está cercado por outros três átomos de estanho em uma configuração planar, conforme representado na figura 17.

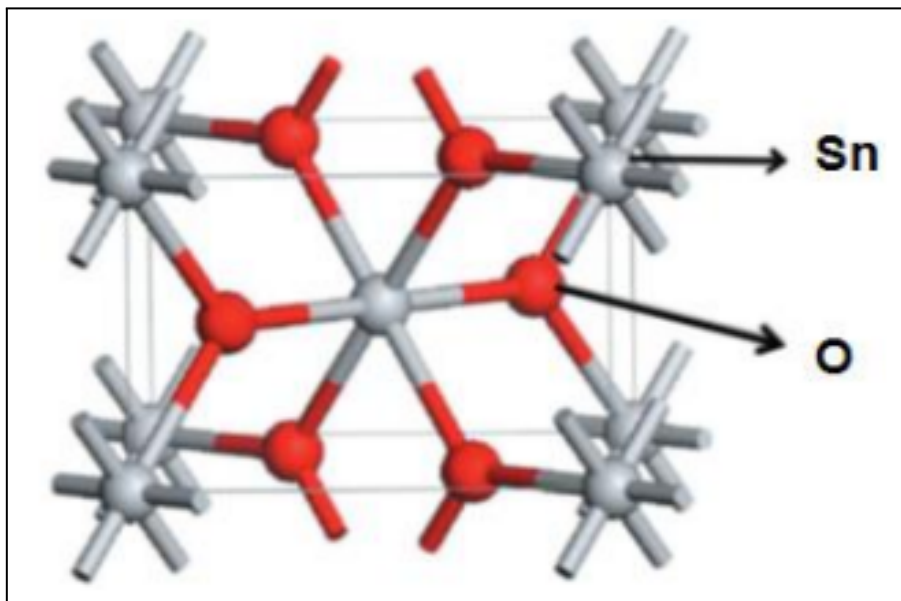


Figura 17: Estrutura cristalina do óxido de estanho (SnO_2) [19].

A transmitância e a condutividade elétrica estão relacionadas à existência de níveis doadores rasos próximos à banda de condução, formados por uma grande concentração de vacâncias de oxigênio. Estes mesmos níveis do tipo N causam somente absorção no infravermelho, deixando o material transparente na faixa do visível do espectro eletromagnético. Já a condutividade elétrica do óxido de estanho, está relacionada com a não-estequiometria natural e aos defeitos intrínsecos relacionados a ausência de oxigênio, uma vez que a condutividade do SnO_2 muda várias ordens de grandeza com a concentração de oxigênio [19].

Portanto, a construção de filmes finos de óxido de estanho se mostra importante quando se deseja obter condutividade elétrica e alta transmitância de luz no espectro visível. Além disso, SnO_2 é não tóxico, abundante na natureza, termicamente e quimicamente estável e possui um custo relativamente baixo. Um filme SnO_2 dopado não é estequiométrico, devido à existência de vacâncias de oxigênio, que dominam a condutividade elétrica. No entanto, a resistividade elétrica ainda é bastante elevada devido à baixa concentração e mobilidade dos portadores. Uma maneira de reduzir essa resistividade elétrica dos filmes SnO_2 é controlar a concentração de vacâncias de oxigênio por meio de dopagem com elementos dos grupos IIB, IIIB, VB, VIIB da Tabela Periódica [19]. Segundo Tran et al. [20], estes elementos podem ser: zinco, gálio, alumínio, antimônio ou flúor.

Conforme os estudos de Queiroz [21], a dopagem do óxido de estanho com o elemento flúor faz a resistência elétrica variar de 10^{-3} para $10^{-4} \Omega$, a elevação na condutância ocorre devido ao flúor apresentar sete elétrons na camada de valência facilitando a movimentação de portadores de carga, portanto, conforme já mencionado a prática de dopagem do SnO_2 com flúor é utilizada para aumentar a condutividade destes filmes finos. Além disso, os elementos flúor (F^-) e oxigênio (O_2^-) possuem raios atômicos similares ($\text{F}^- = 0,117 \text{ nm}$ e $\text{O}_2^- = 0,122 \text{ nm}$) fazendo com que o flúor substitua o elemento oxigênio na rede cristalina e agindo como doador na nova estrutura de dióxido de estanho dopado com flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$), conforme ilustrado na figura 18.

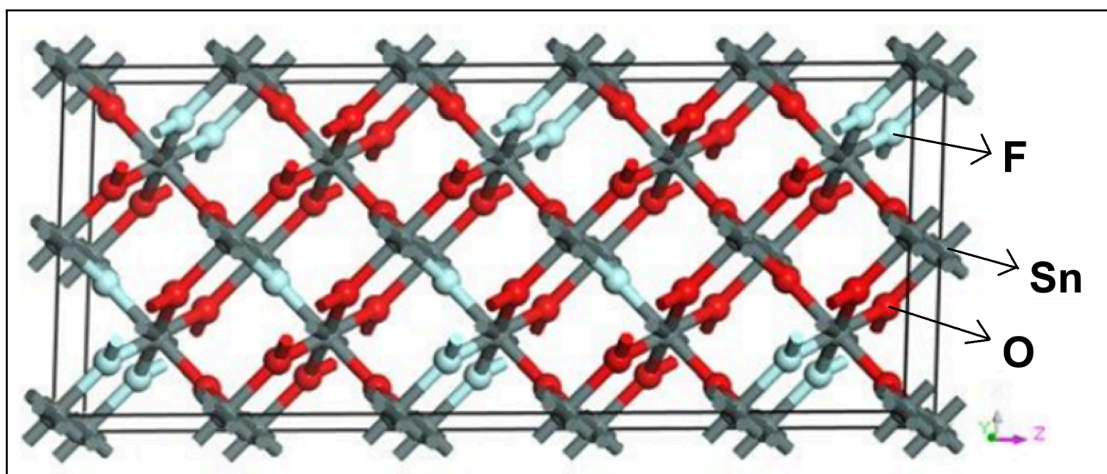


Figura 18: Estrutura da rede cristalina de $\text{SnO}_2\text{:F}$. Adaptado de [22].

4.6 Espectroscopia UV/Visível

Segundo Agilent Technologies [22], a técnica de espectrofotometria UV-Vis se baseia na medição da interação da luz com a matéria, particularmente na absorção de radiação na faixa do ultravioleta (190-400 nm) e visível (400-900 nm) do espectro eletromagnético (figura 19). A absorção de luz por uma amostra resulta em transições entre níveis de energia eletrônica, vibracional e rotacional das moléculas, o que é registrado como um espectro característico da substância. Esse espectro fornece informações importantes sobre a composição e características químicas da amostra, sendo amplamente utilizado para quantificação e identificação de compostos químicos e biomoléculas.

O instrumento UV-Vis é composto por vários componentes essenciais, incluindo uma fonte de luz, um monocromador, um compartimento de amostras e detectores. A fonte de luz gera uma radiação de amplo espectro que é dividida em diferentes comprimentos de onda pelo monocromador. A luz selecionada então incide sobre a amostra, e a intensidade da luz transmitida ou refletida é medida por detectores. As principais tecnologias para geração de luz incluem lâmpadas de xenônio e tungstênio-halogênio, que cobrem diferentes faixas do espectro.

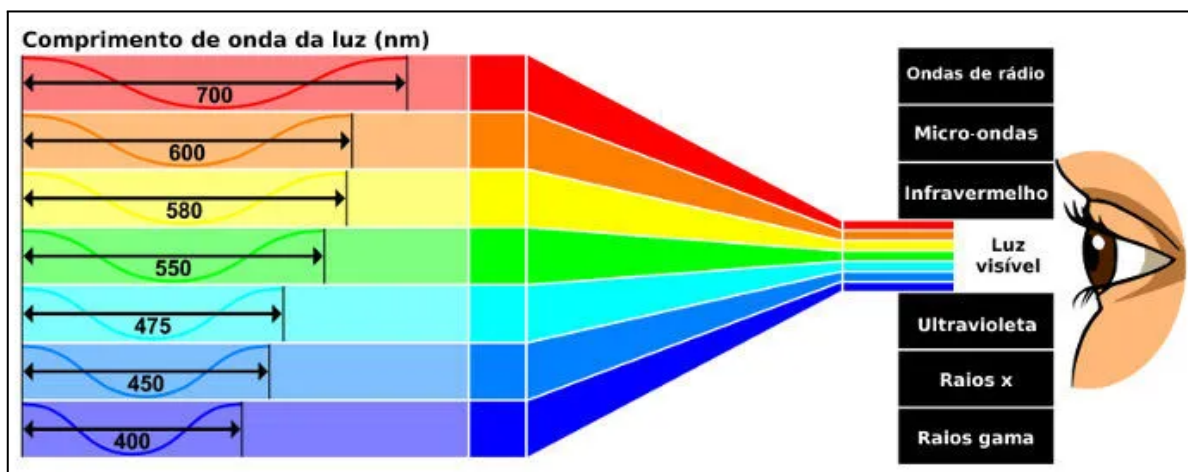


Figura 19: Ilustração do campo eletromagnético incluindo a faixa do visível e ultravioleta [23].

A espectrofotometria UV-Vis tem várias aplicações, com destaque para a quantificação de substâncias. A Lei de Beer-Lambert é um princípio fundamental para essa aplicação, que estabelece uma relação linear entre a absorvância de uma solução e a concentração do soluto. A técnica é também utilizada para estudar cinéticas de reações, monitorando mudanças na absorvância ao longo do tempo, o que permite a análise da velocidade de reações químicas.

Além da quantificação e identificação, a espectrofotometria UV-Vis é essencial para caracterizar propriedades ópticas, como a cor de materiais. Medições de cor são frequentemente realizadas usando UV-Vis para determinar a absorção e reflexão de diferentes comprimentos de onda. Isso é importante tanto para controle de qualidade industrial quanto para pesquisa em materiais e pigmentos. A técnica é extremamente versátil e pode ser utilizada em uma ampla gama de campos, incluindo biotecnologia, farmacêutica, petroquímica, e ciência dos materiais.

A figura 20 ilustra a aplicação da espectrofotometria em diferentes tipos de amostras, como líquidos e sólidos a fim de se medir a transmissão e reflexão de luz. A ilustração demonstra ainda que o tipo de átomo ou íon, e os níveis de energia envolvidos, determinam o comprimento de onda da luz absorvida. Quanto maior a energia necessária para mover o elétron para um nível de energia mais distante do núcleo, menor será o comprimento de onda da luz absorvida.

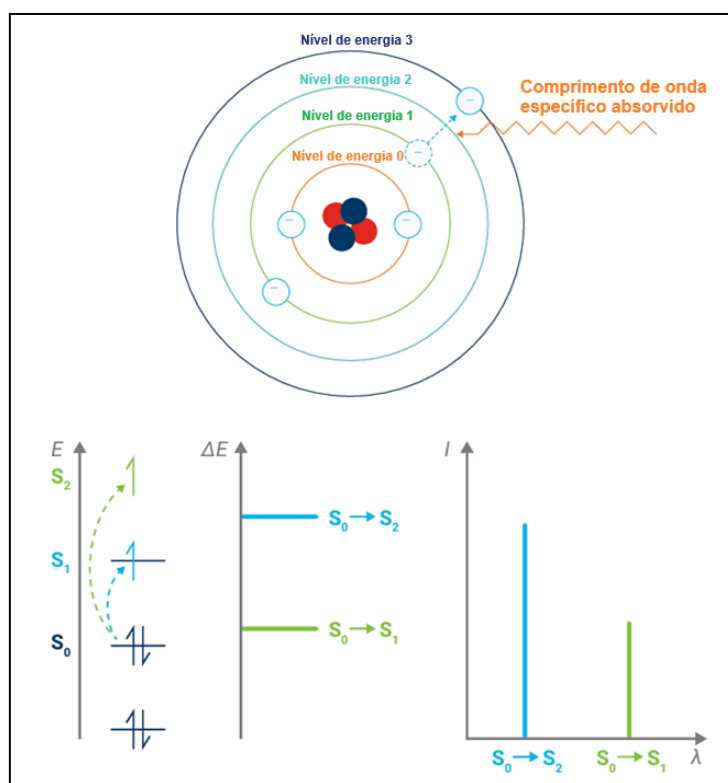


Figura 20: Ilustração da luz incidente em um átomo causando a excitação de seus elétrons para diferentes níveis de energia. Adaptado de [22].

5 EFEITO ELETROSTÁTICO NO ACÚMULO DE POEIRA NOS DETECTORES

Quando os grãos de poeira carregados eletricamente entram em contato com a superfície do espelho (figura 21), há uma transferência de carga elétrica entre a poeira e a superfície do espelho, criando uma diferença de potencial elétrico. Segundo Tan et al [24], a adesão da poeira às

superfícies está relacionada principalmente às forças de van der Waals, forças eletrostáticas e, em menor grau, forças capilares. Já as forças capilares, devido à condensação de água são insignificantes, pois a umidade relativa geralmente não forma pontes líquidas significativas.

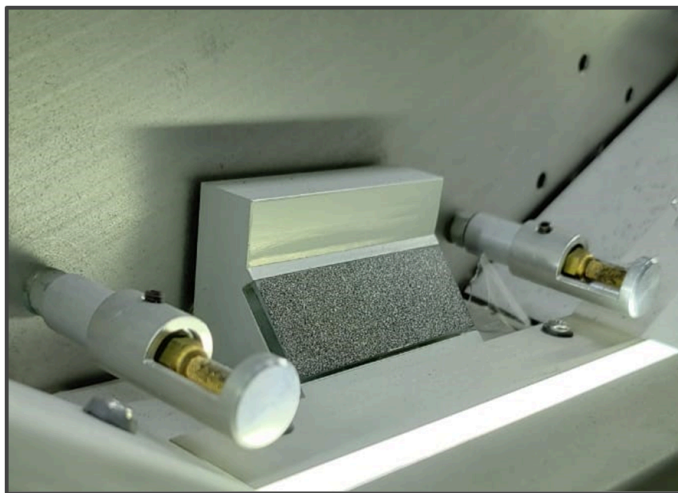


Figura 21: Espelho do equipamento detector de defeitos com a superfície coberta de poeira.

Segundo Melo & Guedes [12], as forças de Van der Waals são conhecidas como forças eletrostáticas de baixa intensidade, normalmente variando entre 4,18 e 41,84 kJ/mol. Elas ocorrem entre átomos que não fazem parte de uma estrutura cristalina, seja ela iônica ou metálica. Essas forças são responsáveis pelas interações entre átomos e moléculas com orbitais saturados, onde a formação de ligações covalentes é inviável. Essas forças diminuem rapidamente à medida que os átomos ou moléculas se afastam, sendo também superadas pelas forças de repulsão em caso de aproximação excessiva entre elas. Essas forças são classificadas como forças secundárias, podendo ser de natureza intra ou intermolecular, sendo principalmente do segundo tipo. No primeiro caso, elas desempenham um papel crucial na determinação da geometria de moléculas ligadas por ligações covalentes, enquanto no segundo caso, são responsáveis pela liquefação de gases como oxigênio, nitrogênio e argônio, bem como pela solidez dos polímeros em temperatura ambiente.

Nesse contexto, o ambiente de produção vidreira possui fatores que favorecem o carregamento dos grãos de poeira. Podemos citar a presença de poeira em suspensão proveniente da composição dos fornos, a radiação devido à alta temperatura no entorno das linhas de produção e dos fornos, que pode chegar a até 1600 °C em algumas áreas. Essas características do ambiente podem levar a uma carga elétrica nos grãos de poeira em suspensão no ar, tornando-os ainda mais suscetíveis à atração eletrostática pela superfície dos espelhos.

No contexto das forças eletrostáticas, os grãos de poeira podem ficar carregados ao entrarem em contato uns com os outros, um fenômeno conhecido como carga triboelétrica [25]. Isso pode gerar campos elétricos significativos em ambientes com poeira em movimento, afetando a distribuição e o movimento dos grãos de poeira.

A carga triboelétrica é um fenômeno que ocorre quando dois materiais entram em contato e depois são separados, resultando na transferência de cargas elétricas entre eles. Este processo envolve a troca de elétrons, onde um dos materiais tende a ganhar elétrons (carregando-se

negativamente) e o outro tende a perder elétrons (carregando-se positivamente). Isso acontece devido à diferença na afinidade eletrônica entre os materiais. Conforme evidenciado nos experimentos de Toth III et al [25], essas cargas elétricas afetam diretamente a trajetória dos grãos de poeira, uma vez que os campos elétricos gerados podem manter grãos de poeira em suspensão por mais tempo e em altitudes mais elevadas do que o esperado. O experimento reportado no trabalho citado é representado na figura 22, e ilustra como as cargas adquiridas pelos grãos de areia, combinada com um campo elétrico aplicado por eletrodos, podem alterar suas trajetórias. No experimento quanto maior o campo elétrico aplicado maior a concentração de grãos de poeira no copo de areia superior. Em uma tempestade de areia, o mesmo efeito pode explicar a suspensão de grãos de areia em altitudes mais elevadas.

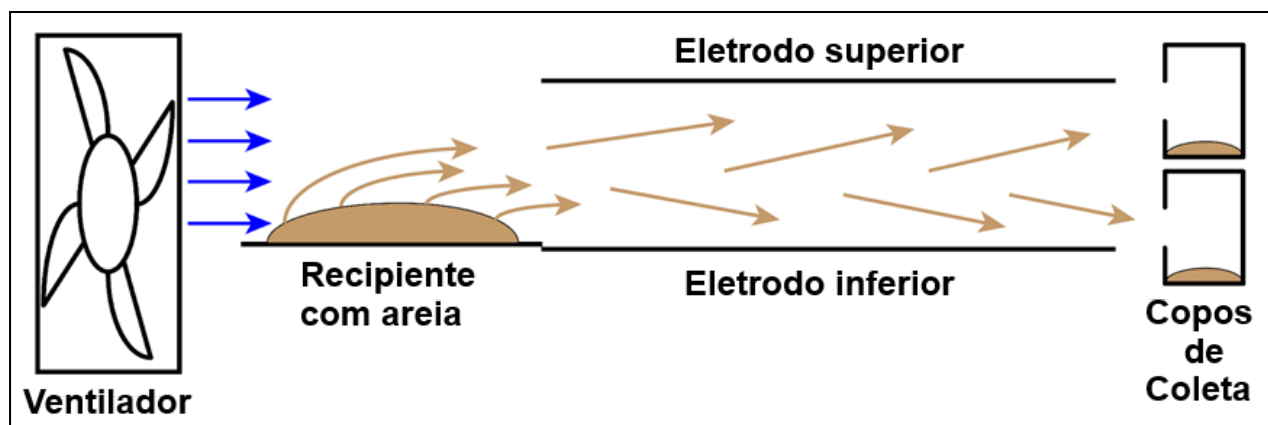


Figura 22: Esboço de um experimento usando campo elétrico e eletrodos na mudança de trajetória de grãos de areia soprados por um ventilador. Adaptada de [25].

Os grãos de areia em repouso também são movimentados por campos elétricos gerados externamente [26], o que corrobora para uma possível mudança na trajetória dos grãos de poeira no ambiente de indústria que possui uma gama de equipamentos, e campos elétricos provenientes do processo produtivo como a interação do vidro liquefeito nos fornos e a sua movimentação em todas as etapas na linha de produção. Analisando os experimentos de Mohammed et al. [27], é possível observar que os grãos de areia podem ser guiados a partir da influência de um campo elétrico variável em uma superfície inclinada, movimentando os grãos de poeira para fora da área de interesse.

No caso do ambiente de produção vidreira a mistura é jogada no alimentador dos fornos de fusão, e os fornos estão a cerca de dez metros de altura das linhas de produção vidreira, onde estão localizados os equipamentos detectores, o que pode contribuir para o carregamento dos grãos de poeira que ficam em suspensão no ar. Todos esses fatores corroboram para explicar a presença de tanta poeira em suspensão nos ambientes de produção vidreira e o grande acúmulo na superfície dos equipamentos e mais especificamente nos espelhos, lentes e entorno dos conjuntos ópticos dos detectores.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Vidro recoberto por filme fino de *fluorine doped tin oxide* (FTO)

O filme fino de *fluorine doped tin oxide* (FTO) foi escolhido por sua transparência, absorvendo muito pouco dentro do espectro visível, não interferindo na detecção e na reflexão do espelho de 1ª superfície, e por sua condutibilidade elétrica [28] [29]. A condutibilidade elétrica do filme fino possibilita manipular a energia elétrica estática para evitar a adesão dos grãos de poeira na sua superfície. O vidro com recobrimento de FTO utilizado foi doado pelo professor Carlos Ferreira do Instituto Militar de Engenharia.

6.2 Preparação das amostras de vidro recoberto por filme fino de FTO

O vidro com recobrimento de FTO foi cortado em pedaços retangulares de 4 cm x 10 cm divididos posteriormente em retângulos de 4 cm x 8 cm, devido a necessidade de encaixe no suporte do experimento, utilizando um cortador de vidro manual, conforme pode ser observado na montagem da figura 23.

Posteriormente o FTO foi limpo com álcool isopropílico e lenço para limpeza de lentes, e logo em seguida marcado com um gabarito para fins de padronização de uma área retangular analisada no microscópio de 1 cm x 2,5 cm.

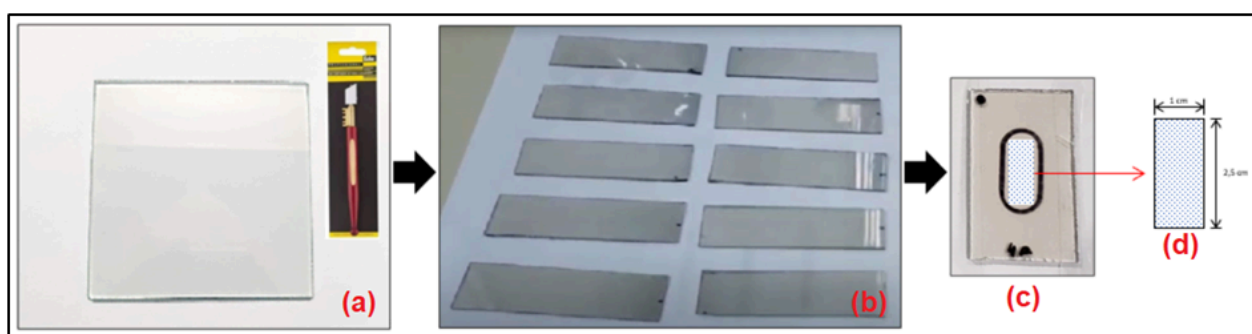


Figura 23: a) FTO de 20 cm x 20 cm + cortador de vidro manual; b) FTO cortado em retângulos de 4 cm x 10 cm; c) FTO cortado em retângulos de 4 cm x 8 cm, marcado a caneta com um gabarito; d) área analisada de 1 cm x 2,5 cm.

6.3 Procedimento para determinação da quantidade de poeira aderida à superfície do vidro recoberto por filme fino de FTO

O espelho empoeirado foi analisado no microscópio do fabricante ZEISS modelo Axioplan do laboratório LabNano do CBPF.

O FTO foi analisado no microscópio óptico digital modelo EVOCAM II do fabricante *Vision Engineering* do laboratório de metrologia da *SCHOTT Technologies Brazil*. As amostras foram fotografadas pelo microscópio digital com uma resolução de 5MP utilizando uma placa de captura HDMI e as imagens analisadas no software ImageJ [30].

Através do software foi feito um recorte de área 1 cm x 2,5 cm horizontalmente no centro da amostra (figura 23, item d) e eliminado o fundo branco inicial da amostra. A contagem foi realizada automaticamente pelo ImageJ através da função *Analyze Particles: show Outlines* que

realizou a contagem dos grãos de poeira e enumerou através do recorte tratado da imagem capturada pelo microscópio.

6.4 Caracterização do vidro recoberto por filme fino de FTO

A transmitância de luz do FTO foi caracterizada pelo equipamento espectrômetro *UV/Vis Spectrometer Lambda 25* do fabricante Perkin Elmer localizado no laboratório de análises químicas da fábrica *SCHOTT Technologies Brazil*. O espectrômetro foi utilizado na configuração padrão de fábrica e a amostra de FTO foi colocada em um suporte do próprio equipamento.

A espessura do vidro recoberto por filme fino de FTO foi medida com um paquímetro analógico universal do fabricante Mitutoyo de 200 mm, modelo 530-118.

A resistência elétrica do filme fino de FTO foi medida utilizando um multímetro do fabricante FLUKE modelo 106 na configuração de seleção de medição de ohmímetro, com as ponteiros distando aproximadamente 1 centímetro sob a superfície do FTO.

6.5 Monitoramento das condições ambientais do experimento

Para coletar os dados de temperatura e umidade ao longo do experimento foi construído um módulo registrador de dados desenvolvido para gravar os dados de temperatura e umidade em um cartão microSD a cada 1 segundo utilizando o sensor DHT11 [31].

Para registrar os dados de temperatura e umidade relativa do ar ao longo dos experimentos foi desenvolvido um circuito eletrônico registrador utilizando o software KiCad [32] e posteriormente foram montados os componentes e módulos eletrônicos na placa de circuito eletrônico montado em case para trilho DIN com os seguintes itens, conforme figura 24:

- a) Plataforma de prototipagem Arduino Nano [33];
- b) Módulo de cartão de memória microSD, modelo CEG011000 [34];
- c) Módulo *Real Time Clock* (RTC), modelo HW-689, *chipset* PCF8563T [35];
- d) Sensor de umidade e temperatura, modelo DHT11 [31];
- e) Módulo regulador de tensão modelo LM2596, conversor DC-DC *Step Down* [36];
- f) Borne duplo modelo KRE 2 vias, de entrada de 24 Vcc (positivo e negativo) [37];
- g) Placa de fenolite PCBilhada 10 cm x 10 cm [38];
- h) Suporte para placa de circuito para trilho DIN, fabricante PHOENIX CONTACT, modelo UM100 10 cm x 10 cm [39].

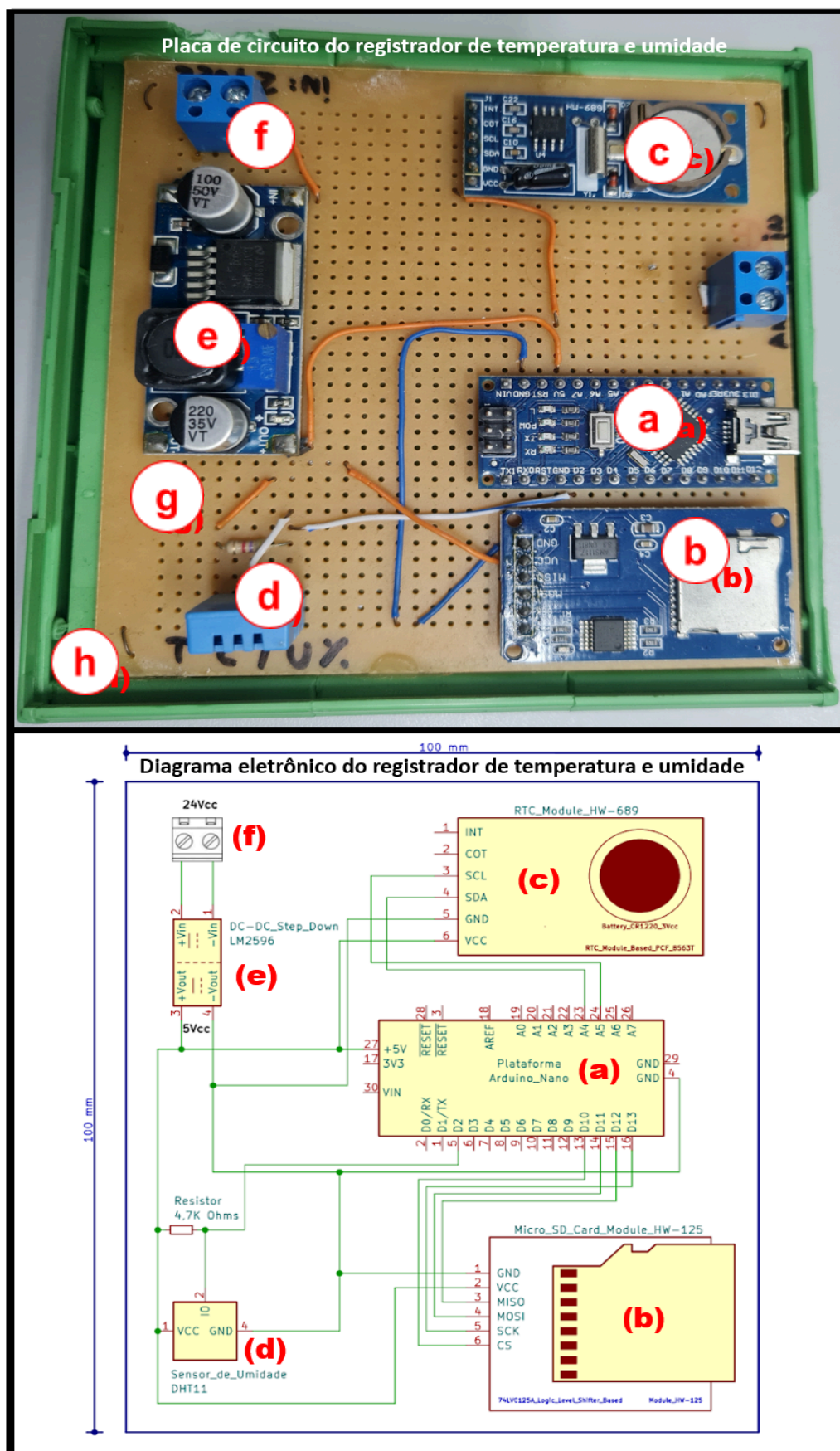


Figura 24: Foto da placa de circuito eletrônico montado em case para trilho DIN ao lado do diagrama eletrônico do registrador de temperatura e umidade.

A aquisição dos dados de temperatura e umidade relativa do ar são armazenados no cartão microSD do dispositivo em um arquivo de texto (.txt). O código fonte para aquisição de dados da plataforma Arduino Nano [33] foi escrito e compilado no Arduino IDE 2.0 [40] sendo publicado sob a licença de *software* livre conforme figura 25.

```
// Código fonte do circuito eletrônico de
// aquisição de dados de temperatura e
// umidade através do sensor DHT11

#include <PCF8563.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "DHT.h"

#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
#define CS 10

PCF8563 pcf;
File myFile;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pcf.init();
  pcf.startClock();
  dht.begin();
  Serial.print("InitializingSD card...");

  if (!SD.begin(CS)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    while (1); }

  Serial.println("initialization done.");
  myFile = SD.open("test.txt",
  FILE_WRITE);

  if (myFile) {
    Serial.print("Writing to test.txt...");
    myFile.println("testing 1, 2, 3.");
    myFile.close();
    Serial.println("done."); }

  else {
    Serial.println("error opening test.txt"); }

  myFile = SD.open("test.txt");

  if (myFile) {
    Serial.println("test.txt.");
    while (myFile.available()) {
      Serial.write(myFile.read());}
    myFile.close(); }
  else {
    Serial.println("error opening test.txt"); } }

void loop() {
  Time nowTime = pcf.getTime();
  Serial.print(nowTime.day);
  Serial.print("/");
  Serial.print(nowTime.month);
  Serial.print("/");
  Serial.print(nowTime.year);
  Serial.print("--");
  Serial.print(nowTime.hour);
  Serial.print(":");
  Serial.print(nowTime.minute);
  Serial.print(":");
  Serial.print(nowTime.second);
  Serial.print("--");
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();

  if (isnan(h) || isnan(t)) {
    Serial.println(F("Failed to read from DHT
    sensor!"));
  }

  Serial.print(h);
  Serial.print(F("%"));
  Serial.print("--");
  Serial.print(t);
  Serial.print(F("°C"));
  Serial.print("--");

  myFile = SD.open("log.txt", FILE_WRITE);
  if (myFile) {
    myFile.print(nowTime.day);
    myFile.print("/");
    myFile.print(nowTime.month);
    myFile.print("/");
    myFile.print(nowTime.year);
    myFile.print("--");
    myFile.print(nowTime.hour);
    myFile.print(":");
    myFile.print(nowTime.minute);
    myFile.print(":");
    myFile.print(nowTime.second);
    myFile.print("--");
    myFile.print(h);
    myFile.print(F("%"));
    myFile.print("--");
    myFile.print(t);
    myFile.print(F("°C"));
    myFile.close();
  }

  else {
    Serial.println("Open file failed.");
    if (!SD.begin(CS))
    {
      Serial.println("initialization failed!");
    }
    delay(30000);
  }
}
```

Figura 25: Código fonte do registrador de dados de temperatura e umidade relativa do ar desenvolvido.

O diagrama em blocos da figura 26, ilustra as etapas de funcionamento do registrador, que recebe os dados de temperatura e umidade relativa do ar do sensor DHT11 [31], bem como as informações precisas de data e hora do módulo RTC [35]. Esses dados são agrupados em um arquivo de texto (.txt) e armazenados no cartão de memória microSD através de um módulo de leitura e gravação de dados [34]. Posteriormente esse cartão MicroSD pode ser retirado, encaixado em um leitor de cartões no computador e aberto no bloco de notas.

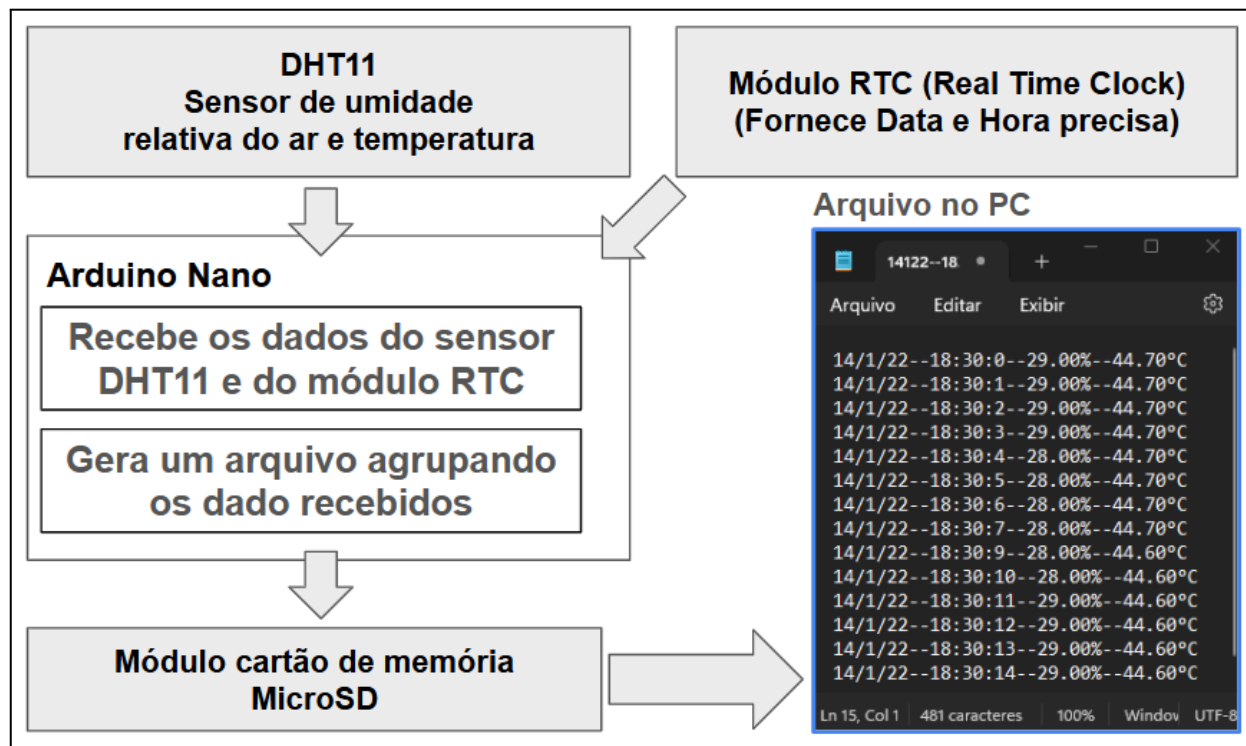


Figura 26: Diagrama em blocos representando os passos de execução do registrador de temperatura e umidade relativa do ar.

O registrador foi montado ao lado da bancada do experimento em trilho padrão DIN e energizado através de uma fonte de 24 Vcc.

6.6 Compressor com filtro desenvolvido para o experimento

Para realizar o experimento foi realizada a tentativa de utilizar o ar comprimido industrial disponível nas linhas de produção, porém, a presença de condensado e outras impurezas impossibilitava a continuidade dos experimentos. Mesmo após a adição de filtros e purgas não foi possível utilizar o ar comprimido industrial nos experimentos.

Portanto, houve necessidade de se construir um dispositivo compressor de ar com filtro em que fosse possível utilizar um ar livre de óleo, água e impurezas. O dispositivo construído possui um compressor de ar portátil enclausurado em um pote hermético que possui em sua entrada de ar um elemento filtrante de partículas sólidas de até 0,01 micrômetros, aerossóis de água e óleo e alta capacidade de retenção de impurezas [41]. Para controlar a vazão do compressor foi utilizado um

circuito de controle de tensão elétrica com mostrador de LED e um manômetro de Bourdon na saída de ar. Segue a lista com os componentes e suas respectivas montagens, conforme figura 27:

- a) um pote hermético do tipo *easy lock* 2400 ml [42];
- b) um compressor de ar portátil do fabricante Tramontina de 300 psi, tensão de entrada 12Vcc, corrente de operação de 4,5 A e potência de 50 W [43];
- c) circuito regulador de tensão com 24 Vcc de entrada e 0 a 12 Vcc de saída ajustável [44];
- d) conectores de ar comprimido de engate rápido de 6 mm (compressor/saída);
- e) aproximadamente 15 cm de mangueira de ar comprimido de 6 mm;
- f) conector rosqueado modelo *Jack P4* fêmea de entrada de tensão [45];
- g) chave de liga e desliga (*switch* comum) de 5 A;
- h) fios flexíveis de 2,5 mm de diâmetro para realizar as ligações elétricas;
- i) filtro de ar do fabricante *Donaldson Filtration Solutions* modelo *Depth Filter UltraPleat SMF* [41].

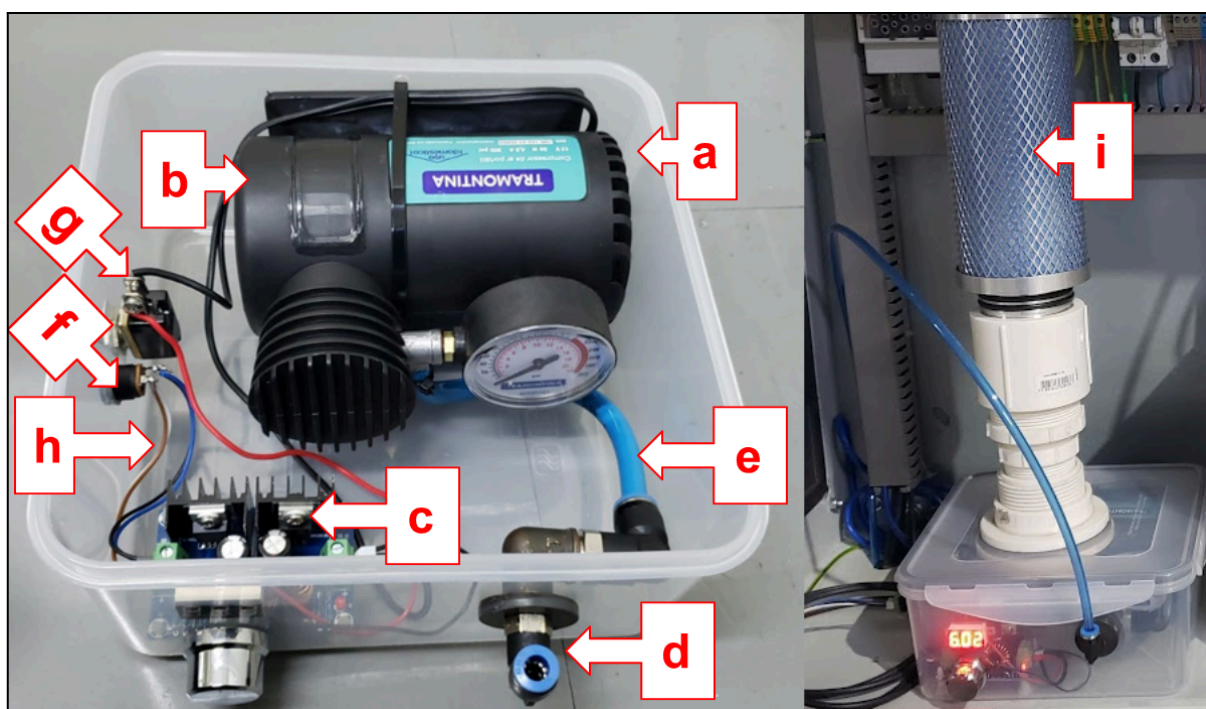


Figura 27: Colagem de fotos do sistema de compressor de ar com filtro desenvolvido.

O sistema de compressor de ar foi conectado a uma pistola de ar ionizado através de uma mangueira de ar de aproximadamente 1,5 m de comprimento com 6 mm de diâmetro. O seu funcionamento foi ajustado para trabalhar com vazão constante de aproximadamente 10 l/h e pressão constante de aproximadamente 200 mbar.

6.7 Montagem do experimento

Foram realizados experimentos de exposição de amostras de FTO retangulares de 4 cm x 8 cm sofrendo ação superficial de jato de ar ionizado e não-ionizado a uma distância de 10 cm, a fim de manter a mesma distância de fixação dos espelhos na estrutura no equipamento detector. Durante os experimentos as amostras foram expostas individualmente.

No experimento, a amostra de FTO e a pistola de ar modelo SHOCKLESS do fabricante Static Control [46] ficam presas a uma estrutura plástica com ângulo de 45° em relação à base, a fim de simular a posição original do espelho no equipamento detector industrial. Para ionizar o ar foi utilizada uma fonte geradora de tensão eletrostática de 20 kV modelo SHOCKLESS [47] do mesmo fabricante da pistola de ar.

Durante o experimento, o filme fino de FTO esteve com a superfície exposta ao jato de ar ionizado e não-ionizado. Durante o experimento de jato de ar ionizado, foi conectado um osciloscópio modelo TBS 1022 do fabricante Tektronix de 25 MHz com registrador de dados integrado, através de uma garra tipo jacaré com a ponteira positiva no FTO e a negativa aterrada, verificando que há carregamento elétrico da superfície.

Um registrador de dados de temperatura e umidade foi colocado para monitorar o ambiente. A montagem do experimento pode ser observada na ilustração da figura 28.

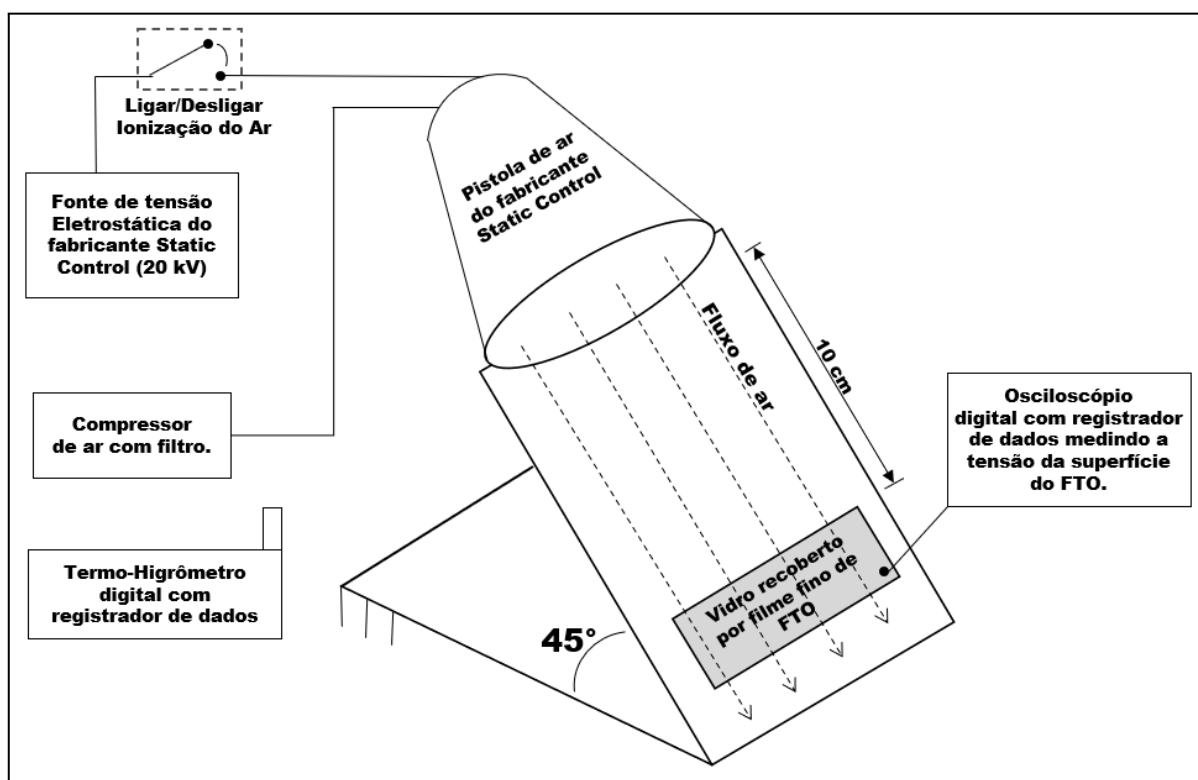


Figura 28: Ilustração da montagem do experimento.

A bancada do experimento foi instalada próxima a linha de produção ao lado do detector de defeitos dos tubos de vidro a fim de simular as mesmas condições de operação do equipamento (figura 29).

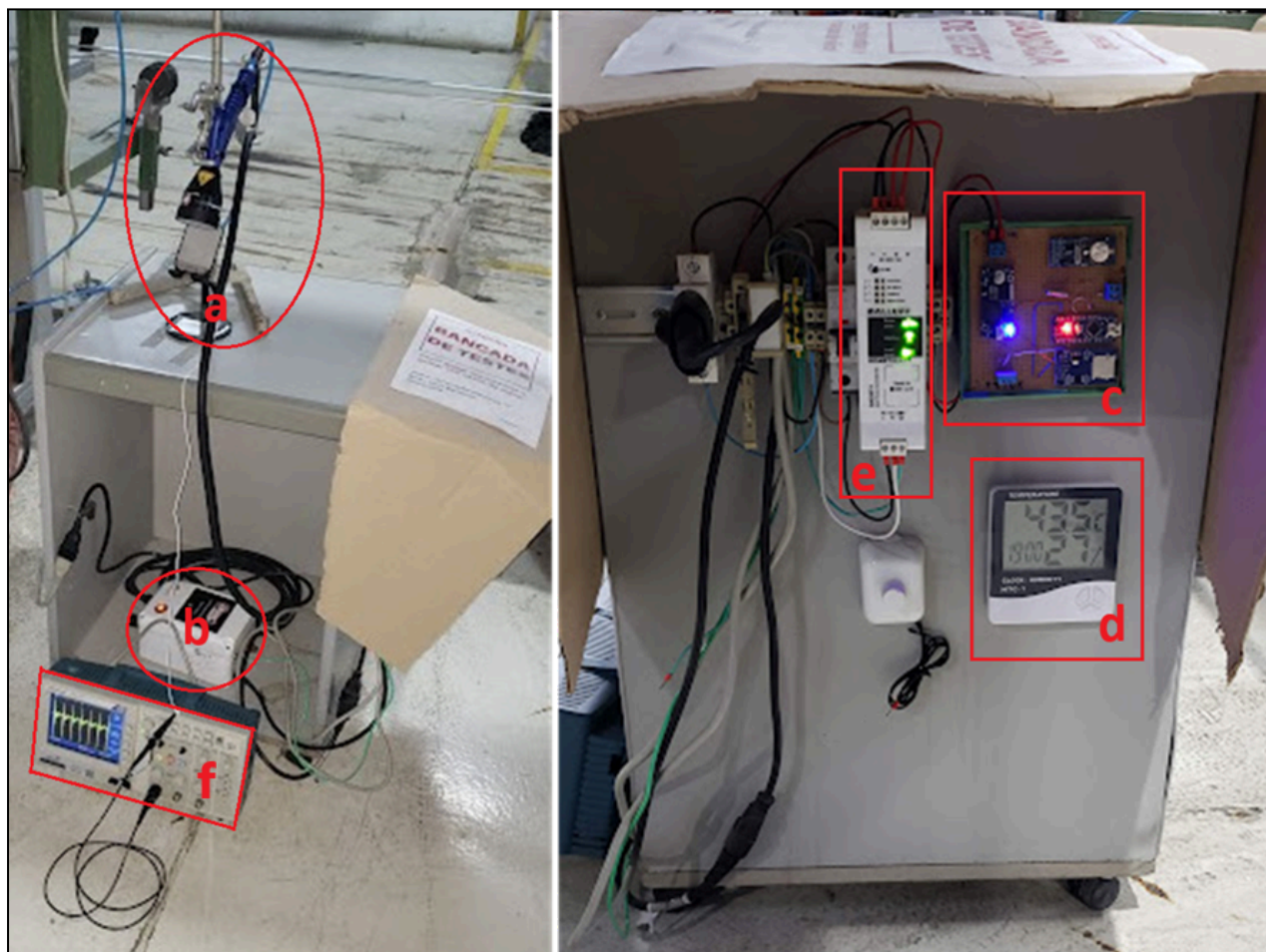


Figura 29: Bancada de testes na linha de produção: a. Pistola de ar ionizado apontada para o vidro recoberto por FTO montada em suporte plástico, conforme a figura 25; b. Fonte geradora de tensão eletrostática; c. Sistema de aquisição de dados de temperatura e umidade relativa do ar (capítulo 6.5); d. Mostrador de temperatura e umidade relativa do ar; e. Fonte de 24Vcc (capítulo 6.5); f. Osciloscópio digital com registrador de dados.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Análise do espelho

A obtenção das imagens da superfície do tubo de vidro pelo detector ocorre através da reflexão do plano imagem em um espelho de primeira superfície de alumínio. Um espelho empoeirado foi retirado do equipamento para inspeção visual e comparado com um espelho limpo conforme pode ser observado na figura 30, itens a e b, respectivamente.

O espelho empoeirado foi analisado no microscópio óptico com magnificação de 10X. As análises iniciais mostram a existência de grãos de poeira com formas variadas e com larguras e comprimentos variados, uma delas chegando a ter $9,91 \mu\text{m} \times 31,04 \mu\text{m}$, conforme pode ser observado na figura 30, item c. O espelho novo não apresenta grão de poeira na superfície.

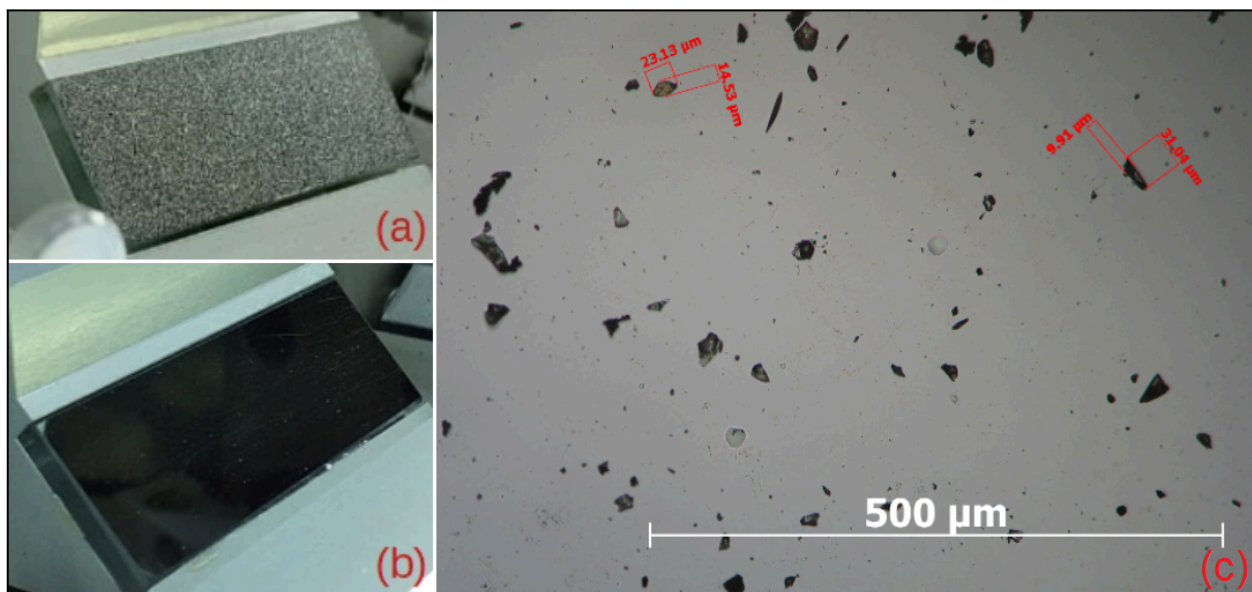


Figura 30: Comparativo entre: a) espelho empoeirado; e, b) espelho novo; c) imagem de microscopia óptica com magnificação de 10X mostrando os grãos de poeira.

7.2 Caracterização do FTO

A espessura do vidro recoberto por filme de FTO possui 1 mm de espessura e teve a transmitância caracterizada a fim de garantir que a maior parte do espectro visível do comprimento de onda seja transmitido, prevenindo que artefatos possam ser identificados como defeitos nos tubos de vidro pelo detector.

O resultado da análise do FTO no UV/VIS (figura 31) demonstrou que a transmitância ficou entorno dos 80% na região do espectro visível, o que é suficiente para não interferir nas imagens capturadas e processadas pelo detector.



Figura 31: Resultado da transmitância do FTO no UV/VIS.

A resistência elétrica foi medida para demonstrar a faixa de valor ôhmico característico do filme fino de FTO e o resultado foi de $(11,46 \pm 0,02) \Omega$.

A tabela 1 demonstra que pela faixa de resistividade e pela transmitância característica trata-se de um FTO de padrão comercial tipo NSG TEC 10, código S302 de 1 mm de espessura [48].

Substrate	TEC 8		TEC 10		TEC 15		
Product Code	S301	S2001S1	S302	S2002S1	S303	S304	S2004S1
Size	20mm x 15mm	25mm x 25mm	20mm x 15mm	25mm x 25mm	20mm x 15mm	20mm x 15mm	25mm x 25mm
Glass Thickness	2.2 mm		1 mm	1.1 mm	3.2 mm	2.2 mm	2.1 mm
Glass Type	Soda Lime Glass						
FTO Type	NSG Tec 8A		NSG Tec 10		NSG Tec 15		
FTO Thickness	600 nm		750 nm		400 - 450 nm		
FTO Quoted Sheet Resistance	6 - 9 Ω/square		11 - 13 Ω/square		12 - 14 Ω/square		
FTO Measured Sheet Resistance*	6.70 ± 0.27 Ω/square		9.39 ± 0.38 Ω/square		12.46 ± 0.50 Ω/square		
FTO Roughness	34.8 nm		45 nm		12.5 nm		
FTO Work Function	4.4 eV - 4.7 eV						
FTO Transmission	76.4%		83.4%		83.5%		
Packaging	Adhesive-free surface protection tape and cardboard box						

*Sheet resistances measured using the [Ossila Four-Point Probe System](#).

Tabela 1 - Tipos comerciais de FTO [48].

7.3 Determinação da taxa de deposição dos grãos de poeira em condições de produção vidreira

Para definir a quantidade de poeira que será acumulada ao longo do tempo na superfície do FTO exposto às condições ambientais da produção industrial vidreira foi necessário montar um experimento com a exposição de amostras de FTO por períodos determinados. Os períodos foram arbitrados em 12 horas, 24 horas, 36 horas, 48 horas e 72 horas.

Portanto, foram cortadas formas retangulares de vidro recoberto por FTO com medidas de 4 cm x 8 cm sob uma folha branca de papel A4 e expostos em um local com condições semelhantes às dos equipamentos detectores da linha de produção (figura 32).

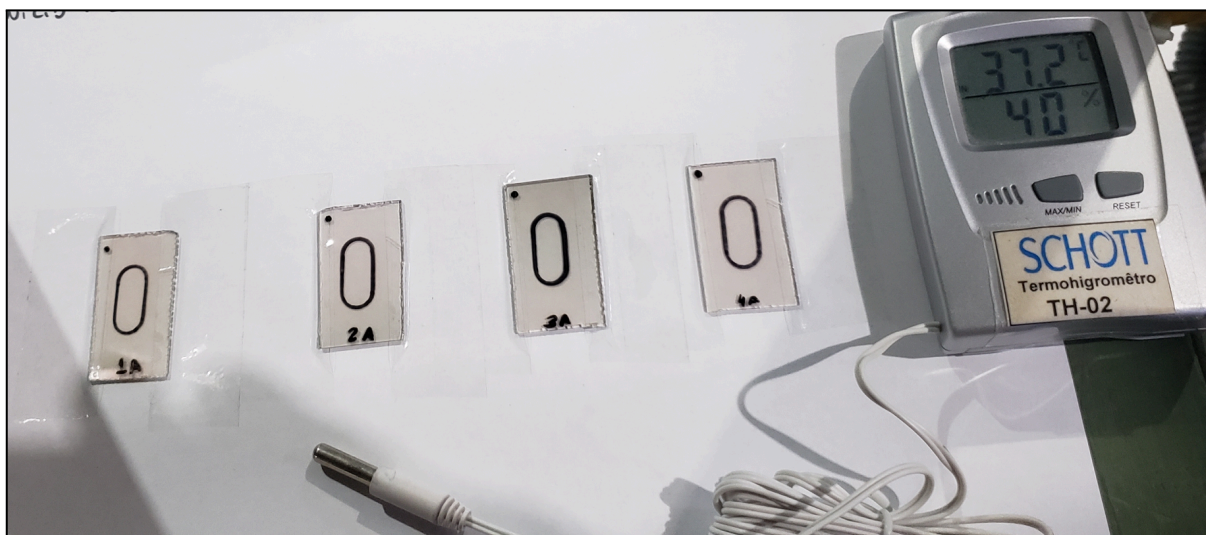


Figura 32: Imagem das amostras de FTO sendo exposta no ambiente de produção vidreira, termo-higrômetro [49] ao lado.

A contagem das amostras foi feita utilizando o software ImageJ automaticamente. A área analisada das amostras compreende um retângulo de 2,5 cm x 1 cm. O gráfico da figura 33 ilustra o aumento de concentração de grãos de poeira na superfície das amostras de FTO ao longo do tempo na mesma área analisada. O experimento foi realizado uma única vez a fim de obter parâmetros iniciais. O gráfico demonstra uma tendência de aumento crescente na concentração de grãos de poeira.

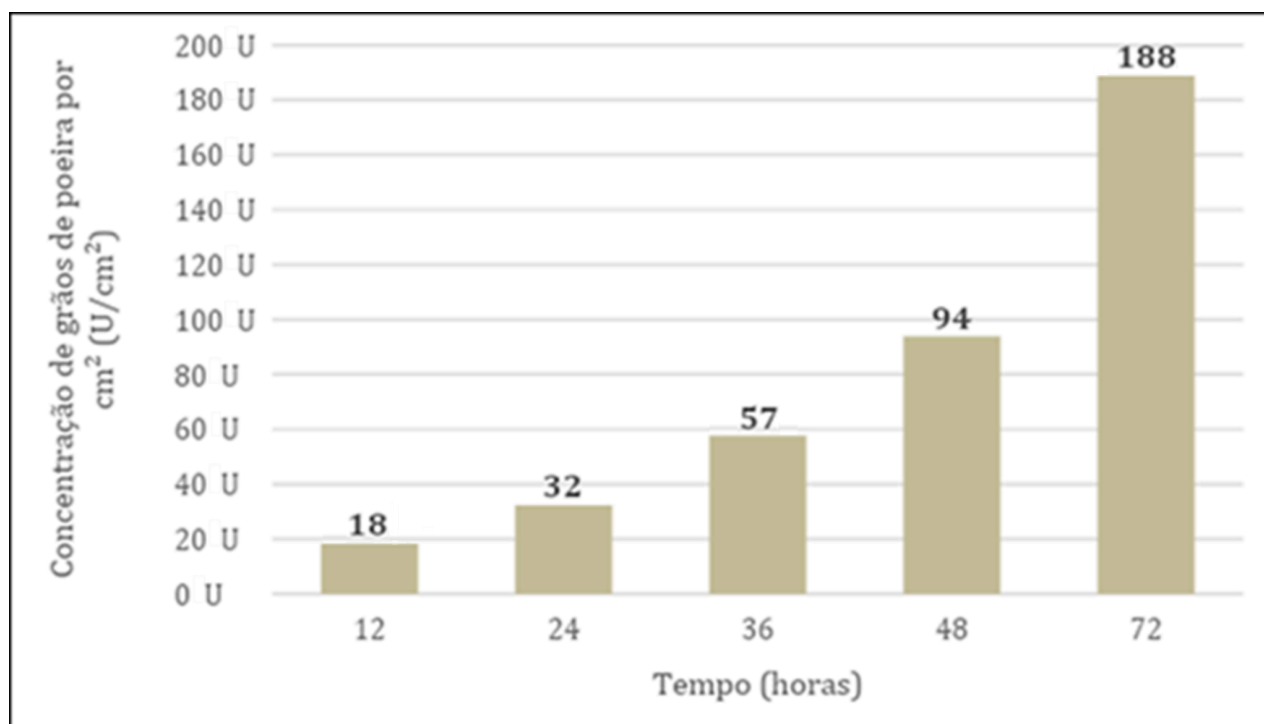


Figura 33: Gráfico da concentração de poeira pelo tempo de amostragem.

A temperatura e a umidade coletadas durante todo o experimento podem ser analisadas no gráfico da figura 34, abaixo. Houveram pequenas variações de temperatura e umidade que não se refletem no acúmulo de grãos de poeira por área (figura 31).

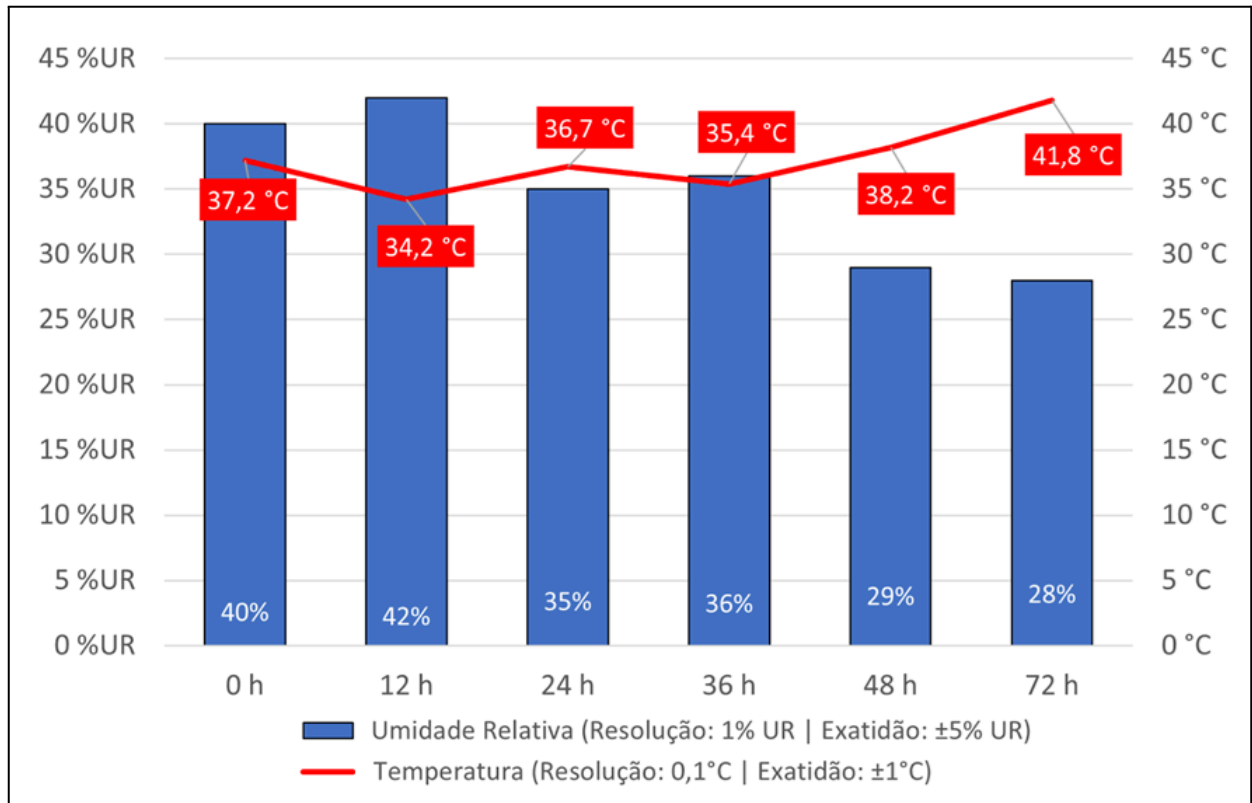


Figura 34: Gráfico de temperatura e umidade relativa durante o experimento.

Os dados analisados na exposição das amostras de FTO demonstraram que o período de 72h é suficiente para o acúmulo substancial de grãos de poeira e essa faixa de tempo foi utilizada como base para os demais experimentos, definindo assim um comparativo entre os experimentos do FTO com a aplicação de jato de ar ionizado e não-ionizado.

7.4 Influência da ionização da superfície no acúmulo de poeira

Foram realizados experimentos de exposição de amostras retangulares de 4 cm x 8 cm sofrendo exposição de jato de ar ionizado a uma distância de aproximadamente 10 cm, posicionadas com um ângulo de 45°, simulando a disposição real do espelho no equipamento detector. Na sua frente, em uma base plástica, foi presa uma pistola de ar, ora com o circuito eletrônico gerador de alta tensão ligada e ionizando o ar, ora desligada e apenas com a função de jato de ar (figura 28).

Os dados de temperatura e umidade do ar no local foram coletados em todos os casos do experimento. Nos experimentos em que havia ionização do ar com a pistola foram coletados também os dados do sinal de tensão elétrica da superfície do FTO com um osciloscópio na função registrador de dados.

A diferença de potencial elétrico na superfície das amostras de FTO se manteve estável em todos os experimentos, com os valores aproximados (tabela da figura 35) obtidos pelo

osciloscópio. A figura 35 mostra a tela do osciloscópio com o sinal característico da diferença de potencial elétrico na superfície do FTO medida através de uma garra tipo jacaré presa na sua lateral.

O sinal analisado pelo osciloscópio demonstra que houve uma mudança na carga elétrica superficial do FTO em tensão alternada induzida pelo ar ionizado e, possivelmente, da interação entre os grãos de poeira e a superfície do FTO. Esta informação é apenas um indicativo de que houve uma tensão induzida na superfície do filme fino.

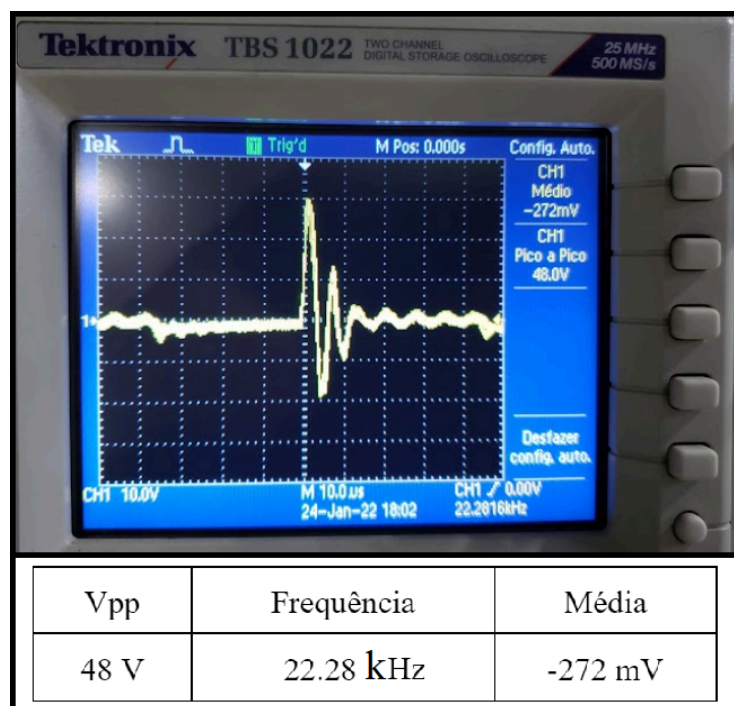


Figura 35: Colagem da janela com o sinal medido e da tabela com os valores de tensão e frequência medidos com o osciloscópio.

A superfície das amostras foi fotografada pelo microscópio e analisadas pelo *software* ImageJ na função de contagem automática dos grãos de poeira. A composição da análise pode ser observada na figura 36, abaixo.

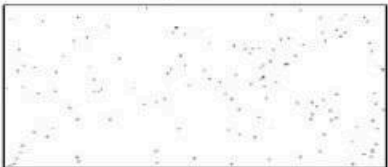
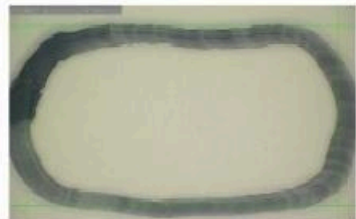
Exposição	Jato de ar não ionizado	Jato de ar ionizado
24 h	 	 
48 h	 	 
72 h	 	 

Figura 36: Fotos das amostras de exposição dos experimentos de jato de ar ionizado e não ionizado e as suas concentrações de poeiras analisadas pelo *software* ImageJ.

Os experimentos foram realizados com foco em demonstrar os resultados após 72 horas de exposição, pois foi o tempo em que as concentrações de poeira nos espelhos estavam em nível crítico, gerando artefatos nas imagens capturadas pelas câmeras do equipamento. Foram realizados três experimentos de 72 horas cada e a incerteza foi baseada no desvio padrão percentual. Os resultados dos experimentos de jato de ar ionizado e não ionizado e as suas concentrações de poeiras analisadas podem ser observados na figura 37, abaixo.

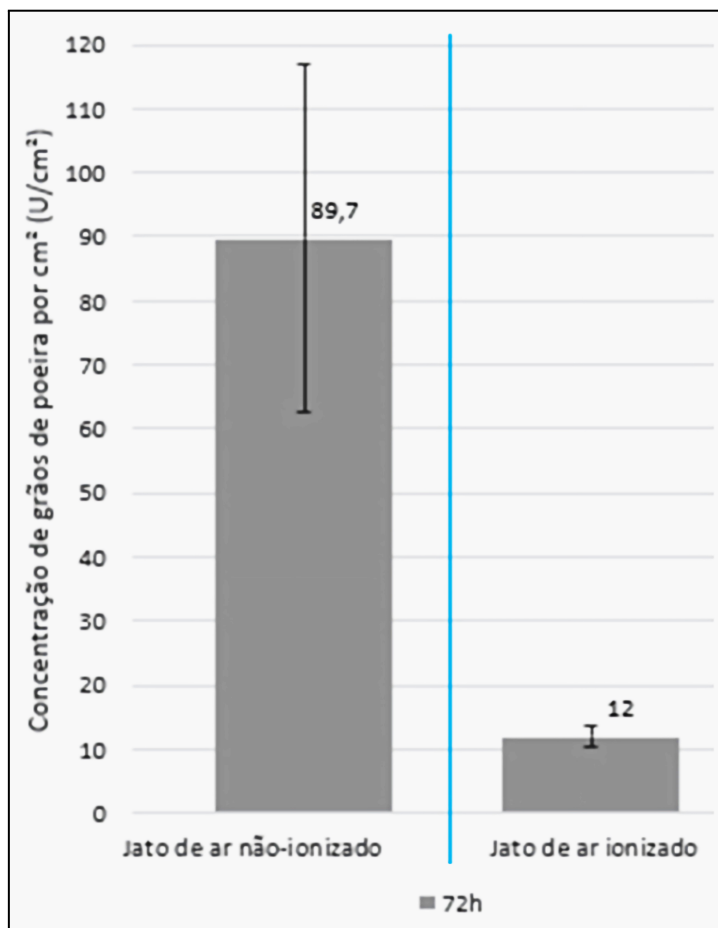


Figura 37: Gráfico das concentrações de poeira após aplicação de jato de ar ionizado e não ionizado no período de 72 horas.

Os grãos de poeira são carregados naturalmente pelo efeito triboelétrico, como visto em Toth III et al [25] na distribuição dos grãos de areia nos copos coletores. Isso reforça os resultados apresentados, onde o jato de ar afasta os grãos para longe da área de interesse, dado que as condições do ambiente de produção vidreira possuem similaridade com o experimento apresentado. Além disso, ao adicionar ar ionizado o efeito de arraste dos grãos de poeira pode estar sendo amplificado pelas cargas adicionais.

Segundo Mohammed et al [27], os grãos de poeira podem mudar a trajetória conforme o carregamento alternado em superfícies inclinadas. Comparativamente, foi observado que o filme de FTO utilizado do processo foi carregado pelo ar ionizado (figura 35) e possivelmente este processo contribuiu para evitar o acúmulo de poeira na sua superfície.

A eficiência da aplicação de jato de ar ionizado (JAI) em comparação com apenas jato de ar (JA) é dada por:

$$E (JAI/JA) = 100 - (JAI \times 100 / JA) \%$$

$$E (JAI/JA) = 100 - ((12 \times 100) / 89,7) \%$$

$$E (JAI/JA) = 100 - (1200 / 89,7) \%$$

$$E (JAI/JA) = 100 - 13,37 \%$$

$$E (JAI/JA) = \mathbf{86,63 \%}$$

Comparando os dados de mitigação de acúmulo de poeira entre as amostras dos experimentos preliminares (sem nenhum tratamento) e os experimentos do FTO exposto com jato de ar não-ionizado e jato de ar ionizado podemos observar que houve uma queda das concentrações de grãos de poeira que foram respectivamente de 188,8 U/cm², 89,7 U/cm² e 12 U/cm² nos experimentos de 72 horas de exposição.

Calculando a eficiência entre os experimentos de jato de ar ionizado (JAI) e as amostras preliminares (AP), temos o seguinte resultado:

$$E (JAI/AP) = ((AP / JAI) \times 100) \%$$

$$E (JAI/AP) = ((188,8 / 12) \times 100) \%$$

$$E (JAI/AP) = (15,7333 \times 100) \%$$

$$E (JAI/AP) = \mathbf{1573,33 \%}$$

8 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos pôde-se constatar que a instrumentação desenvolvida com uma combinação de jato de ar filtrado e ionizado e vidro recoberto por filme fino de FTO reduziu o acúmulo de poeira em até quinze vezes se comparado com amostras de controle (sem tratamento). Além disso, o experimento de jato de ar ionizado obteve um resultado de concentração de grãos de poeira sete vezes menor se comparado com as amostras onde houve aplicação de jato de ar não-ionizado.

Devido às características ópticas de transparência, não houve alteração na detecção do equipamento, portanto, a instrumentação desenvolvida mostrou-se segura para a aplicação em espelhos de detectores industriais montados em ambiente de produção vidreira.

A instrumentação desenvolvida tem potencial para reduzir as perdas de produção nos detectores de defeitos nos tubos de vidro por reduzir as elevadas perdas causadas por artefatos que são confundidos com defeitos, causados principalmente pela poeira acumulada.

A intervenção no detector também pode ser reduzida, seja para realização da limpeza dos espelhos ou mesmo para a substituição dos espelhos em casos extremos, onde o acúmulo de poeira acaba por causar arranhões profundos devido às inúmeras intervenções de limpeza que se somam ao longo do tempo. A limpeza pode levar em torno de quinze minutos e pode ocorrer mais de uma vez por turno de trabalho (turnos de doze horas) e a substituição do detector não pode ser realizada com o equipamento em operação na linha de produção o que leva a troca do equipamento detector e movimentação para a oficina de manutenção, levando cerca de uma hora entre a retirada de um detector e a instalação de outro, além, das configurações do novo detector, parametrizações, *checklist* de operação, processos administrativos, até a normalização do processo produtivo.

Gerando um excedente de produção que pode vir a ser de até quinze horas mensais, levando em consideração apenas uma limpeza por turno em trinta dias de produção contínua.

9 DESAFIOS FUTUROS

Este estudo desenvolveu uma instrumentação voltada para reduzir o acúmulo de poeira em espelhos no ambiente da indústria vidreira. Embora os resultados tenham sido promissores, ainda há questões em aberto e possibilidades para pesquisas futuras. Entre os desafios, incluem-se a análise da dinâmica dos grãos de poeira por meio de filmagem, explorando como se comportam em testes com ar ionizado e não ionizado, além de investigar o comportamento do acúmulo de grãos de poeira aplicando um campo estático diretamente no FTO. Outras direções incluem a realização dos mesmos experimentos de aplicação ar ionizado utilizando placas de vidro comuns e a caracterização físico-química dos grãos de poeira do ambiente de indústria vidreira. Do ponto de vista teórico, precisamos aprofundar o entendimento da relação entre a energia de superfície e a interação com a poeira em suspensão no ar, um fenômeno ainda pouco explorado para ambientes de indústria vidreira.

BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS

- [1] SCHOTT AG. Tubos farmacêuticos de vidro tipo I. 2020. Disponível em: <https://www.schott.com/pt-br/products/pharmaceutical-tubing-p1000372>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- [2] SCHOTT AG. *PerfeXion® - A Zero Defect Approach*. 2021. Disponível em: <https://www.schott.com/en-au/products/pharmaceutical-tubing-p1000372/perfexion>. Acesso em: 30 ago. 2023.
- [3] POLAR COMPONENTES. LC-152 400ML Aerojet. Disponível em: <https://polarb2b.com/documentos/20170719/data-sheet-lc152400ml-aerojet-012070-596f63489d724.pdf>. Acesso em: 21 out. 2024.
- [4] FSM. *First Surface Mirror Manufacturing*. 2021. Disponível em: <https://firstsurfacemirror.com/>. Acesso em: 06 set. 2022.
- [5] ARAÚJO, Eudes Borges de. Vidro: Uma Breve História, Técnicas de Caracterização e Aplicações na Tecnologia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, p. 325-329, 1997. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v19a34.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.
- [6] EUROPEAN PHARMACOPOEIA. Glass containers for pharmaceutical use. 4th ed. Strasbourg: EDQM, 2004. 1 CD. Disponível em: <https://www.edqm.eu/en/european-pharmacopoeia-ph.-eur.-11th-edition>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11819: frascos de vidro para produtos farmacêuticos - requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/1730/nbr11819-frascos-de-vidro-para-produtos-farmaceuticos-requisitos-e-metodos-de-ensaio>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- [8] SCHOTT. SCHOTT FIOLAX® clear and FIOLAX® amber. Disponível em: <https://www.glassonline.com/schott-fiolax-clear-and-fiolax-amber/>. Acesso em: 2 ago. 2024.
- [9] SCHOTT AG. *Glass Melting and Hot Forming*. Disponível em: <https://www.schott.com/en-au/expertise/glass-melting-and-hot-forming?tab=17ebb5cd>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- [10] SCHOTT AG. Technical Glasses: Physical and Technical Properties. Mainz: SCHOTT, 2020. Disponível em: <https://www.schott.com/-/media/project/onex/shared/downloads/melting-and-hot-forming/390768-row-schott-technical-glasses-view-2020-04-14.pdf>. Acesso em: 31 out. 2024.

[11] SCHOTT AG. Technical Glasses: View into the world of high-tech glasses.

Disponível em:

<https://www.schott.com/-/media/project/onex/shared/downloads/melting-and-hot-forming/390768-row-schott-technical-glasses-view-2020-04-14.pdf?rev=960e310a31e6448592e60e576089019f>. Acesso em: 2 ago. 2024.

[12] MELO, Hercílio Gomes de; GUEDES, Isabel Correia. Apostila: Ligações Químicas – Capítulo 5: Forças de Van der Waals. Universidade de São Paulo, 2021. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7677670/mod_resource/content/1/Apostila-VDW%20e%20ligacoes%20de%20hidrogenio.pdf>. Acesso em: 17 set. 2022.

[13] NANOWERK. Triboelectric effect. Disponível em:

<https://www.nanowerk.com/reference/triboelectric-effect.php>. Acesso em: 16 dez. 2024.

[14] MELO, Pâmella Raphaella. "Série triboelétrica"; *Brasil Escola*. Disponível em:

<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/serie-triboeletrica.htm> . Acesso em 16 de dezembro de 2024.

[15] MOREIRA, Kelly Schneider et al. Materiais funcionais de baixo custo como transdutores de energia: triboeletricidade, flexoeletricidade e higroeletricidade. 2023. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em:

<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/30730> . Acesso em 17 de dezembro de 2024.

[16] TIPLER, Paul. Física para cientistas e engenheiros, Volume 1. LTC—Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2014.

[17] BOSS, Sergio Luiz Bragatto; ASSIS, Alice; CALUZI, João José. Stephen Gray e a descoberta dos condutores e isolantes: tradução comentada de seus artigos sobre eletricidade e reprodução de seus principais experimentos. Coleção PROPG Digital (UNESP), 2012.

[18] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[19] PIROVANI, Layara Lima. Preparação e caracterização de filmes de óxido de estanho dopados com flúor para aplicação como óxido condutor transparente. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes - RJ. Disponível em:

<<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Projeto-layara-para-defesa-versao-final-cd.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2022.

- [20] TRAN, Quang-Phu; FANG, Jau-Shiung; CHIN, Tsung-Shune. Properties of fluorine-doped SnO₂ thin films by a green sol–gel method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 40, p. 664-669, 2015.
- [21] QUEIROZ, José César Augusto de. Produção e análise do desempenho óptico e elétrico de filmes finos de SnO₂:F para aplicações fotovoltaicas. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [22] QUEIROZ, José César Augusto de. Deposição de filmes finos de FTO por cátodo oco. Orientador: Prof. Dr. Thércio Henrique de Carvalho Costa. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Laboratório de Processamento de Materiais por Plasma, slide 36. 2020. Apresentação de slides. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/18030006/>. Acesso em: 17 out. 2024.
- [22] AGILENT TECHNOLOGIES. *The basics of UV-Vis spectrophotometry*. 1. ed. [S.l.]: Agilent Technologies, 2012. Disponível em: <https://www.agilent.com/cs/library/primers/public/primer-uv-vis-basics-5980-1397en-agilent.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024.
- [23] HELERBROCK, Rafael. "Espectro eletromagnético"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/espectro-eletromagnetico.htm>. Acesso em 10 de dezembro de 2024.
- [24] Cher Lin Clara Tan, Shaokai Gao, Boon Siong Wee, Akua Asa-Awuku & Beng Joo Reginald Thio (2014). *Adhesion of Dust Particles to Common Indoor Surfaces in an Air-Conditioned Environment*, *Aerosol Science and Technology*, 48:5, 541-551, DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2014.898835>.
- [25] TOTH III, J. R.; RAJUPET, S.; SQUIRE, H.; VOLBERS, B.; ZHOU, J.; XIE, L.; SANKARAN, R. M.; LACKS, D. J. *Electrostatic forces alter particle size distributions in atmospheric dust*. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 20, p. 3181-3190, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-20-3181-2020>. Acesso em: 16 jul. 2024.
- [26] XIE, Li; LIU, Yakui; ZHOU, Cheng; WANG, Mark; LACKS, Daniel J.; ZHOU, Jùn. *A laboratory study of the electrostatic charge of individual sand particles lofted in an electric field*. *Aeolian Research*, v. 50, p. 100675, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875963721000124>. Acesso em: 16 jul. 2024.
- [27] MOHAMMED, Anwaruddin Siddiqui; YILBAS, Bekir Sami; AL-QAHTANI, Hussain; ABUBAKAR, Abba Abdulhamid; HAWWA, Muhammed; KASSAS, Mahmood. *Dust mitigation from inclined hydrophobic and hydrophilic surfaces under electrostatic repulsion*. *Journal of Electrostatics*, v. 109, p. 103536, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388620301194>. Acesso em: 16 jul. 2024.

- [28] CHOPRA, K. L.; MAJOR, S.; PANDYA, D. K. *Transparent conductors—a status review. Thin solid films*, v. 102, n. 1, p. 1-46, 1983, DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(83\)90256-0](https://doi.org/10.1016/0040-6090(83)90256-0).
- [29] BILGIN, VİLDAN et al. *Electrical, structural and surface properties of fluorine doped tin oxide films*. *Applied Surface Science*, v. 256, n. 22, p. 6586-6591, 2010.
- [30] ImageJ. *Image Processing and Analysis in Java*. Disponível em: <<https://imagej.net/ij/>>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- [31] Aosong Electronic Co. DHT11 SIP Packaged Temperature and Humidity Sensor. Disponível em: <<http://www.aosong.com/en/products-21.html>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- [32] KiCad. *A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*. Disponível em: <<https://www.kicad.org/>>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- [33] ARDUINO. Arduino Nano. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [34] EKT Katrangi Bros. *Arduino Micro SD Card Reader & Writer Module*. Disponível em: <<https://www.katranji.com/tocimages/files/357843-236238.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [35] ELETROGATE. Módulo *Real Time Clock* RTC I2C-PCF8563. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/modulo-real-time-clock-rtc-i2c-pcf8563>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [36] BAÚ DA ELETRÔNICA. Módulo Regulador de Tensão LM2596. Disponível em: <<https://www.baudaeletronica.com.br/modulo-regulador-de-tensao-lm2596.html>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [37] ELETROGATE. Conector Borne KRE 2 Vias. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/conector-borne-kre-2-vias>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [38] ROBOCORE. PCBilhada 10 x 10 cm. Disponível em: <<https://www.robocore.net/placa-circuito/pcb-ilhada-10x10cm>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [39] MOUSER ELECTRONICS. PHOENIX CONTACT, *Terminal Block Tools & Accessories*, code 2952020/UM100/10.00/GN6021. Disponível em: <<https://mou.sr/45bQQq0>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [40] ARDUINO. *Arduino IDE 2 Documentation*. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/software/ide-v2>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- [41] DONALDSON FILTRATION SOLUTION. *Depth Filter UltraPleat SMF*. Disponível em: <<https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/compressed-air-and-process/literature/emea/compressed-air-and-gas/filter-elements/industrial/smf-smfp-p-smf/f119081/eng/SMF-UltraPleat-Depth-Filter-Elements.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2023.

- [42] CASA E VÍDEO. Pote Hermético 2400ml Casa do *Chef Easy Lock*. Disponível em: <<https://www.casaevideo.com.br/pote-hermetico-2400ml-casa-do-chef-easy-lock-cv181852/p>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [43] TRAMONTINA. Compressor de Ar Portátil Tramontina para Carros 300 psi 50 W 12 V. Disponível em: <<https://www.tramontina.com.br/compressor-de-ar-portatil-tramontina-para-carros-300-psi-50-w-12-v/42330001.html>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [44] ELETROGATE. Módulo Regulador de Tensão 4-40V 8A *Step Down c/ Display* - XL4016. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/modulo-regulador-de-tensao-440v-8a-step-down-c-display-xl-4016>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [45] ELETRÔNICA ÔMEGA. Conector *Jack* P4 Fêmea (J4 2,1 mm) DC-022. Disponível em: <<https://www.eletronicaomega.com/produto/conector-jack-p4-femea-j4-21mm-dc-022.html>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [46] STATIC CONTROL BRASIL. Pistola de ar ionizada eletrônica. Disponível em: <https://staticcontrolbrasil.com.br/produto/pistola-de-ar-ionizada-eletronica/>. Acesso em: 21 out. 2024.
- [47] STATIC CONTROL BRASIL. Fonte eletrônica 20kV. Disponível em: <https://staticcontrolbrasil.com.br/produto/fonte-eletronica-20kv/>. Acesso em: 21 out. 2024.
- [48] FTO *Glass Substrates. Sheet resistances measured using the Ossila Four-Point Probe System*. Disponível em: <<https://www.ossila.com/products/fto-glass-unpatterned>>. Acesso em: 03 jul. 2022.
- [49] INCOTERM. Termo-higrômetro digital modelo 7666.02.0.00. Disponível em: <<https://www.incoterm.com.br/produto/7666-02-0-00-termo-higrometro-digital-temperatura-e-umidade-internas/2284>>. Acesso em 02 jul. 2024.
- [38] SHELBY, J. E. *Introduction to Glass Science and Technology*. 2. ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005. Disponível em: <https://www.vitalsource.com/products/introduction-to-glass-science-and-technology-james-e-shelby-v9781782625117>. Acesso em: 14 ago. 2024.

ANEXO A - DATASHEET DO SENSOR DHT11

AOSONG*Your specialist in innovating humidity & temperature sensors***Digital relative humidity & temperature sensor DHT11****1. Feature & Application:**

- *Good precision
- *Resistive type
- *Full range temperature compensated
- *Relative humidity and temperature measurement
- *Calibrated digital signal
- *Outstanding long-term stability
- *Extra components not needed
- *Long transmission distance, up to 100 meters
- *Low power consumption
- *4 pins packaged and fully interchangeable

2. Description:

DHT11 output calibrated digital signal. It applies exclusive digital-signal-collecting-technique and humidity sensing technology, assuring its reliability and stability. Its sensing elements are connected with 8-bit single-chip computer.

Every sensor of this model is temperature compensated and calibrated in accurate calibration chamber and the calibration-coefficient is saved in type of programme in OTP memory, when the sensor is detecting, it will cite coefficient from memory.

Small size & low consumption & long transmission distance(100m) enable DHT11 to be suited in all kinds of harsh application occasions. Single-row packaged with four pins, making the connection very convenient.

3. Technical Specification:

Model	DHT11	
Power supply	3.3-5.5V DC	
Output signal	digital signal via Aosong 1-wire bus	
Sensing element	Polymer humidity resistor	
Operating range	humidity 20-90%RH;	temperature 0~50Celsius
Accuracy	humidity +5%RH;	temperature +2Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 1%RH;	temperature 1Celsius
Repeatability	humidity +2%RH;	temperature +1Celsius
Humidity hysteresis	+1%RH	
Long-term Stability	+1%RH/year	
Interchangeability	fully interchangeable	

4.Dimensions: (unit---mm)

- 1 -

Aosong Electronics Co., Ltd.
<http://www.aosong.com>

Thomas Liu (Sales Manager)

Email: thomasliu198518@aliyun.com , sales@aosong.com