

Cristiano Vicente

**DESENVOLVIMENTO DE PELÍCULAS DE PDMS PARA O
AUMENTO DA EFICÁCIA LUMINOSA DE LÂMPADAS DE
OLED**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. André Avelino Pasa.

Coorientador: Dr. Vinícius Cláudio Zoldan.

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vicente, Cristiano

Desenvolvimento de películas de PDMS para o aumento da
eficácia luminosa de lâmpadas de OLED / Cristiano Vicente ;
orientador, André Avelino Pasa ; coorientador, Vinícius
Cláudio Zoldan. - Florianópolis, SC, 2014.

65 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

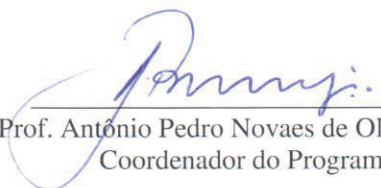
1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Filmes Finos.
3. OLED. 4. Eletroluminescência. 5. Eficácia Luminosa. I.
Pasa, André Avelino. II. Zoldan, Vinícius Cláudio. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Cristiano Vicente

**DESENVOLVIMENTO DE PELÍCULAS DE PDMS PARA O
AUMENTO DA EFICÁCIA LUMINOSA DE LÂMPADAS DE
OLED**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de **Mestre** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 17 de Março de 2014.

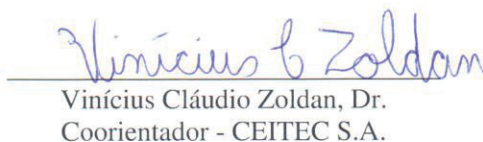


Prof. Antônio Pedro Novaes de Oliveira, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora:



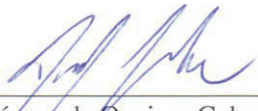
Prof. André Avelino Pasa, Dr.
Orientador/Presidente - UFSC



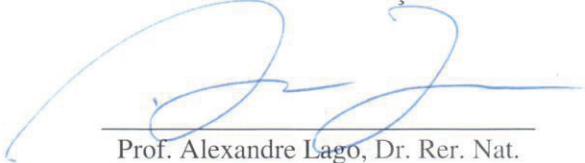
Vinícius Cláudio Zoldan, Dr.
Coorientador - CEITEC S.A.



Prof. André Roberto de Sousa, Dr.
Membro externo – UFSC



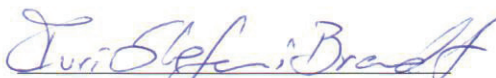
Daniel Távora de Queiroz Cobra, PhD.
Membro externo - Fundação CERTI



Prof. Alexandre Lago, Dr. Rer. Nat.
Membro titular – PGMat/UFSC



Prof. Alexandre da Cas Viegas, Dr.
Membro suplente – PGFsc/UFSC



Iuri Stefani Brandt, Dr.
Membro suplente – PGFsc/UFSC

Este trabalho é dedicado às três extraordinárias mulheres de minha vida, em ordem de “aparição”: Zelazia (*in memorian*), Kátia e Nádia.

AGRADECIMENTOS

Ao André, meu orientador, pela oportunidade de pesquisa no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies, pela orientação, paciência, amizade e principalmente por desenvolver no LFFS um espírito de família em que a palavra do dia (em todos os dias) é altruísmo.

Ao Vinícius pela coorientação e por me fazer acreditar – embora algumas vezes a contragosto – que sempre é possível ir um pouquinho além.

Aos amigos e colegas do LFFS (inclusive aos “importados”), pelas valiosas discussões na busca de soluções aos problemas enfrentados ao longo deste trabalho e nas colaborações na caracterização de amostras, viu Bruna?

Aos amigos e colegas da Fundação CERTI que sempre colaboraram nas discussões, no fornecimento das amostras de OLED e nas caracterizações dos ensaios luminotécnicos.

Àqueles que porventura minha idosa memória não permite mais nominar, mas que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

À Nádia, apoio incondicional e exemplo de amor, paixão, respeito e por propiciar as contingências adequadas, reforços positivos, reforços negativos (e, porque não, algumas punições?!) para o atingimento dos comportamentos-objetivo necessários à construção desta dissertação.

It doesn't matter how beautiful your theory is. It doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with the experiment, it's wrong.

(Richard Feynman, 1964)

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver películas finas de polidimetilsiloxano (PDMS) capazes de extrair luz de lâmpadas de diodo orgânico emissor de luz (OLED), provocando um aumento na eficácia luminosa. Diversos materiais e superfícies foram utilizados como molde para o desenvolvimento dos filmes de PDMS cujas superfícies foram caracterizadas utilizando-se perfilometria, interferometria óptica e microscopia eletrônica por varredura. Após a caracterização estrutural, os filmes de PDMS foram aplicados sobre o vidro da lâmpada OLED e a sua influência sobre a eficácia luminosa foi avaliada por meio da caracterização elétrica em esfera integradora. Na caracterização elétrica avaliou-se que os filmes obtidos utilizando-se vidro litografado proporcionaram aumentos na eficácia luminosa de 11% (filme com discos de 80 μm de diâmetro), de 16% (filme com discos de 20 μm de diâmetro) e de 22% (filme com discos de 50 μm de diâmetro). Um filme desenvolvido utilizando-se lixa comercial de granulometria de 1200 proporcionou um aumento da eficácia luminosa de 26%. O melhor resultado obtido no aumento da eficácia luminosa foi de 36% com a utilização do filme PDMS obtido a partir da utilização de vidro comercial jateado como molde, cujo resultado é similar ao obtido utilizando-se filme comercial. Em análise por meio de perfilometria, interferometria e microscopia eletrônica, evidenciou-se que os resultados mais expressivos no aumento da eficácia luminosa foram aqueles cuja rugosidade média quadrática do filme de PDMS era em torno de 5 μm e cujos picos possuem altura média em torno de 20 μm .

Palavras-chave: OLED, PDMS, polidimetilsiloxano, aumento da eficácia luminosa, desacoplamento óptico.

ABSTRACT

The main objective of this work is to develop polydimethylsiloxane (PDMS) thin film capable of extracting light from organic light emitting diode (OLED) lamps, increasing its luminous efficacy. Various materials and surfaces were used as substrate for the development of PDMS films whose surfaces were characterized using profilometry, interferometry and scanning electron microscopy. After the structural characterization, the PDMS films were applied on the OLED lamp glass and its influence on the luminous efficacy was assessed by electrical characterization in an integrating sphere. In the electrical characterization the films using lithographed glass increased the luminous efficacy by 11 % (film with discs with diameters of 80 μm), 16% (film with discs with diameters of 20 μm) and 22 % (film with discs with diameters of 50 μm). A film developed using commercial particle size of 1200 grit sandpaper increased the luminous efficacy in 26%. The best result in enhancing the luminous efficiency was 36% using the film obtained from the use of commercial sandblasted glass as substrate, which is similar to that obtained using commercial film. The analysis by profilometry, interferometry and electron microscopy showed that the most dramatic results in increasing the luminous efficacy were those whose mean square roughness of the PDMS film was around 5 μm and whose peaks have average height around 20 μm .

Keywords: OLED, PDMS, polydimethylsiloxane, enhancement of luminous efficacy, optical outcoupling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura simplificada de uma lâmpada OLED, extraída da fonte [4].	2
Figura 2 – Estrutura de um OLED, extraída da fonte [4].	5
Figura 3 – Ilustração do processo de extração da luz, adaptada da fonte [7].	6
Figura 4 – Ilustração do processo reflexão interna total. Em a), o feixe incide na interface dos dois meios em um ângulo θ_1 menor do que o ângulo crítico e consegue atingir o meio 2. Em b) o ângulo de incidência θ_1 é igual ao ângulo crítico e é refratado paralelamente à interface. Em c), o ângulo de incidência θ_1 do feixe é maior do que o ângulo crítico e ele é refratado de volta para o meio 1.	8
Figura 5 – Ilustração do processo de reflexão interna total em um OLED.	9
Figura 6 – Exemplo da aplicação dos plamons de superfície, extraída da fonte [30].	10
Figura 7 – Exemplo da aplicação das grades de baixo índice de refração, extraída da fonte [16]. Em a) as camadas estão separadas para mostrar o formato das grades de baixo índice. Em b) a estrutura montada com a deposição da camada orgânica e do eletrodo metálico sobre as grades, formando estruturas com alturas irregulares. Em c) uma ilustração do funcionamento do OLED com os LIGs que permitem extrair inclusive os fótons que tenderiam a ficar presos na camada orgânica.	11
Figura 8 – Exemplo da aplicação de filme de AAO, extraída da fonte [25].	12
Figura 9 – Exemplo da aplicação da estrutura nanofacetada de MgO, extraída da fonte [31].	13
Figura 10 – Imagem de Microscópio de Força Atômica (AFM) da estrutura nanofacetada de Azul da Prússia, com espessura de aproximadamente 600 nm, extraída da fonte [33].	13
Figura 11 – Imagem de AFM da estrutura nanofacetada de Azul da Prússia depositada sobre ITO.	14
Figura 12 – Ilustração da aplicação de texturização na superfície externa do OLED.	15
Figura 13 – Ilustração da aplicação de macrolentes com raios médios de 5 mm, extraída da fonte [34]. Em a) vê-se uma ilustração da aplicação das macrolentes. Em b) há uma ilustração de como os fótons se comportam em um OLED sem macrolente e c) ilustra o funcionamento de um OLED com a macrolente.	15
Figura 14 – Jateamento com areia da superfície do substrato de vidro, extraída da fonte [29]. a) Ilustração do processo de funcionamento do OLED com vidro jateado. b) OLED com as bordas do vidro jateadas. c) OLED com a superfície do vidro parcialmente jateada denotada pela letra F'. d) OLED sem tratamento de jateamento.	16
Figura 15 – Ilustração da aplicação do filme texturizado de PDMS, extraída da fonte [8]. a) Representação dos raios de luz em um OLED sem filme de PDMS, com uma parcela destes raios permanecendo presa no substrato por	

terem ângulo de incidência maior do que o ângulo crítico. b) Representação dos raios de luz em um OLED com o filme de PDMS, o qual modifica o ângulo de incidência dos raios, permitindo que uma quantidade maior de raios atinja a face externa do vidro.....	17
Figura 16 – Estrutura do polidimetilsiloxano.....	19
Figura 17 – Imagem do PDMS em processo de reticulação com presença de bolhas de ar.....	21
Figura 18 – Ilustração do processo de desenvolvimento do filme texturizado de PDMS. a) Estrutura de PDMS dentro dos nanofios de alumina. b) Nanofios de PDMS em água. c) Nanofios de PDMS no ar.....	22
Figura 19 – Ilustração do processo de litografia.....	23
Figura 20 – Padrões elaborados para a litografia. (a) Círculos com diâmetros de 20 μm e espaçamento de 8,8 μm . (b) Círculos com diâmetros de 20 μm e espaçamento de 20 μm . (c) Círculos com diâmetros de 50 μm e espaçamento de 23 μm . (d) Círculos com diâmetros de 80 μm e espaçamento de 19 μm ...	24
Figura 21 – Fotografia do Interferômetro a laser.....	27
Figura 22 – Fotografia do Microscópio de força atômica.....	27
Figura 23 – Fotografia do Microscópio eletrônico de varredura.....	28
Figura 24 – Exemplo de montagem do OLED na esfera integradora.....	29
Figura 25 – Montagem do OLED na esfera integradora.....	30
Figura 26 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme adesivo 3M 8141/8171.....	33
Figura 27 – Diagrama de cromaticidade de 1931, extraída da fonte [48].	34
Figura 28 – Diagrama de cromaticidade de um dispositivo OLED sem filme e com filme comercial 09N1-D.....	35
Figura 29 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme comercial 09N1-D.....	35
Figura 30 – Imagem de interferometria óptica do filme comercial Optmate 09N1-D.....	36
Figura 31 – Imagem de microscopia eletrônica do filme comercial Optmate 09N1-D.....	36
Figura 32 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme de PDMS sem texturização.....	37
Figura 33 – Gráfico de perfilometria da superfície do filme de PDMS sem textura.....	38
Figura 34 – Fotografia de um OLED com aplicação do filme produzido com alumina porosa.....	39
Figura 35 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando alumina porosa como molde.....	40
Figura 36 – Gráfico de perfilometria da superfície do filme de PDMS texturizado utilizando-se alumina porosa como molde.....	40
Figura 37 – Imagem de microscopia eletrônica do filme obtido utilizando-se alumina porosa como molde. a) Imagem do filme de PDMS, extraída da referência [8]. b) Imagem do filme de PDMS, desenvolvido neste trabalho..	41

Figura 38 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura do filme obtido com molde de vidro litografado com círculos de 20 μm de diâmetro.....	42
Figura 39 – Imagem de interferômetro do filme óptico do filme texturizado de PDMS com círculos de 20 μm de diâmetro e espaçamento de 8,8 μm	42
Figura 40 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando alumina vidro com discos de 20 μm de diâmetro e espaçamento de 8,8 μm como molde.....	43
Figura 41 – Imagem de microscopia eletrônica do filme obtido utilizando-se vidro litografado – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 20 μm	44
Figura 42 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura dos filmes de PDMS obtidos utilizando-se vidro litografado – diâmetro de 20 μm (As setas foram inseridas para indicar a diferença no ordenamento dos círculos entre os dois filmes.) a) Filme com espaçamento de 8,8 μm . b) Filme com espaçamento de 20 μm	45
Figura 43 – Imagem de interferometria óptica do filme texturizado de PDMS – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 20 μm	46
Figura 44 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 20 μm de diâmetro e espaçamento de 20 μm).	46
Figura 45 – Imagem de microscopia eletrônica do filme obtido utilizando-se vidro litografado – com círculos de diâmetro de 80 μm	47
Figura 46 – Imagem de interferometria óptica do filme texturizado de PDMS – com molde com círculos de diâmetro de 80 μm e espaçamento de 19 μm	47
Figura 47 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 80 μm de diâmetro).	48
Figura 48 – Imagem de interferometria óptica do vidro litografado com discos de diâmetros de 50 μm	49
Figura 49 – Imagem de interferometria óptica do filme de PDMS obtido utilizando-se o vidro com discos de diâmetros de 50 μm como molde.....	50
Figura 50 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 50 μm de diâmetro).	51
Figura 51 – Análise de perfilometria da superfície da lixa 1200 utilizando-se perfilômetro dektak.....	52
Figura 52 – Análise de perfilometria da superfície do filme de PDMS utilizando lixa 1200 como molde.....	52
Figura 53 – Imagem de interferômetro do filme texturizado de PDMS utilizando-se lixa 1200 como molde.....	53
Figura 54 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 50 μm de diâmetro).	54
Figura 55 – Análise de perfilometria da superfície do vidro jateado.	54
Figura 56 – Análise de perfilometria da superfície do filme de PDMS utilizando-se vidro jateado como vidro.....	55
Figura 57 – Imagem de microscopia eletrônica do filme texturizado obtido com molde de vidro jateado.....	55

Figura 58 – Imagem de interferômetro do filme texturizado de PDMS utilizando-se vidro jateado como vidro.....	56
Figura 59 – Diagrama de cromaticidade de um dispositivo OLED sem filme e com filme obtido a partir do vidro jateado.....	57
Figura 60 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme produzido com vidro jateado como molde.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos com filme comercial 3M 8141	32
Tabela 2 – Resultados obtidos com filme comercial 3M 8171	32
Tabela 3 – Resultados obtidos com filme comercial Optmate 09N1-D	33
Tabela 4 – Resultados obtidos com filme de PDMS sem textura	38
Tabela 5 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS utilizando-se alumina porosa como molde	39
Tabela 6 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 8,8 μm	43
Tabela 7 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 20 μm	45
Tabela 8 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetro de 80 μm	48
Tabela 9 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetros de 50 μm e espaçamento de 23 μm	50
Tabela 10 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS utilizando lixa 1200 como vidro.....	53
Tabela 11 – Resultados obtidos com filme texturizado utilizando-se vidro jateado como vidro	56
Tabela 12 – Resumo dos resultados obtidos de todos os filmes	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AFM – Microscópio de força atômica, do inglês *Atomic force microscope*
- BEF – Filme para aumento do brilho, do inglês *brightness-enhancement film*
- CEL – Camada eletroluminescente
- CTB – Camada transportadora de buracos, do inglês *hole transport layer (HTL)*
- CTE – Camada transportadora de elétrons, do inglês *electron transport layer (ETL)*
- ISFET – Transistor de efeito de campo sensível a íon, do inglês *Ion microelectromechanical systems*.
- ITO – Óxido de índio dopado com estanho, do inglês *Indium tin oxide*.
- LED – Diodos emissores de luz, do inglês *Light emitting diodes*
- LFSS – Laboratório de Filmes Finos e Superfícies.
- MEMS – Sistemas microeletromecânicos, do inglês *Sensitive Field Effect Transistor*
- OLED – Diodos orgânicos emissores de luz, do inglês *Organic light emitting diodes*
- PDMS – Polidimetilsiloxano
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

SUMÁRIO	xxiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
2 PRINCÍPIO ÓPTICO DE EXTRAÇÃO DA LUZ	5
2.1 O PROBLEMA DA BAIXA EFICÁCIA LUMINOSA	6
2.1.1 Reflexão Interna Total	7
2.1.2 Soluções para aumento da eficácia luminosa	9
2.1.2.1 Técnicas para modificação da estrutura interna das lâmpadas OLED	10
2.1.2.2 Técnicas para aumento da eficácia luminosa sem alteração na arquitetura dos OLEDs	14
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1 CARACTERÍSTICAS E PREPARAÇÃO DO POLIDIMETILSILOXANO	19
3.1.1 Preparação do PDMS	20
3.2 DESENVOLVIMENTO DO FILME DE PDMS UTILIZANDO-SE ALUMINA POROSA COMO PADRÃO DE MOLDURA	21
3.3 DESENVOLVIMENTO DO FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO-SE VIDRO COMO SUBSTRATO	22
3.3.1 Preparação da superfície das lâminas de vidro	22
3.3.2 Litografia	23
3.3.2.1 Desenvolvimento dos padrões para litografia	24
3.3.3 Preparação dos demais moldes de vidro para o desenvolvimento do filme de PDMS	25
3.3.4 Desenvolvimento do filme de PDMS	25
3.4 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E ELÉTRICA	26
3.4.1 Interferometria/Perfilometria	26
3.4.2 Microscopia de Força Atômica	27
3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	28

3.4.4 Medição do fluxo luminoso em Esfera Integradora	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 FILMES COMERCIAIS ADESIVOS 3M 8141 E 3M 8171	31
4.2 FILME ÓPTICO COMERCIAL OPTMATE 09N1-D	33
4.3 FILME DE PDMS SEM TEXTURA	37
4.4 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO ALUMINA POROSA COMO MOLDE	38
4.5 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 20 μm , ESPAÇAMENTO DE 8,8 μm)	41
4.6 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 20 μm , ESPAÇAMENTO DE 20 μm)	44
4.7 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 80 μm E ESPAÇAMENTO DE 19 μm)	47
4.8 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 50 μm E ESPAÇAMENTO DE 23 μm)	49
4.9 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO LIXA 1200 COMO MOLDE	51
4.10 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO JATEADO COMO SUBSTRATO	54
4.11 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS	58
5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A – Parâmetros para desenvolvimento do padrão para litografia do vidro	65

1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta dos dispositivos orgânicos emissores de luz (OLED) por Tang e VansLike [1], inicialmente com o propósito de aplicação em *displays*, tem havido interesse por parte das indústrias para que estes dispositivos sejam aplicados também em lâmpadas. À época da descoberta em 1987, os *displays* de televisão e monitores de microcomputadores baseavam-se principalmente na tecnologia de tubos de raios catódicos, cujo princípio de funcionamento baseia-se na projeção de elétrons de um filamento aquecido (cátodo) sobre um alvo de vidro, o qual é espesso, pesado e frágil. Já as lâmpadas utilizadas na época da descoberta dos OLEDs utilizavam principalmente a técnica de incandescência, que se baseia no princípio de que uma corrente passando por um filamento (em sua maioria de tungstênio) provoca o aquecimento do filamento até o ponto de torná-lo incandescente, irradiando luz visível.

Ambas as técnicas utilizadas para a produção de *displays* e de lâmpadas foram dominantes até a década seguinte, quando começaram a ser substituídas por técnicas mais baratas e com menor consumo de energia, como a de *displays* de cristal líquido (LCD) e a de fluorescência, respectivamente. Tais dispositivos atendem atualmente às necessidades da maioria dos consumidores residenciais e comerciais de forma satisfatória e assim permaneceriam por décadas, não fossem os diferenciais que os dispositivos baseados na tecnologia OLED vêm apresentando. A descoberta de novas tecnologias aliada às pressões pela busca de produtos com melhor eficiência energética como as impostas pela Comunidade Europeia [2] e pelos Estados Unidos [3] acabam influenciando para que sejam propostas soluções mais econômicas para iluminação como as lâmpadas OLED. A Comunidade Europeia estabeleceu uma previsão de substituição gradual das lâmpadas incandescentes e de baixa eficiência até o final de 2012 por lâmpadas que utilizem novas tecnologias. Foi previsto o estabelecimento de novas diretrizes a partir de 2014, porém até o presente momento não há informações disponíveis sobre novos documentos publicados.

Basicamente tanto um OLED quanto um LED (diodo emissor de luz) possuem o mesmo princípio de geração de luz por meio do estímulo de elétrons nos seus componentes com uma carga elétrica. A lâmpada OLED consiste na combinação de camadas orgânicas entre camadas de eletrodos, dos quais o cátodo é um composto geralmente metálico e o ânodo é transparente, por meio do qual os fótons atingem o meio externo. A grande diferença entre eles permanece no fato de que

os OLEDs são produzidos utilizando-se camadas de semicondutores orgânicos como o carbono, enquanto os LEDs utilizam cristais de materiais inorgânicos. Além disso, os LEDs geralmente são luzes pontuais que proporcionam um alto brilho de forma compacta enquanto os OLEDs são fontes que emitem luz difusa e suave, sendo mais adequados para luz ambiente, combinado com o fato de que a forma com que as moléculas se combinam e interagem nos materiais orgânicos são muito mais intensas do que nos materiais inorgânicos, amplia-se o potencial de desenvolvimento dos OLEDs de forma significativa.

A Figura 1 ilustra o esquema simplificado de montagem de uma lâmpada OLED, o qual possui quatro elementos principais: cátodo, camada emissora, ânodo e o substrato de vidro.

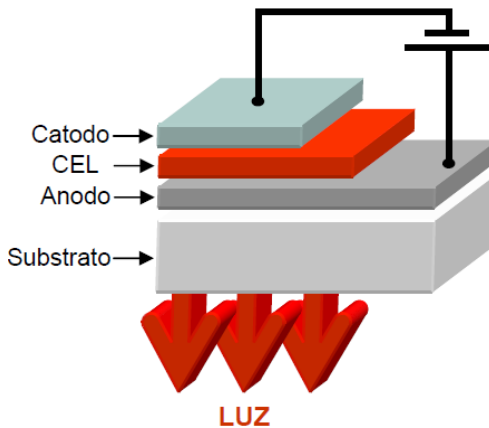


Figura 1 – Estrutura simplificada de uma lâmpada OLED, extraída da fonte [4].

Sobre o substrato de vidro, por onde a luz geralmente é extraída, é depositado o ânodo que na maioria das aplicações tem sido constituído de ITO (óxido de índio dopado com estanho) que é um semiconductor tipo-n transparente para que a luz possa ser extraída. Sobre a camada do ITO é realizada a deposição da camada orgânica emissora (CEL) que possui a característica eletroluminescente. Outra característica desta camada CEL é que ela possui capacidade de produzir a maioria das cores de acordo com seleção adequada dos materiais emissores. O cátodo, tendo em vista a não obrigatoriedade de ser transparente, é geralmente um metal ou uma liga metálica constituída de Mg, Ca, Ba ou Al [5]. Ao aplicar uma diferença de potencial entre os eletrodos (cátodo e ânodo), o ânodo será responsável

pela injeção de buracos e o cátodo pela injeção de elétrons, ambos sendo lançados em direção ao material eletroluminescente, se recombinando e dando origem a um estado ligado neutro chamado de éxciton. Os éxcitons gerados podem ser um singlete ou um tripleto, porém somente os singletos emitirão luz na forma do decaimento radioativo [6].

Entretanto, uma característica indesejada além da durabilidade ainda impede o desenvolvimento em grande escala: o fato da eficiência quântica externa¹ destes dispositivos ainda ser baixa, aproximadamente 20%, devido ao fato de que boa parte dos raios luminosos gerados internamente ficam presos entre as camadas internas do dispositivo [7-9]. Este trabalho foi motivado por uma demanda levantada pela Fundação CERTI por meio de um projeto existente com um fabricante de lâmpadas OLED para que fosse desenvolvido um filme capaz de aumentar a eficácia luminosa de lâmpadas OLED. Partindo desta necessidade, neste trabalho será apresentada uma técnica que aborda o desenvolvimento e a aplicação de um filme texturizado de PDMS, que permitirá aumentar a eficácia luminosa da lâmpada OLED.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver películas finas de PDMS capazes de extrair luz de lâmpadas OLED, provocando um aumento na eficácia luminosa.

1.1.2 Objetivos Específicos

Identificar as características do polidimetilsiloxano (PDMS);
Desenvolver filmes finos de PDMS com diferentes texturizações;
Caracterizar a estrutura do PDMS sobre substratos de vidro;
Aplicar filmes finos de PDMS de diferentes texturizações sobre as superfícies de vidro de lâmpadas OLED;

Avaliar o desempenho da estrutura de PDMS aplicado sobre o substrato de vidro de lâmpadas OLED por meio das respostas ópticas das lâmpadas.

¹ A eficiência quântica externa diz respeito à relação entre a quantidade de fótons emitidos no interior da lâmpada e a quantidade destes fótons que atinge o lado externo do dispositivo.

2 PRINCÍPIO ÓPTICO DE EXTRAÇÃO DA LUZ

O princípio para a geração da luz na lâmpada OLED é o decaimento radioativo de estados moleculares excitados, conhecidos também como éxcitons [10-15]. A estrutura de uma lâmpada OLED² convencional consiste de um substrato de vidro coberto com um óxido condutor transparente (ITO), uma camada orgânica emissora de luz entre uma camada transportadora de buracos (CTB) e uma camada transportadora de elétrons (CTE). No topo do dispositivo é depositado um catodo metálico e por último o OLED é encapsulado para evitar o contato com ar, evitando a degradação da camada orgânica.

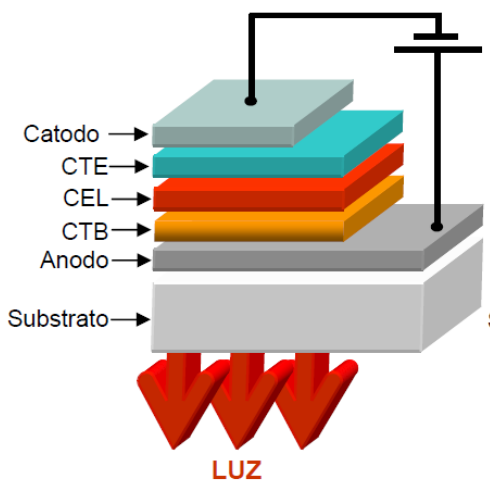


Figura 2 – Estrutura de um OLED, extraída da fonte [4].

Na Figura 2 é possível identificar a presença de novas camadas quando comparada com a Figura 1, tendo em vista que o OLED representado possui um semicondutor orgânico responsável pelo transporte de elétrons (CTE) e um semicondutor orgânico responsável pelo transporte de buracos (CTB). A arquitetura de um OLED poderá variar em função do acréscimo de camadas orgânicas (podendo ter mais de 10 camadas) que terão um objetivo principal: direcionar os elétrons e buracos para que se recombinem numa região específica dentro da camada eletroluminescente e assim formarem os éxcitons, que decairão gerando luz.

² A partir desta seção o termo OLED referir-se-á à lâmpada OLED.

2.1 O PROBLEMA DA BAIXA EFICÁCIA LUMINOSA

Atualmente já é possível obter uma eficiência quântica interna (η_{int}) de aproximadamente 100% em OLEDs utilizando-se materiais orgânicos emissores eletrofluorescentes [16]. A eficiência quântica interna pode ser descrita como sendo a razão entre a quantidade de fótons gerados internamente na camada orgânica emissora e a quantidade de elétrons injetados. A eficiência quântica externa (η_{ext}) pode ser descrita como sendo a relação entre a quantidade de elétrons injetados na camada orgânica emissora e a quantidade de fótons emitidos na direção de visualização [7], que será uma variável que influenciará diretamente na determinação da eficácia luminosa do OLED. A eficiência quântica externa será tratada nesta pesquisa como uma taxa percentual relacionada à quantidade de fótons emitidos que foram emitidos para o lado externo do OLED enquanto a eficácia luminosa estará relacionada à capacidade do OLED de emitir luz por unidade de potência elétrica. Cerca de 80% dos fótons emitidos internamente são desviados pelas bordas do dispositivo ou ficam presos nas camadas internas do material orgânico e do vidro devido à diferença dos índices de refração entre as diversas camadas e por isto não conseguem atingir a face externa do vidro [7]. A Figura 3 ilustra o processo de extração da luz em um OLED, no qual aproximadamente 50% dos fótons gerados permanecem presos nas camadas internas do dispositivo devido aos diferentes índices de refração e cerca de 30% fica presa no substrato do vidro ou é emitida eventualmente pelas bordas.

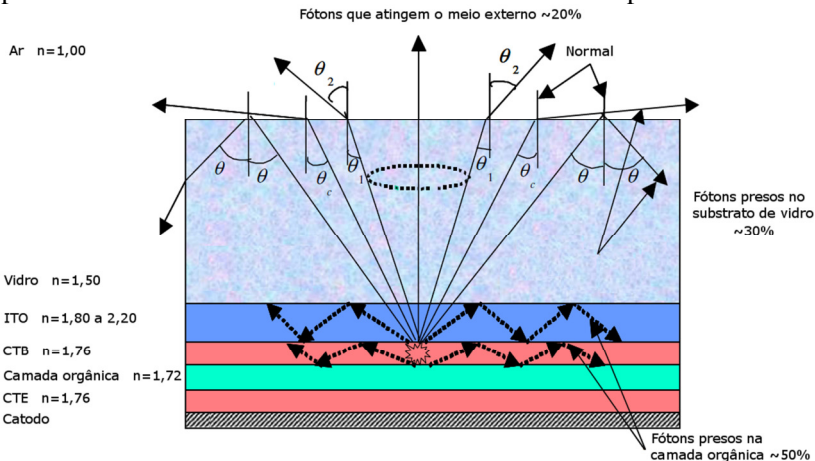


Figura 3 – Ilustração do processo de extração da luz, adaptada da fonte [7].

A razão pela qual os fótons permanecem aprisionados no interior do dispositivo é que as camadas internas e os materiais empregados no dispositivo possuem diferentes índices de refração, sendo o comportamento dos fótons em meios com índices de refração diferentes regido pela lei da refração de Snell-Descartes [17]. Conforme tal lei, quando um feixe de luz atinge a interface entre dois meios com índices de refração diferentes, o ângulo de refração (θ_2) do feixe dependerá dos índices de refração dos dois materiais e do ângulo de incidência (θ_1), de acordo com a seguinte fórmula:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \text{ (Equação 1)}$$

onde n_1 é o índice de refração do meio no qual o feixe está incidindo e n_2 o índice de refração do meio no qual ele refrata.

Na ilustração da Figura 3 é possível identificar a reflexão de fótons na interface entre a camada transportadora de buracos e o ITO que não é prevista pela lei de Snell-Descartes, uma vez que o índice de refração do ITO é maior do que o índice de refração da CTB. No entanto, a proposta desta imagem é de enfatizar que há perdas no interior das camadas orgânicas inerentes à simples variação dos índices de refração, conforme previsto por Forrest *et al* [18].

2.1.1 Reflexão Interna Total

A reflexão interna para um dado ângulo de incidência ocorre quando o índice de refração do meio no qual o feixe incide é maior do que o índice de refração no qual o feixe refrata ($n_1 > n_2$). Nestes casos haverá um ângulo limite de incidência, denominado de ângulo crítico para o qual o feixe, ao incidir na interface, refratará deslocando-se paralelamente à interface ao invés de refletir, permanecendo preso na camada onde foi gerado. A Figura 4 ilustra o processo de incidência de um feixe de luz para 3 ângulos de incidência diferentes.

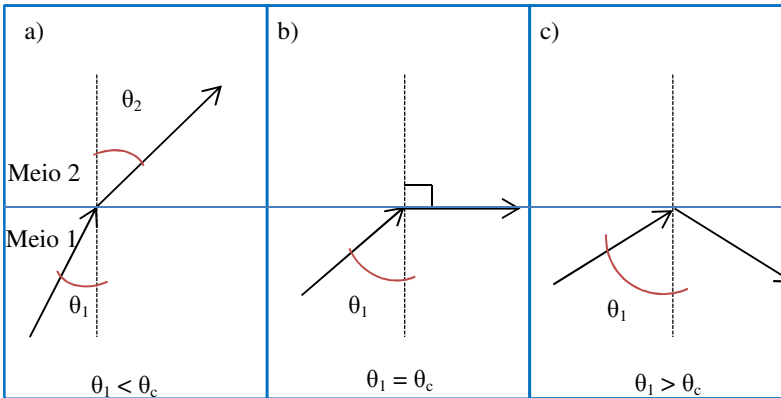


Figura 4 – Ilustração do processo reflexão interna total. Em a), o feixe incide na interface dos dois meios em um ângulo θ_1 menor do que o ângulo crítico e consegue atingir o meio 2. Em b) o ângulo de incidência θ_1 é igual ao ângulo crítico e é refratado paralelamente à interface. Em c), o ângulo de incidência θ_1 do feixe é maior do que o ângulo crítico e ele é refratado de volta para o meio 1.

O problema da baixa eficácia luminosa pode ser melhor analisado se os efeitos de microcavidades e de espalhamento difuso nas interfaces entre as diversas camadas puderem ser ignorados. Considerando-se que as superfícies de todas as camadas sejam suficientemente planas, a única parcela de feixes de luz que efetivamente atinge o lado externo do substrato de vidro contribuindo para a eficácia luminosa é aquela que for emitida a partir da camada eletroluminescente a ângulos menores do que o ângulo crítico $\theta_{\text{CEL}/\text{Ar}}$ para a interface CEL/Ar, dado por $\text{arc sen}(n_{\text{ar}}/n_{\text{CEL}})$ e está representado pelo raio 1 na Figura 5. Se o ângulo de incidência do raio for maior do que $\theta_{\text{CEL}/\text{Ar}}$ mas menor do que o ângulo crítico $\theta_{\text{CEL}/\text{Vidro}}$ para a interface CEL/Vidro representado pelo raio 3 ele será refletido e permanecerá preso no substrato de vidro. Se o ângulo de incidência do raio $\theta_{\text{CEL}/\text{ITO}}$ referente à interface CEL/ITO for seja maior do que o ângulo $\theta_{\text{CEL}/\text{Vidro}}$ mas menor do que o ângulo crítico, representado pelo raio 4, ele será refletido e permanecerá preso ou será absorvido pelo ITO [19].

Um feixe de luz que venha a incidir sobre a superfície de vidro com ângulo de incidência igual ao ângulo crítico refletirá paralelamente à superfície conforme o feixe de número 2 indicado na Figura 5. Sob esta condição o ângulo θ_2 será 90° e a fórmula da lei de Snell poderá ser reescrita para determinarmos o ângulo crítico.

$$\theta_1 = \arcsen \frac{n_2}{n_1} \text{ (Equação 2)}$$

Neste contexto, considerando-se valores típicos aproximados dos índices de refração do ar como sendo 1,00 e da camada orgânica como 1,72, o ângulo crítico seria $35^\circ 30'$. Esta Figura 5 ilustra o processo de incidência de um feixe de luz a cinco ângulos distintos, exemplificando o processo de reflexão interna total.

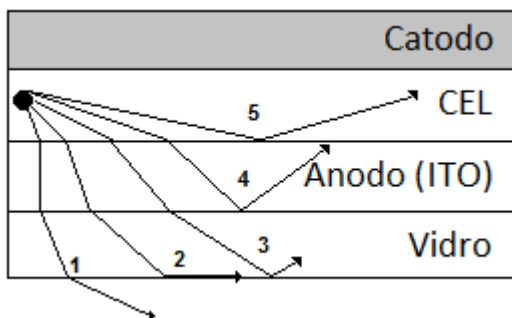


Figura 5 – Ilustração do processo de reflexão interna total em um OLED.

Desta forma, considerando-se a parcela de fótons emitidos na camada eletroluminescente que não conseguem atingir o lado externo do substrato de vidro, a eficiência quântica externa (η_{ext}) será descrita como:

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \eta_{inj} \text{ (Equação 3)}$$

O termo η_{int} é a eficiência quântica interna e o termo η_{inj} é a razão entre o número de fótons que saem do dispositivo pelo número de elétrons injetados.

2.1.2 Soluções para aumento da eficácia luminosa

Diversas pesquisas [20-29] têm sido realizadas com o propósito de extrair parte dos 50% da luz que permanece presa na camada orgânica e na interface desta com o ITO e também dos 30% da luz que permanece presa no vidro e, conseqüentemente, aumentar a eficácia luminosa de OLEDs. A seguir são apresentadas algumas destas pesquisas bem como os resultados encontrados.

2.1.2.1 Técnicas para modificação da estrutura interna das lâmpadas OLED

Para que seja possível extrair parte da luz que permanece presa na camada orgânica, é necessário implementar técnicas que modifiquem a arquitetura (interna) de um OLED, introduzindo camadas adicionais que auxiliem na captura da luz. Em algumas pesquisas [14, 20, 30] tem sido proposta a utilização de plasmons de superfície, que permitiram um aumento na eficiência quântica externa de 20% para até 47%.

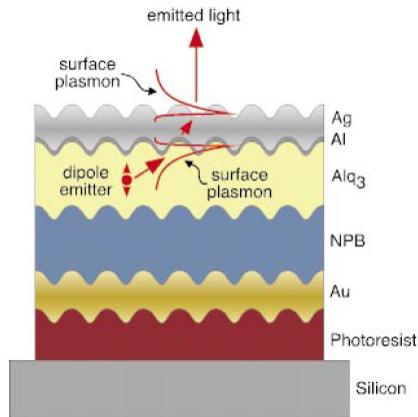


Figura 6 – Exemplo da aplicação dos plasmons de superfície, extraída da fonte [30].

A Figura 6 é uma ilustração da aplicação dos plasmons de superfície, que são ondas que se propagam ao longo da superfície de um condutor. A utilização dos plasmons de superfície demanda uma etapa adicional de recobrimento do substrato de vidro com uma camada de fotorresiste, expondo tal material a um feixe de laser de argônio para o desenvolvimento da superfície ondulada.

Já Y. Sun e S. R. Forrest sugerem [16] a adição de uma camada de grades de baixo índice de refração entre o ITO e a camada orgânica. A construção de tais grades, chamadas de LIG (abreviação para *Low Index Grids*), envolve a deposição de SiO₂ sobre o ITO utilizando-se deposição de vapor químico por plasma para que depois, depositando-se uma camada de fotorresiste, as grades de baixo índice possam crescer definidas pelo processo de fotolitografia. A figura 7 ilustra a proposta de introdução das grades de baixo índice de refração que possuem um período da ordem de 80 a 300 μm e um índice de refração em torno de

1,45 que é similar ao índice de refração do ITO. Estas características permitem que a introdução deste dispositivo não bloqueie os raios que já tenderiam a atingir o lado externo do substrato de vidro, mas auxiliam na captura daqueles que ficariam presos caso o LIG não estivesse presente na arquitetura do OLED, provocando um aumento na eficácia luminosa de aproximadamente 34%.

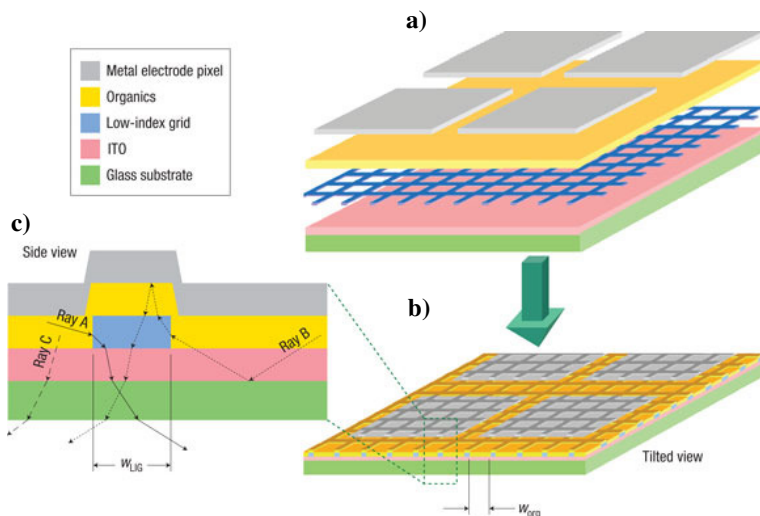


Figura 7 – Exemplo da aplicação das grades de baixo índice de refração, extraída da fonte [16]. Em a) as camadas estão separadas para mostrar o formato das grades de baixo índice. Em b) a estrutura montada com a deposição da camada orgânica e do eletrodo metálico sobre as grades, formando estruturas com alturas irregulares. Em c) uma ilustração do funcionamento do OLED com os LIGs que permitem extrair inclusive os fótons que tenderiam a ficar presos na camada orgânica.

Os mecanismos apresentados permitem a extração de luz que ficaria presa pela reflexão interna total (ITR) na interface ITO/vidro, fazendo com que os fótons que venham entrar na região de baixo índice possam ser refratados na direção do ITO/vidro. Os LIGs normalmente possuem uma forma quadrada, embora outros leiautes como hexagonal ou triangular permita obter resultados similares. A espessura da região do LIG coincide com a das camadas orgânicas ativas (100 nm) e o índice de refração de 1,03.

H. J. Peng *et al.* propõem [25] a introdução de um filme de alumina porosa produzida por processo de anodização, que é aderida ao substrato de vidro utilizando-se cola epóxi com secagem por incidência de luz ultravioleta. Após o processo de cura, as camadas orgânicas são depositadas sobre a alumina, conforme é possível ver na Figura 8. Apesar desta técnica proporcionar um aumento de aproximadamente 50% na eficácia luminosa, a manipulação de alumina porosa é extremamente crítica devido à sua fragilidade, o que acaba sendo um fator desestimulante para a adoção da mesma.

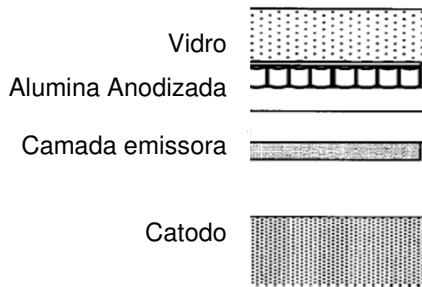


Figura 8 – Exemplo da aplicação de filme de AAO, extraída da fonte [25].

As técnicas de LIG e plasmons de superfície possuem algumas limitações que dificultam a aplicação, pois demandam modificações severas na estrutura interna dos OLEDs. Além disso, o custo elevado para aplicação das técnicas de introdução de camadas adicionais também é um fator que dificultará sua implementação, uma vez que requer processos de litografia, ou possuem limitações quanto ao aumento da eficácia luminosa quando comparadas com as soluções externas que não requerem modificação da arquitetura dos OLEDs.

Por último, uma técnica proposta por K. Hong *et al.* [31] sugere a modificação da arquitetura interna do OLED por meio da adição de camadas de MgO e de ZrO₂. Tal técnica permite que sejam desenvolvidas estruturas nanofacetadas (pirâmides) espontaneamente que auxiliarão na captação da luz que ficaria presa na camada orgânica. A Figura 9 apresenta a estrutura proposta utilizando-se uma combinação de MgO e ZrO₂, na qual os raios com ângulos grandes que seriam refletidos na interface entre o vidro e o ITO são refratados na região da estrutura nanofacetada, conforme ilustrado pelo raio 3. Além do mais, estas pirâmides não afetam os raios emitidos para a frente do cone de visualização, como ilustrado pelo raio 1.

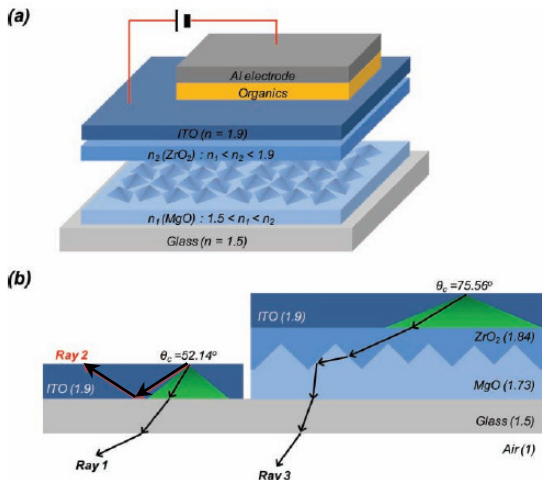


Figura 9 – Exemplo da aplicação da estrutura nanofacetada de MgO, extraída da fonte [31].

Um dos objetivos iniciais da presente pesquisa de mestrado envolvia uma combinação da técnica citada acima para a criação de estruturas nanofacetadas utilizando-se Azul da Prússia eletrodepositado ao invés de MgO. O processo de eletrodeposição já é conhecido no Laboratório de Filmes Finos e Superfície [32], inclusive com resultados positivos para a obtenção da estrutura nanofacetada de Azul da Prússia [33], porém os resultados haviam sido obtidos utilizando-se um substrato de Si tipo n recoberto com Au. A Figura 10 é uma imagem de AFM obtida de uma amostra contendo Azul da Prússia eletrodepositado sobre um substrato de silício recoberto com ouro, em que é possível identificar as estruturas nanofacetadas de Azul da Prússia.

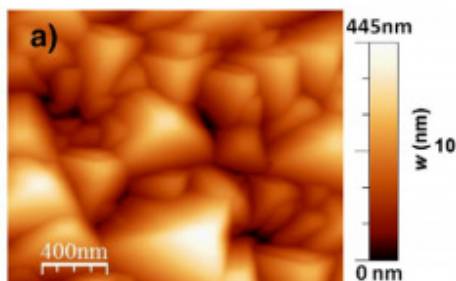


Figura 10 – Imagem de Microscópio de Força Atômica (AFM) da estrutura nanofacetada de Azul da Prússia, com espessura de aproximadamente 600 nm, extraída da fonte [33].

No entanto, neste trabalho, ao ser executada a eletrodeposição sobre o vidro recoberto com ITO, o azul da prússia demonstrou-se pouco aderente, sendo facilmente removido durante o processo de lavagem da amostra. Em apenas uma amostra a adesão do azul da prússia foi satisfatória e devido a esta falta de repetibilidade do processo de eletrodeposição optou-se por concentrar os esforços desta pesquisa na obtenção de um filme externo para aplicação nos OLEDs sem qualquer intervenção na arquitetura interna do dispositivo. A Figura 11 apresenta uma imagem obtida por AFM de uma única amostra de ITO sobre a qual o processo de eletrodeposição do azul da prússia foi eficaz, sendo possível visualizar na mesma a estrutura nanofacetada.

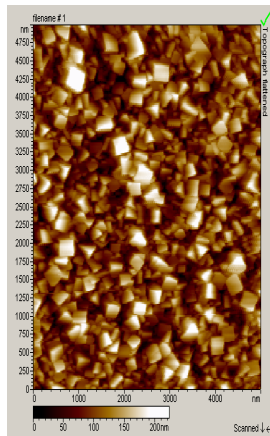


Figura 11 – Imagem de AFM da estrutura nanofacetada de Azul da Prússia depositada sobre ITO.

2.1.2.2 Técnicas para aumento da eficácia luminosa sem alteração na arquitetura dos OLEDs

As soluções externas para o aumento da eficácia luminosa envolvem a texturização da superfície do OLED para reduzir a reflexão interna total e facilitar a saída de luz. A Figura 12 ilustra a aplicação da texturização do vidro do OLED, que tem o objetivo de mudar o ângulo de incidência do fóton para um ângulo abaixo do ângulo crítico. Na configuração apresentada, os raios que inicialmente ficariam presos por incidir a um ângulo superior ao do ângulo crítico (2 raios mais à esquerda da figura) passarão a ser emitidos para fora do OLED após a aplicação da texturização (2 raios mais à direita da figura).

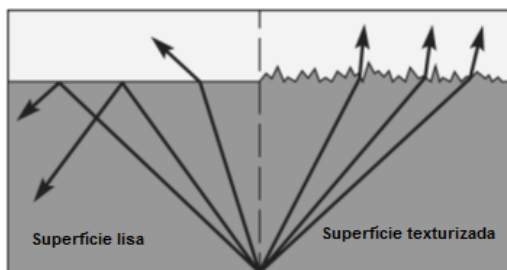


Figura 12 – Ilustração da aplicação de texturização na superfície externa do OLED.

A adoção de lentes hemisféricas transparentes acopladas ao lado externo do vidro [34] com raios de 2,5 mm até 5 mm e altura de 3 mm até 8 mm, todas com índices de refração da ordem de 1,56, similares ao do substrato de vidro também foram temas de pesquisa. As lentes foram acopladas aos OLEDs utilizando líquidos adesivos, permitindo um aumento da eficiência quântica externa de aproximadamente 8%. Todavia, são soluções de alto custo de fabricação e que demandariam a utilização de dispositivos que poderiam apresentar difícil fixação a longo prazo, além de prejudicar a estética da lâmpada devido ao tamanho destas lentes. A Figura 13 ilustra a aplicação da macrolentes para o aumento da eficácia luminosa.

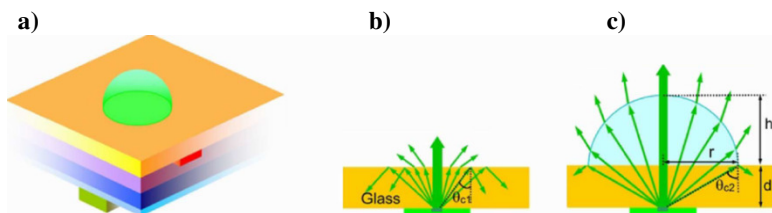


Figura 13 – Ilustração da aplicação de macrolentes com raios médios de 5 mm, extraída da fonte [34]. Em a) vê-se uma ilustração da aplicação das macrolentes. Em b) há uma ilustração de como os fótons se comportam em um OLED sem macrolente e c) ilustra o funcionamento de um OLED com a macrolente.

Outra técnica propõe um processo de jateamento da superfície externa do substrato de vidro, permitindo que uma quantidade maior de fótons consiga atingir o lado externo (superior ou bordas), conforme é

possível visualizar na Figura 14 [29, 35]. Neste experimento, o substrato de vidro foi jateado utilizando-se parâmetros de controle (pressão de injeção da areia, frequência do jateamento, tamanho do grão da areia, ângulo de jateamento, distância do bico de injeção do substrato, etc.) obtendo-se uma rugosidade média $Ra=1,266 \mu\text{m}$, sendo possível obter aumentos na eficácia luminosa dos OLEDs de 20% a 23% [29].

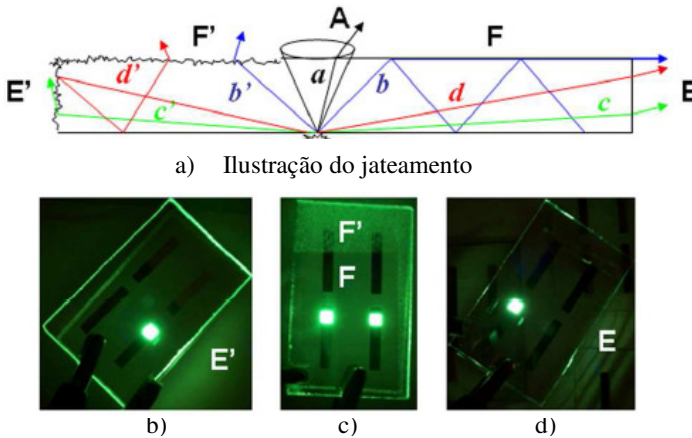


Figura 14 – Jateamento com areia da superfície do substrato de vidro, extraída da fonte [29]. a) Ilustração do processo de funcionamento do OLED com vidro jateado. b) OLED com as bordas do vidro jateadas. c) OLED com a superfície do vidro parcialmente jateada denotada pela letra F'. d) OLED sem tratamento de jateamento.

Por meio das representações da Figura 14 a), o raio com ângulo de incidência menor do que o ângulo crítico consegue atingir a face externa do vidro, como é o caso do raio a. Os raios que incidem a ângulos maiores do que o ângulo crítico permanecem presos no OLED ou atingem o lado externo pela borda do OLED, mas sem contribuir de forma significativa no resultado final do fluxo luminoso por não estarem na direção de visualização, como no caso dos raios b, c e d. O jateamento das bordas e da superfície modifica os ângulos de incidência para os raios que originalmente possuem um ângulo maior do que o ângulo crítico, orientando-os para o lado externo da face do vidro, na direção desejada de visualização, conforme os raios b', c' e d'.

Outra abordagem sugerida prevê a adoção de filmes comerciais denominados de BEF (filme para aumento de brilho) [28, 36]. Apesar de tais filmes serem voltados para o mercado de *displays* de

microcomputadores com o intuito de tornar a fonte de luz mais uniforme, foi possível obter um aumento na eficácia luminosa de aproximadamente 23%. É importante ressaltar que os autores afirmam que os filmes difusores são preferenciais para aplicações em OLEDs com *backlight*, ou seja, mais direcionados para *displays* ao invés de lâmpadas por propiciar um brilho uniforme por meio do espalhamento dos raios de luz.

Já Cheng *et al.* [8] propõem o desenvolvimento e aplicação de filmes finos texturizados de PDMS sobre o vidro do OLED que permitem capturar parte da luz que ficaria presa no vidro. A Figura 15 apresenta uma ilustração da aplicação deste filme texturizado que devido à sua superfície irregular permite capturar os feixes de luz que, sem o filme, seriam refratados e permaneceriam presos no substrato de vidro.

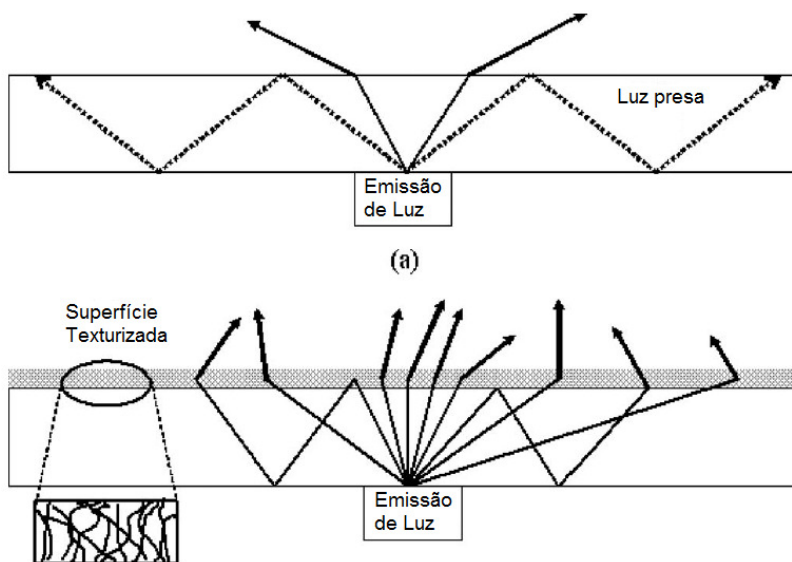


Figura 15 – Ilustração da aplicação do filme texturizado de PDMS, extraída da fonte [8]. a) Representação dos raios de luz em um OLED sem filme de PDMS, com uma parcela destes raios permanecendo presa no substrato por terem ângulo de incidência maior do que o ângulo crítico. b) Representação dos raios de luz em um OLED com o filme de PDMS, o qual modifica o ângulo de incidência dos raios, permitindo que uma quantidade maior de raios atinja a face externa do vidro.

A proposta de desenvolvimento do filme texturizado [8] foi utilizada como base para o desenvolvimento dos filmes de PDMS desta pesquisa. A escolha foi pautada pela intenção de se buscar soluções otimizadas e de baixo custo para o aumento da eficácia luminosa de OLEDs, sem que houvesse a necessidade de alteração da arquitetura já existente nos mesmos e que envolvessem técnicas simplificadas para desenvolvimento e aplicação nos dispositivos. A proposta apresentada visa atender às demandas do mercado latino-americano bem como dos países de economias emergentes integrantes do BRICS (Brasil, Rússia, China, Índia e África do Sul) para o desenvolvimento de dispositivos OLED.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Durante a pesquisa foram utilizados diferentes tipos de moldes para o desenvolvimento dos filmes texturizados. À medida que os filmes de PDMS foram desenvolvidos, os mesmos eram aplicados nos OLEDs e os resultados avaliados em função do aumento da eficácia luminosa. Desta forma, inicialmente foi elaborado o filme texturizado utilizando-se lâminas de alumina porosa como molde para o crescimento da película com a superfície texturizada e, na sequência, utilizados outros moldes como vidro litografado (com espaçamentos variados das figuras de repetição da litografia), vidro jateado com areia e lixa comercial.

3.1 CARACTERÍSTICAS E PREPARAÇÃO DO POLIDIMETILSILOXANO

O Polidimetilsiloxano, conhecido pela fórmula molecular $(C_2H_6OSi)_n$ é um tipo de composto polimérico à base de silicone que é amplamente utilizado em microeletrônica devido às desejáveis características como a transparência, índice de refração similar ao do vidro (1,44 +/- 0,01) [37], além de ser inerte, não tóxico e não inflamável. A Figura 16 representa a estrutura molecular do PDMS, em que as cadeias são constituídas por meio da ligação entre as moléculas de CH₃. É comumente aplicado no desenvolvimento de lentes de contato, de MEMS (Sistemas microeletromecânicos), encapsulamento de dispositivos, litografia ou como ISFETS (Transistor de efeito de campo sensível ao íon), etc. Como principais propriedades do PDMS pode-se citar uma ótima viscoelasticidade (módulo de cisalhamento G pode variar de 100 kPa a 3 MPa), pouca variação de suas constantes em função da variação de temperatura, alta permeabilidade, alta compressibilidade, fácil adesão a metais, utilização em uma faixa variada de temperatura (de -100°C a 100°C) e baixa reatividade química [38].

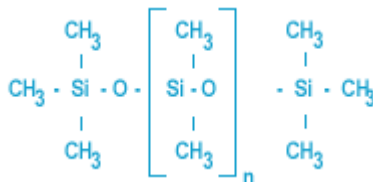


Figura 16 – Estrutura do polidimetilsiloxano.

O PDMS utilizado nesta pesquisa é um líquido bicomponente, modelo Sylgard 184 produzido pela Dow Corning, composto por um agente-base e um agente de cura. Embora o fabricante recomende a utilização dos agentes na proporção de 10:1 base/cura, outras proporções podem ser aplicadas, modificando o tempo de cura e outras propriedades como a rigidez. Neste trabalho foi adotada a proporção recomendada pelo fabricante e a mais utilizada comumente, o que significa que para uma massa específica do agente de cura, será necessário dez vezes este valor em massa do agente-base.

3.1.1 Preparação do PDMS

Um recipiente plástico devidamente limpo com água deionizada e secado com fluxo de gás nitrogênio foi colocado sobre o prato de uma balança analítica e foi adicionada uma massa (aproximadamente 1,0000 g) do agente de cura do Sylgard 184. Em seguida foi adicionado o agente-base, com massa aproximada foi de 10,0000 g. Utilizou-se uma espátula para misturar o composto vigorosamente por cerca de 10 min para garantir que o agente de cura estivesse uniformemente distribuído. Ao final deste processo a mistura adquire diversas bolhas de ar conforme apresentado na Figura 17, sendo necessário colocar o recipiente em um dessecador, vedar e aplicar vácuo (-1 bar) por 60 minutos (ou até por um período maior) até que garanta a ausência das bolhas de ar.

É importante lembrar que a partir do momento em que se utiliza a espátula para misturar os dois agentes, o processo de reticulação polimérica é iniciado, no qual cadeias poliméricas são interligadas por ligações covalentes produzindo polímeros tridimensionais. Em decorrência da reticulação, a cadeia polimérica começa a perder a sua fluidez até tornar-se um sólido à temperatura ambiente. Desta forma é importante garantir que os filmes de PDMS sejam produzidos imediatamente após o recipiente ter sido retirado do dessecador tendo em vista o avanço do processo de reticulação e consequente perda de fluidez.



Figura 17 – Imagem do PDMS em processo de reticulação com presença de bolhas de ar.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO FILME DE PDMS UTILIZANDO-SE ALUMINA POROSA COMO PADRÃO DE MOLDURA

Conforme previsto na literatura [8], foram utilizados discos de alumina porosa anodizada da linha Anodisc do fabricante Whatman/GE de diâmetros de 1,3 cm contendo poros com diâmetros de 100 nm. Após a retirada do recipiente contendo PDMS do dessecador, o mesmo foi despejado em um substrato de silício previamente limpo (água deionizada + gás nitrogênio) e a lâmina de alumina porosa foi pressionada sobre o PDMS. Por processo de capilaridade, o PDMS entrou nos poros da alumina até que o processo de reticulação fosse concluído, formando nanotubos. O substrato de silício foi levado a uma chapa quente a 80°C por 10 minutos para acelerar o processo de reticulação. Para remoção da alumina porosa, o substrato contendo PDMS foi imerso em solução de NaOH/água deionizada com concentração de 50 g/L por 2 h e então o PDMS foi lavado com água deionizada e secado.

A Figura 18 ilustra o processo de desenvolvimento do filme texturizado utilizando-se a alumina porosa como padrão. Após a formação do mesmo, o filme é removido do silício utilizando-se uma pinça e em seguida aderido ao OLED.

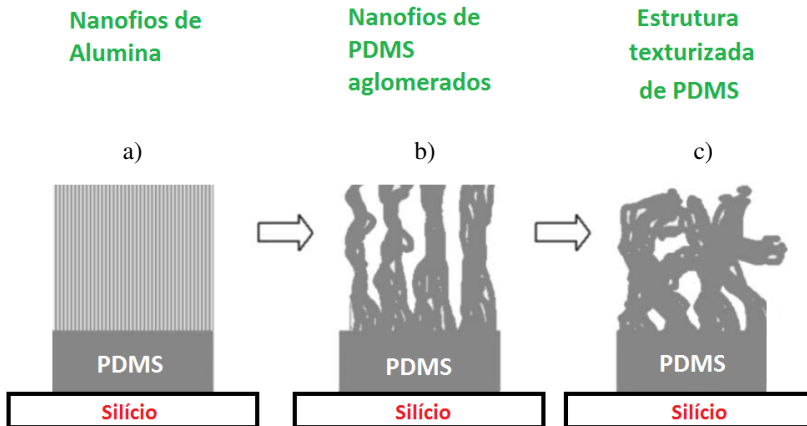


Figura 18 – Ilustração do processo de desenvolvimento do filme texturizado de PDMS. a) Estrutura de PDMS dentro dos nanofios de alumina. b) Nanofios de PDMS em água. c) Nanofios de PDMS no ar.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO-SE VIDRO COMO SUBSTRATO

3.3.1 Preparação da superfície das lâminas de vidro

Para o desenvolvimento dos filmes texturizados de PDMS foram utilizadas lâminas de vidro comerciais com dimensões de 80 mm x 80 mm x 7 mm. Para a limpeza foi adotado um processo em 3 etapas [39], conforme detalhado a seguir:

- A primeira etapa consistiu na lavagem das lâminas de vidro utilizando-se esponja embebida em sabão neutro. Em seguida as lâminas foram enxaguadas com água deionizada e secadas com fluxo de gás nitrogênio.
- Na segunda etapa foi preparada uma solução 4:3:3 (em volume) de água deionizada/acetona/etanol etílico em um recipiente plástico, os vidros foram imersos nesta solução e o recipiente colocado em um banho de ultrassom durante um intervalo de tempo de 180 s. Após este período os vidros foram novamente enxaguados com água deionizada e secados com fluxo de gás nitrogênio.
- Na última etapa, foi preparada uma solução 3:1 (em volume) de HCl-HNO₃ (conhecida como água régia) em um recipiente de polipropileno. Os vidros foram imersos na solução por um intervalo de tempo de 30 min e após foram enxaguados com água deionizada e novamente secados com fluxo de gás nitrogênio.

3.3.2 Litografia

A litografia foi desenvolvida em uma sala limpa classe 1000, que estabelece que a cada metro cúbico do volume da sala deve haver menos de 35.200 partículas $\leq 0,5 \mu\text{m}$, com uma impressora a laser modelo $\mu\text{PG 101}$ da Heidelberg. O processo de litografia consiste basicamente no revestimento de um substrato com uma camada fotossensível (fotorresiste) que é exposta à luz utilizando-se um padrão pré-definido. Após a exposição ter sido completada, esta camada fotossensível é revelada e este padrão é transferido para o substrato por meio de uma solução de ataque [40]. A Figura 19 apresenta em maiores detalhes o processo de litografia adotado nesta pesquisa.

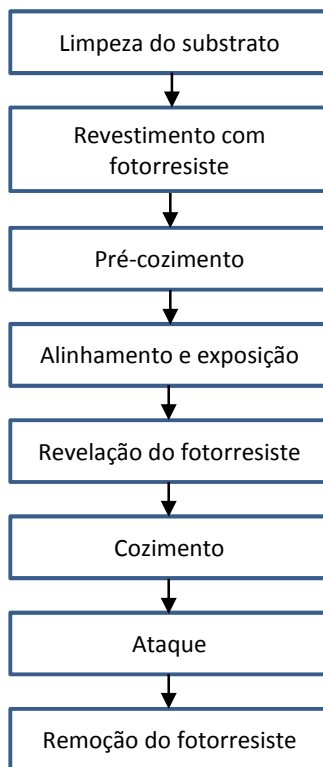


Figura 19 – Ilustração do processo de litografia.

3.3.2.1 Desenvolvimento dos padrões para litografia

Os padrões foram desenvolvidos no software L-Edit [41] utilizando-se círculos como figuras de repetição contendo diferentes diâmetros e espaçamentos diferentes entre as mesmas, conforme é possível visualizar na Figura 20. Inicialmente foram realizados testes utilizando retângulos como figuras de repetição, mas optou-se por utilizar apenas círculos para que a figura formada se aproximasse de uma semiesfera similar à da Figura 13 para que o filme pudesse extrair os raios que atingissem sua interface a diferentes ângulos.

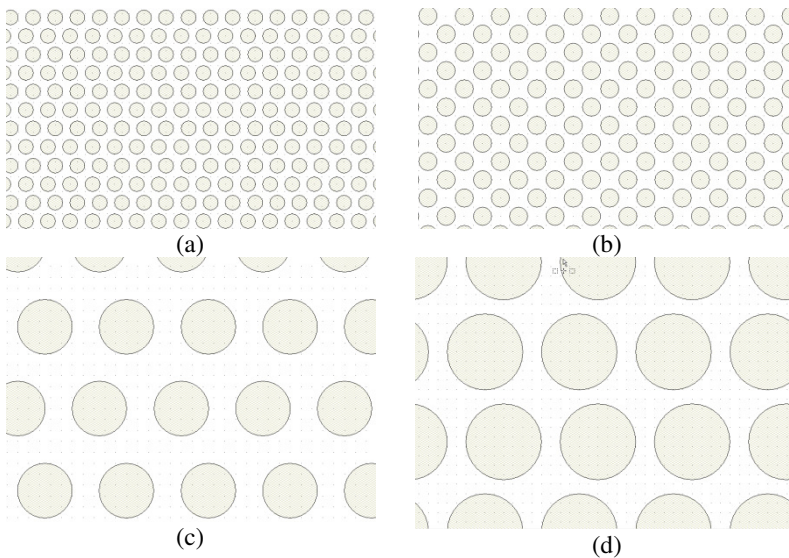


Figura 20 – Padrões elaborados para a litografia. (a) Círculos com diâmetros de 20 μm e espaçamento de 8,8 μm . (b) Círculos com diâmetros de 20 μm e espaçamento de 20 μm . (c) Círculos com diâmetros de 50 μm e espaçamento de 23 μm . (d) Círculos com diâmetros de 80 μm e espaçamento de 19 μm .

Após a limpeza do vidro, o mesmo foi coberto com fotorresiste (que é um material sensível à luz) AR-P3120 do fabricante Allresist, garantindo-se que toda a superfície do vidro fosse coberta. Em seguida o vidro foi fixado no *spin-coater* e foi aplicada rotação para garantir a uniformidade da camada de fotorresiste sobre o vidro (os parâmetros de configuração para o processo de litografia estão detalhados no APÊNDICE A – Parâmetros para desenvolvimento do padrão para litografia do vidro.)

Após o *spin-coating* foi necessário o pré-cozimento com o objetivo de melhorar a adesão do fotorresiste e também para remover o solvente presente no mesmo.

Após o pré-cozimento, o vidro foi posicionado na impressora a laser para que ocorresse o processo de sensibilização do fotorresiste com luz ultravioleta por meio do padrão pré-definido.

Para a revelação do fotorresiste foi utilizada uma solução composta de revelador AR-300-47 do fabricante Allresiste e água na proporção de 1,5:1, permitindo que as regiões do fotorresiste que foram expostas à luz ultravioleta pudessem ser removidas para posteriormente serem processadas (neste caso, corroídas).

Na etapa de cozimento (*hard-baking*) o vidro foi levado novamente à chapa quente para garantir um endurecimento do fotorresiste e consequente melhor adesão. Em seguida o vidro foi colocado em um recipiente de prolipopileno contendo solução de ataque na proporção de 6:1 de $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}$ para que esta atacasse a região do vidro não protegida pelo fotorresiste. Após o ataque, o vidro foi lavado com acetona para remover o fotorresiste, enxaguado com água deionizada e secado com fluxo de gás nitrogênio. A partir deste momento o vidro já possui os padrões/moldes pré-definidos para então receber o PDMS para o desenvolvimento do filme.

3.3.3 Preparação dos demais moldes de vidro para o desenvolvimento do filme de PDMS

Além dos filmes texturizados utilizando-se vidro litografado como moldes também foram utilizados vidro jateado comercial e superfícies de lixas 3M modelos 800, 1200, 1500 e 2000, sendo os números das lixas correspondentes às granulometria (quanto menor no número, maior a rugosidade da lixa). Tendo em vista que as lixas utilizadas não possuíam rigidez suficiente para aplicação e posterior remoção do filme de PDMS, as mesmas foram recortadas em tamanhos de 8 cm x 8 cm e coladas nas lâminas de vidro com cola adesiva instantânea.

3.3.4 Desenvolvimento do filme de PDMS

Após a preparação dos vidros como molde conforme descrito nos itens 3.3.1 a 3.3.3, os mesmos foram fixados em um *spin-coater* da sala limpa. O *spin-coater* é um equipamento que possui uma base giratória, com controle de rotação e que permite a deposição de filmes por

centrifugação. Sobre cada molde despejado um volume de 3 mL da solução de PDMS previamente preparada como descrita no item 3.1.1. O *spin-coater* foi acionado à rotação de 500 rpm por um intervalo de tempo de 8 s e então o PDMS levado a uma chapa quente à temperatura de 80 °C por 5 min para acelerar o processo de cura. Decorrido o tempo previsto para a cura o filme de PDMS pode ser removido do vidro e aplicado diretamente no OLED para avaliação da sua influência na eficácia luminosa.

3.4 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E ELÉTRICA

Para a caracterização dos filmes de PDMS produzidos foi utilizada a infraestrutura disponível no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies do Departamento de Física, do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica e do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC, além do Laboratório de Ensaio Luminotécnicos da Fundação CERTI.

3.4.1 Interferometria/Perfilometria

Com o objetivo de avaliar a superfície dos filmes e dos moldes de vidro foram utilizados um perfilômetro modelo Dektak XT do fabricante Bruker do Laboratório de Filmes Finos e Superfícies do Departamento de Física e um interferômetro a laser tridimensional da UBM Messtechnik GmbH, modelo Microfocus Expert IV do Laboratório de Materiais da UFSC. O Dektak XT permite a análise bidimensional de superfície por meio do contato físico de uma ponta de prova. O interferômetro apresentado na Figura 21 possibilita realizar a caracterização topográfica permitindo a determinação de parâmetros como rugosidade média quadrática, rugosidade média geométrica, coeficiente de achatamento (k), coeficiente de assimetria (Sk).

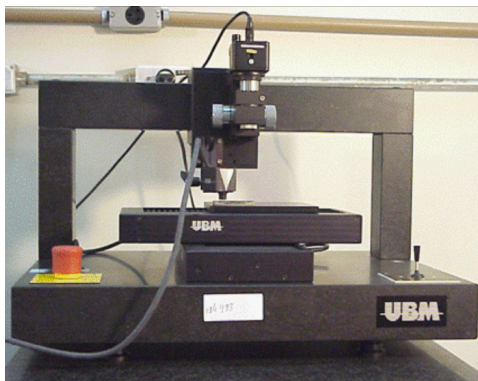


Figura 21 – Fotografia do Interferômetro a laser.

3.4.2 Microscopia de Força Atômica

Para análise da morfologia dos filmes de PDMS foi utilizado um microscópio de força atômica (AFM) modelo PicoScan da Molecular Imaging apresentado na Figura 22, existente no LFFS da UFSC. A imagem obtida pelo AFM [42] é construída a partir da varredura da superfície da amostra em estudo por uma ponta de prova. A força de interação entre os átomos da ponta de prova e os da superfície da amostra é medida e utilizando-se recursos computacionais os resultados são transformados em uma imagem representativa da superfície.



Figura 22 – Fotografia do Microscópio de força atômica.

3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Complementarmente à utilização do microscópio de força atômica também foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV ou do inglês SEM – *Scanning electron microscopy*) do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC. O princípio de funcionamento do MEV baseia-se na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio, por meio da aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV. A amostra é varrida por um feixe colimado de elétrons (elétrons primários) e com o auxílio dos sinais secundários originados a intensidade de um tubo de raios catódicos é modulada, permitindo a construção da imagem por meio do mapeamento das interações ocorridas entre os elétrons e a superfície da amostra.



Figura 23 – Fotografia do Microscópio eletrônico de varredura.

3.4.4 Medição do fluxo luminoso em Esfera Integradora

Apesar de não haver unanimidade sobre o nome da característica a ser medida [43], no contexto desta pesquisa será adotado o termo eficácia luminosa (η) como sendo a principal característica a ser medida, a qual está relacionada com a capacidade de um OLED

converter a potência elétrica (P) recebida em fluxo luminoso (Φ), sendo determinada pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \text{ (Equação 4)}$$

O fluxo luminoso pode ser considerado como sendo a radiação total emitida em todas as direções por uma fonte de luz que pode produzir estímulo visual.

Os OLEDs podem ser considerados emissores Lambertianos [44], emitindo radiação eletromagnética em todos os ângulos. Desta forma, não seria possível realizar a medição do fluxo luminoso em uma única direção perpendicular ao dispositivo e por isto faz-se necessário o uso de uma esfera integradora para obter o resultado do fluxo luminoso de forma confiável. A Figura 24 apresenta a estrutura adotada para a medição do fluxo luminoso de todos os OLEDs utilizados nesta pesquisa. A lâmpada auxiliar é necessária para a calibração/correção do resultado do fluxo luminoso em função da influência/presença do OLED na esfera integradora.

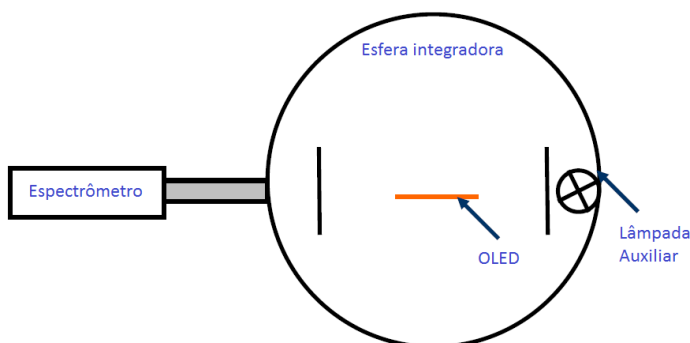


Figura 24 – Exemplo de montagem do OLED na esfera integradora

Para as medições elétricas foram utilizados como base os procedimentos já existentes para a medição da eficácia luminosa de OLEDs propostos por [43, 45-47]. A esfera integradora utilizada é o modelo LMS-400 do fabricante Labsphere, que possui diâmetro de 40 cm, com suporte projetado para acomodar uma ampla variedade de lâmpadas de até 1500 watts de potência. Como lâmpada padrão para comparar com os resultados obtidos dos OLEDs foi utilizada uma lâmpada modelo SCL-400 do fabricante Labsphere, a qual foi calibrada na faixa de 350 a 1050 nm e que possui fluxo luminoso de 1400 lumens, tensão de 28 volts e corrente de 2,68 amperes. Como fonte de

tensão e corrente foi utilizada uma fonte modelo E3634A da Agilent. O OLED foi colocado num suporte, posicionado no centro da esfera integradora e durante os testes foram realizadas em média três repetições do fluxo luminoso na posição horizontal, além da medição dos valores de tensão e corrente fornecidos ao OLED. Anteriormente a esfera foi calibrada com uma lâmpada padrão e ajustada na sua autoabsorção utilizando uma lâmpada auxiliar para cada posição. Para cada repetição o OLED foi desligado, e aguardado cinco minutos para sua estabilização. A Figura 25 apresenta um dispositivo OLED instalado e em funcionamento na esfera integradora mencionada.

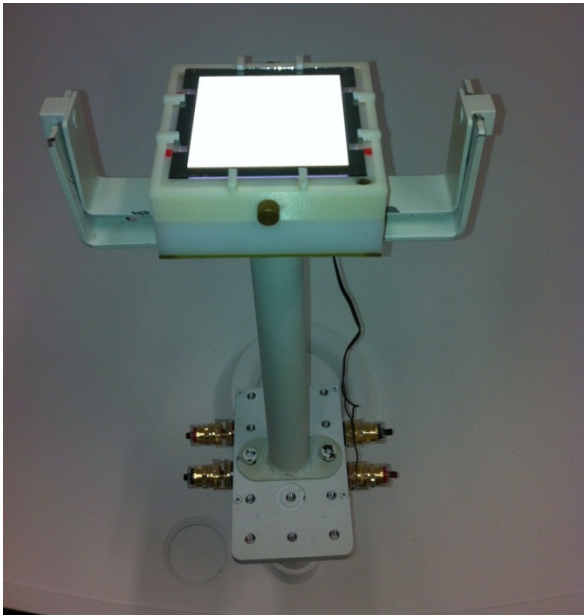


Figura 25 – Montagem do OLED na esfera integradora.

Todos os OLEDs utilizados nesta pesquisa possuíam as mesmas características: dimensões de 65 mm X 65 mm, tensão de alimentação de 7,2 VDC, corrente nominal de 270 mA e potência nominal de 1,94 W.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados a seguir em função de cada um dos filmes desenvolvidos, sendo a análise composta por medição das características elétricas em esfera integradora bem como da análise da superfície do filme utilizando-se microscopia eletrônica, interferometria e/ou perfilometria. A aplicação dos filmes na superfície dos OLEDs (laminação) foi realizada em sala limpa classe 1000 para minimizar contaminação da superfície do OLED com eventuais partículas suspensas de pó. A laminação é o processo de aplicação de filmes na indústria de displays que consiste em aderir os filmes aos substratos utilizando rolos ou lâminas. O processo de aplicação é desenvolvido de acordo com as características dos filmes a serem aplicados. Assim, são definidas a velocidade, a pressão e a tensão de laminação e o controle destas variáveis deve ser garantido para evitar a formação de bolhas.

As películas comerciais já dispõem de um adesivo óptico para facilitar a adesão ao OLED, enquanto que a laminação dos filmes produzidos de PDMS ocorreu sem a utilização de um adesivo óptico. Os adesivos ópticos não foram utilizados para aderir os demais filmes porque testes com estes adesivos revelaram um comprometimento do desempenho da lâmpada conforme será discutido a seguir e também pelo fato de a película de PDMS já ter uma aderência espontânea sem a necessidade de acrescentar adesivos.

4.1 FILMES COMERCIAIS ADESIVOS 3M 8141 E 3M 8171

Os filmes comerciais 3M modelos 8141 e 8171 são filmes chamados de adesivos opticamente transparentes (*optically clear adhesives*) com transmitância superior a 99,5% e índice de refração de 1,47 que é similar ao do vidro. São amplamente utilizados na indústria de *displays* de LCD para maximizar o brilho da imagem gerada sempre que é necessária a adesão entre duas superfícies internas do display em que a transparência (transmitância) deve ser preservada. As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados da eficácia luminosa obtida neste trabalho para os filmes 8141 e 8171, respectivamente. Em ambos os casos é possível perceber que os filmes reduzem a eficácia luminosa em cerca de 40%. Nestas tabelas são apresentados os dados de medida do fluxo luminoso com e sem a presença do filme comercial na superfície da lâmpada OLED. Os valores de eficácia luminosa foram obtidos pela razão entre o fluxo luminoso medido e a potência elétrica fornecida ao OLED (A potência nominal informada pelo fabricante era de 1,94 W).

Tabela 1 – Resultados obtidos com filme comercial 3M 8141

Eficácia luminosa com filme comercial adesivo 3M 8141					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,26	14,77	17,26	8,72	-41%
2	29,29	14,80	17,26	8,73	-41%
3	29,21	14,77	17,20	8,69	-41%
Média	29,25	14,78	17,24	8,71	-41%

Tabela 2 – Resultados obtidos com filme comercial 3M 8171

Eficácia luminosa com filme comercial adesivo 3M 8171					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	28,84	14,51	17,28	8,68	-40%
2	28,79	14,50	17,30	8,70	-40%
3	28,80	14,51	17,31	8,71	-40%
Média	28,81	14,51	17,30	8,70	-40%

A Figura 26 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme adesivo comercial 3M 8141/8171, evidenciando a redução brusca na emissão no intervalo do espectro compreendido entre 440 nm e 700 nm comprovada pela redução de aproximadamente 40% no valor da eficácia luminosa.

O intuito de realização das medidas de fluxo luminoso na presença destes filmes era de avaliar a influência destes sobre o dispositivo OLED para então utilizá-los posteriormente para aderir os filmes de PDMS ao vidro do OLED. Isto era necessário porque o filme desenvolvido de PDMS não possui um adesivo óptico. Com os resultados que demonstraram esta abrupta redução na eficácia luminosa optou-se por não utilizar os adesivos ópticos comerciais para aderir os filmes de PDMS aos OLEDs. Ao invés disso, optou-se por laminar os filmes prontos de PDMS diretamente sobre o vidro dos OLEDs, tornando-se desnecessária a caracterização estrutural destes filmes comerciais.

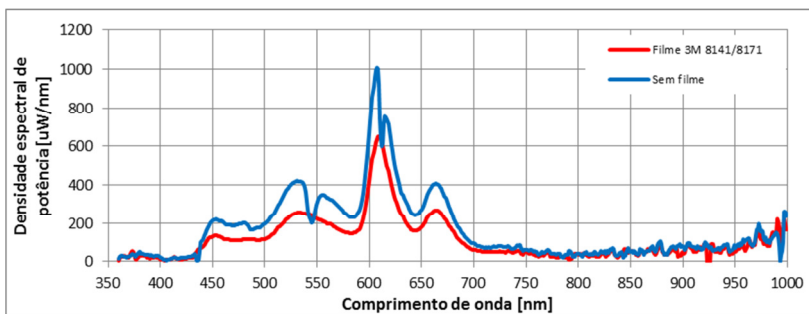


Figura 26 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme adesivo 3M 8141/8171.

4.2 FILME ÓPTICO COMERCIAL OPTMATE 09N1-D

O filme óptico comercial 09N1-D é desenvolvido especialmente para OLEDs e permite, segundo o fabricante, atingir uma eficácia luminosa de até 39 ± 3 lm/W apesar de fabricante não informar qual o percentual de aumento que este número representa nem a potência aplicada à lâmpada. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para a eficácia luminosa utilizando este filme, obtidos de maneira semelhante aos dados das tabelas 2 e 3, e aponta um aumento substancial de 36%.

Tabela 3 – Resultados obtidos com filme comercial Optmate 09N1-D

Eficácia luminosa utilizando filme óptico comercial Optmate 09N1-D					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,47	14,74	40,42	20,00	36%
2	29,46	14,76	40,47	20,09	36%
3	29,49	14,79	40,51	20,17	36%
Média	29,47	14,76	40,47	20,09	36%

Tendo em vista os bons resultados obtidos com este filme comercial, optou-se por avaliar também o diagrama de cromaticidade e as curvas de espectro do OLED. No estudo da percepção da cor, a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) criou em 1931 um diagrama de cromaticidade para indicar uma cor por meio de coordenadas de cromaticidade, e que é conhecido como CIE 1931. O diagrama de

cromaticidade derivado do sistema CIE de 1931 [48] permite caracterizar a luminância por um meio das coordenadas de cor x e y , as quais especificam o ponto no diagrama de cromaticidade.

Partindo do pressuposto que o olho humano possui três diferentes tipos de cones sensíveis à cor, a resposta do olho seria descrita adequadamente em termos de "três valores de triestímulo". Uma vez formada a cor, ela pode ser representada em termos das duas coordenadas x e y . As cores que podem ser combinadas por meio da combinação de um determinado conjunto de três cores primárias (como o vermelho, azul e verde) são representadas no diagrama de cromaticidade por um triângulo que une as coordenadas para as três cores, que está representado na Figura 27 e que é utilizado como referência para avaliar principalmente a cor emitida pelos OLEDs testados neste trabalho.

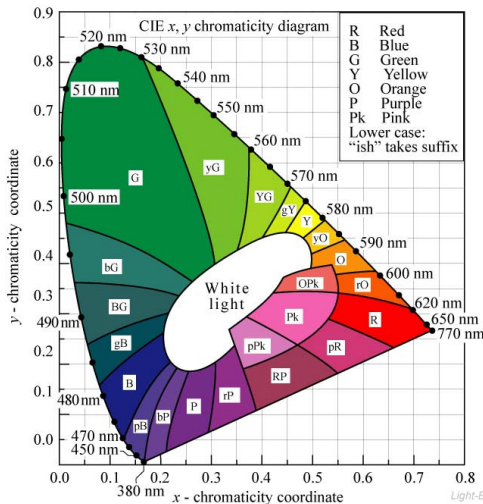


Figura 27 – Diagrama de cromaticidade de 1931, extraída da fonte [48].

Analisando a Figura 28 vemos que o OLED preserva, após a aplicação do filme óptico comercial, a mesma emissão de luz branca, apesar de as coordenadas de cor serem ligeiramente diferentes (0,432; 0,403) para o OLED sem filme e (0,408; 0,420) para o OLED com o filme óptico comercial.

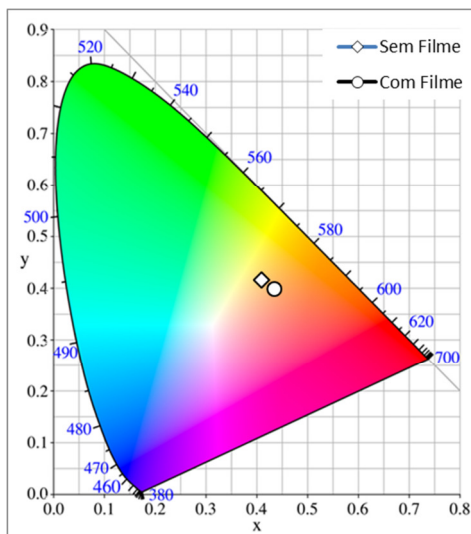


Figura 28 – Diagrama de cromaticidade de um dispositivo OLED sem filme e com filme comercial 09N1-D.

A Figura 29 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme óptico comercial, demonstrando uma similaridade entre os comprimentos de onda emitidos dentro do espectro visível pelo olho nu que é de 400 nm a 700 nm, tendo uma emissão maior em comprimentos de onda visíveis pelo olho humano, em torno de 610 nm. É possível observar no gráfico que o filme óptico comercial proporcionou uma emissão maior na região de 450 nm a 580 nm.

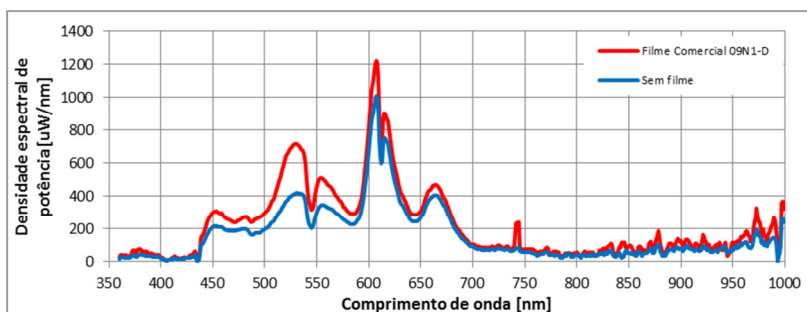


Figura 29 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme comercial 09N1-D.

Na análise interferométrica neste filme de PDMS apresentada na Figura 30, encontrou-se uma camada irregular sugerindo uma superfície aleatória que seria a responsável pelo excelente aumento da eficácia luminosa do OLED em questão, tendo tal superfície uma rugosidade média quadrática (R_q) de $9,74 \mu\text{m}$ e altura máxima de pico de $16,6 \mu\text{m}$.

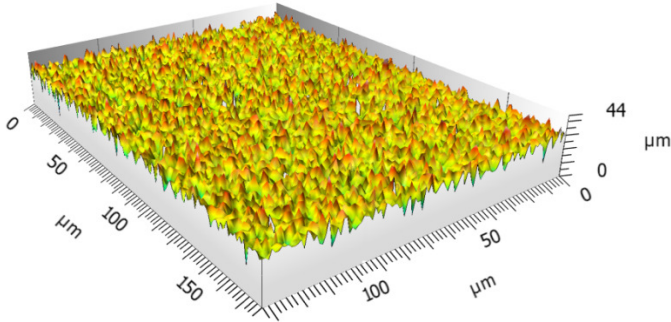


Figura 30 – Imagem de interferometria óptica do filme comercial Optmate 09N1-D.

Na caracterização utilizando-se microscopia eletrônica de varredura apresentada na Figura 31 é possível identificar a estrutura desenvolvida neste filme comercial, que apresenta semidiscos abaulados com diâmetro médio de $5 \mu\text{m}$ dispostos aleatoriamente sobre a camada do filme. Esta disposição aleatória permite que os raios que ficariam presos no substrato do vidro atinjam a interface abaulada dos discos com o vidro e consigam ser projetados para fora, similar ao proposto na Figura 13.

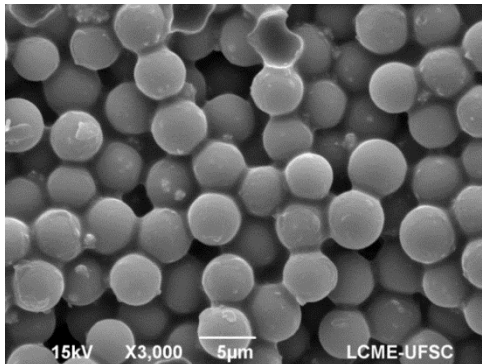


Figura 31 – Imagem de microscopia eletrônica do filme comercial Optmate 09N1-D.

4.3 FILME DE PDMS SEM TEXTURA

Inicialmente foi necessário avaliar se o filme de PDMS traria benefícios aos OLEDs e julgou-se necessário desenvolver um filme sem texturização para avaliar se a adesão do mesmo ao vidro do OLED provocaria alguma redução na eficácia luminosa. Os resultados apresentados na Tabela 5 evidenciam que o filme liso de PDMS aplicado sobre o vidro não provocou redução da eficácia luminosa, comprovando a similaridade dos índices de refração do vidro e do PDMS e sugerindo que um filme texturizado poderia aumentar a eficácia luminosa do OLED. As pequenas variações positivas na eficácia luminosa podem ser justificadas pela pequena diferença entre os índices de refração do vidro e do filme, associada à incerteza de medição do processo que foi de $\pm 1,5$ lm/W. A Figura 32 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme de PDMS sem textura, demonstrando que não houve variação significativa na emissão dentro do espectro visível.

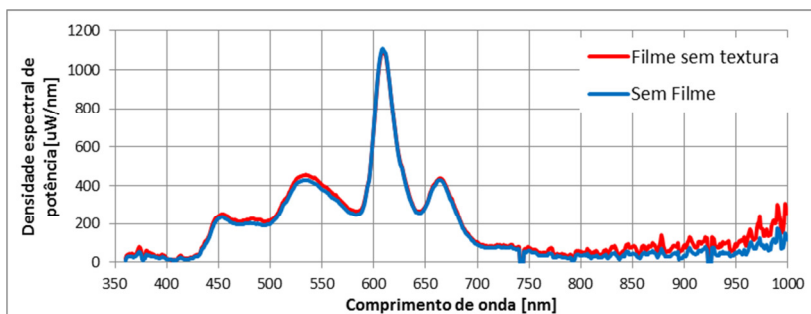


Figura 32 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme de PDMS sem texturização.

Tabela 4 – Resultados obtidos com filme de PDMS sem textura

Eficácia luminosa utilizando FILME de PDMS sem textura					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,64	14,86	30,43	15,29	3%
2	29,68	14,91	30,41	15,30	3%
3	29,73	14,95	30,40	15,30	2%
Média	29,68	14,91	30,41	15,30	3%

Uma análise de perfilometria apresentada na Figura 33 demonstrou que o filme possui uma leve rugosidade que possivelmente pode ser atribuída à própria superfície do vidro utilizado para o desenvolvimento do filme ou uma decorrência do processo de preparação por centrifugação (*spin-coating*).

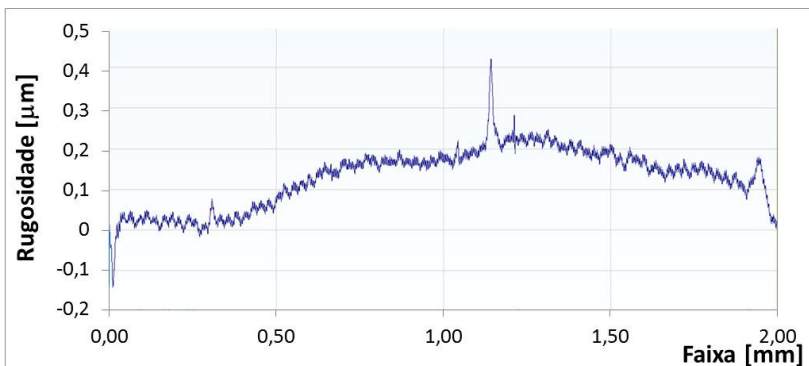


Figura 33 – Gráfico de perfilometria da superfície do filme de PDMS sem textura.

Tendo sido demonstrado que o filme liso de PDMS não provocava uma redução na eficácia luminosa, iniciou-se o desenvolvimento dos filmes texturizados na tentativa de aumentar tal característica.

4.4 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO ALUMINA POROSA COMO MOLDE

O filme de PDMS produzido a partir da alumina porosa possui uma limitação em suas dimensões em decorrência do molde de alumina, cujo diâmetro é de 1,3 cm enquanto o OLED possui dimensões de 6,5

cm x 6,5 cm. Desta forma, como o filme não cobriria toda a área, foi necessário aplicar uma máscara de papel branco fosco para bloquear os feixes de luz emitidos por toda a região do OLED já que não havia OLEDs disponíveis de tamanhos menores para esta pesquisa. A Figura 34 é uma fotografia do OLED com a máscara aplicada deixando à mostra apenas a região de atuação do filme.



Figura 34 – Fotografia de um OLED com aplicação do filme produzido com alumina porosa.

O leiaute descrito acima demonstrou ser inapropriado tendo em vista que a área de 1,33 cm² do filme representava apenas 3,14% da área do OLED (42,25 cm²) e os resultados da Tabela 5 demonstram que não houve variação significativa na eficácia luminosa.

Tabela 5 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS utilizando-se alumina porosa como molde

Eficácia luminosa utilizando FILME de PDMS texturizado (utilizando alumina)					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	1,05	0,53	1,07	0,54	2%
2	1,05	0,53	1,03	0,52	-1%
Média	1,05	0,53	1,05	0,53	0%

A Figura 35 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme de PDMS utilizando alumina porosa como molde, demonstrando que na região do espectro visível não houve variação significativa na emissão de fótons.

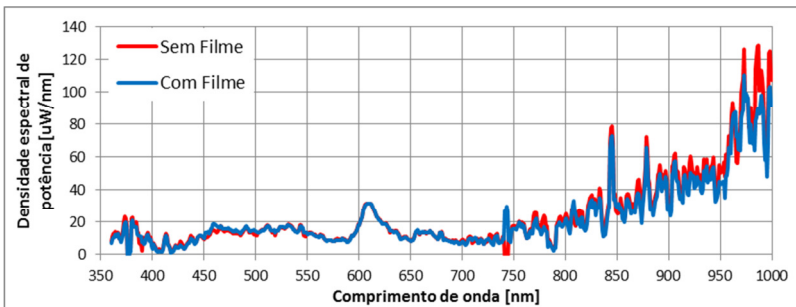


Figura 35 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando alumina porosa como molde.

Na Figura 36 é possível observar que o filme possui uma superfície irregular desejável, mas diferente daquela prevista na literatura [8] que seria uma espécie de rede texturizada, apesar de os passos para obtenção do filme terem sido seguidos conforme previsto.

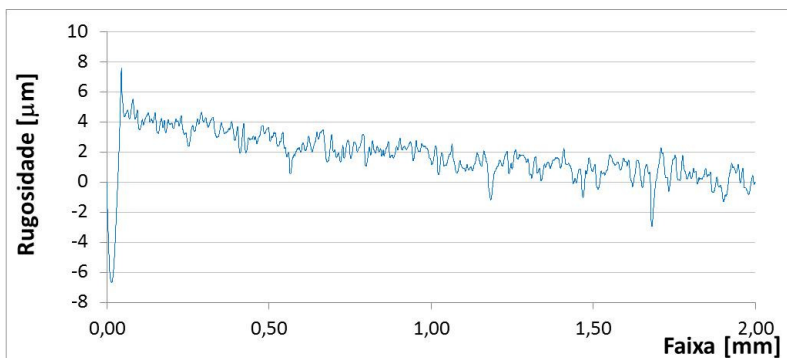


Figura 36 – Gráfico de perfilometria da superfície do filme de PDMS texturizado utilizando-se alumina porosa como molde.

A análise por microscopia eletrônica por varredura apresentada na Figura 37 comprova que a superfície obtida possui uma leve texturização que difere da superfície prevista na literatura [8], tendo um aspecto mais plano. Esta planicidade do filme pode não ter causado modificações no ângulo crítico de incidência dos fótons originados no interior do OLED e assim não provocou o aumento da eficácia luminosa previsto que era de $(46 \pm 8)\%$.

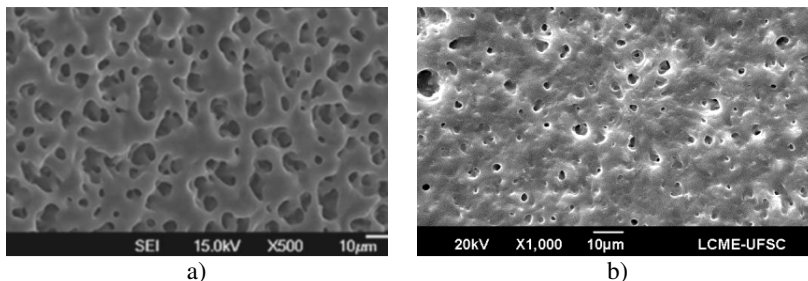


Figura 37 – Imagem de microscopia eletrônica do filme obtido utilizando-se alumina porosa como molde. a) Imagem do filme de PDMS, extraída da referência [8]. b) Imagem do filme de PDMS, desenvolvido neste trabalho.

Em decorrência da não observância do aumento da eficácia luminosa utilizando a alumina porosa como molde para o filme de PDMS, buscou-se alternativas para a texturização do filme como a utilização do vidro litografado, lixa industrial e o vidro jateado como moldes, cujos resultados são apresentados a seguir.

4.5 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 20 μm , ESPAÇAMENTO DE 8,8 μm)

A ideia de utilizar a técnica de litografia em vidro seria para definir um molde negativo na superfície de uma lâmina de vidro com discos regularmente distribuídos a exemplo do que é apresentado na Figura 13, utilizando os padrões ilustrados na Figura 20 para obter discos com diâmetros de 20 μm e com espaçamento de 8,8 μm . A Figura 38 apresenta uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura em que é possível observar uma deformação na figura cilíndrica, tendo as figuras de repetição um formato quase retangular ao invés de um aspecto de disco, o que comprova que o espaçamento adotado de 8,8 μm foi excessivamente pequeno, e os discos acabaram tocando as extremidades dos discos vizinhos após a corrosão do vidro com solução de ataque.

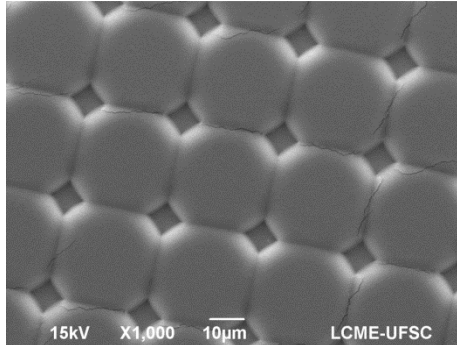


Figura 38 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura do filme obtido com molde de vidro litografado com círculos de 20 µm de diâmetro.

Na Figura 39 vê-se a análise da superfície por interferometria óptica que permitiu a determinação da rugosidade média quadrática (R_q) de 1,54 µm. As rebarbas apresentadas na figura entre os discos representam ruídos que não puderam ser eliminados com o filtro do software do interferômetro e não representam uma rebarba real do material.

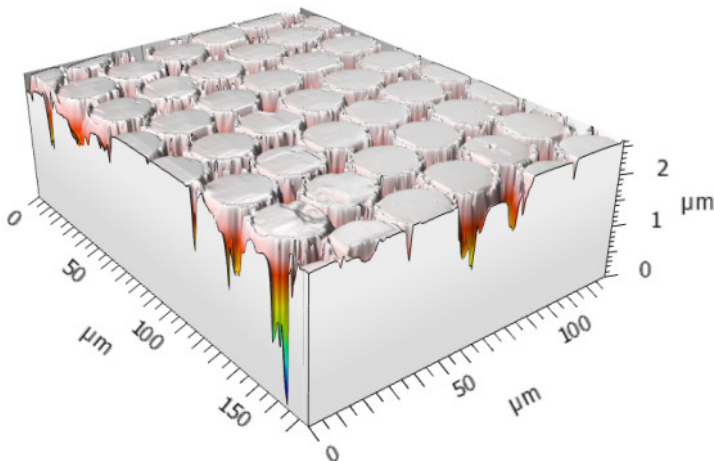


Figura 39 – Imagem de interferômetro do filme óptico do filme texturizado de PDMS com círculos de 20 µm de diâmetro e espaçamento de 8,8 µm.

As rebarbas apresentadas na figura acima representam ruídos que não puderam ser eliminados com o filtro do software do interferômetro e não representam uma rebarba real do material. Ao realizar as medições na esfera integradora que estão apresentados na Tabela 6, observou-se

que a eficácia luminosa não variou significativamente, o que determinou que mudanças precisaram ser implementadas no padrão a ser litografado, e optou-se por variar o diâmetro das figuras de repetição e o alinhamento das mesmas nos moldes seguintes.

Tabela 6 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 8,8 μm

FILME de PDMS texturizado (vidro litografado) ϕ 20 μm - espaçamento 8,8 μm					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,64	14,86	29,58	14,58	-2%
2	29,68	14,91	29,81	14,70	-1%
3	29,73	14,95	29,62	14,65	-2%
Média	29,68	14,91	29,67	14,65	-2%

A Figura 40 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme de PDMS obtido com vidro com discos de 20 μm de diâmetro e espaçamento de 8,8 μm . No gráfico é possível observar que não houve variação significativa no fluxo luminoso.

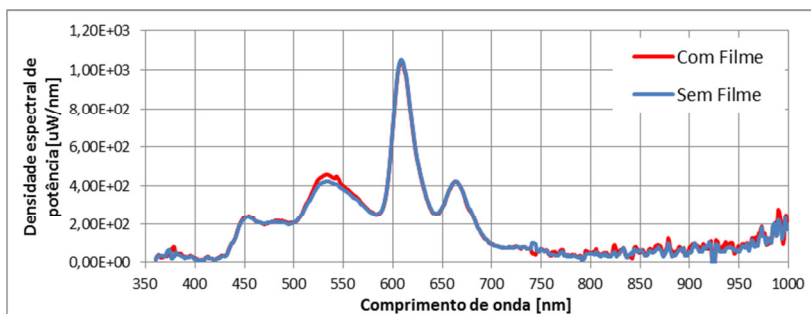


Figura 40 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando alumina vidro com discos de 20 μm de diâmetro e espaçamento de 8,8 μm como molde.

4.6 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 20 μm , ESPAÇAMENTO DE 20 μm)

Como primeira etapa optou-se por manter o diâmetro dos discos mudando-se apenas o espaçamento e o alinhamento das figuras de repetição. Apesar de o espaçamento ser diferenciado, a etapa de ataque do vidro na litografia provocou uma aproximação das figuras de repetição, sendo o desalinhamento e a rugosidade média quadrática de 476 nm as únicas diferenças visíveis deste filme com o filme anterior. Na Figura 41 temos a imagem de microscopia eletrônica de varredura por meio da qual observa-se o desalinhamento das figuras de repetição.

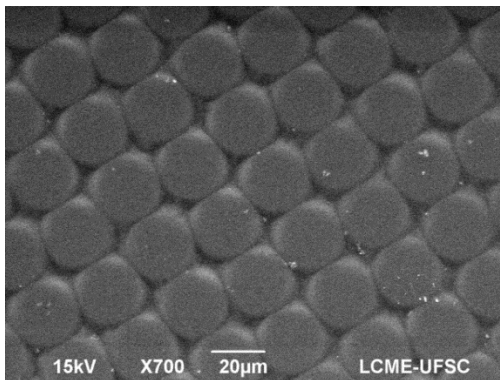


Figura 41 – Imagem de microscopia eletrônica do filme obtido utilizando-se vidro litografado – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 20 μm .

A Figura 42 apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura dos filmes obtidos com vidro litografado com discos de 20 μm . Em a) está a imagem do filme produzido com espaçamento de 8,8 μm e em b) com o espaçamento de 20 μm . Apesar de os espaçamentos iniciais serem diferentes, o processo de ataque do vidro acabou por aproximar as figuras de repetição, porém uma diferença distinta entre eles é o desalinhamento entre as figuras de repetição.

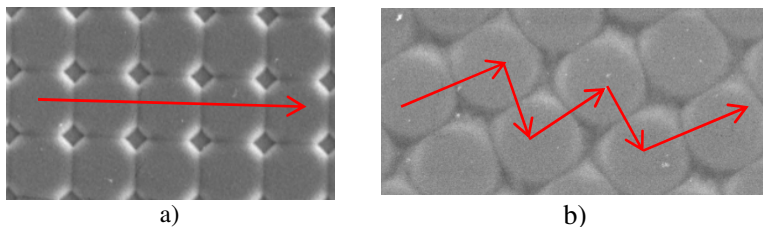


Figura 42 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura dos filmes de PDMS obtidos utilizando-se vidro litografado – diâmetro de 20 μm (As setas foram inseridas para indicar a diferença no ordenamento dos círculos entre os dois filmes.) a) Filme com espaçamento de 8,8 μm . b) Filme com espaçamento de 20 μm .

As medições na esfera integradora que estão apresentadas na Tabela 7 revelam um aumento de aproximadamente 16% na eficácia luminosa.

Tabela 7 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 20 μm

FILME de PDMS texturizado (vidro litografado) ϕ 20 μm - espaçamento 20 μm					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	28,84	14,51	34,62	16,72	15%
2	28,79	14,50	34,65	16,84	16%
3	28,80	14,51	34,58	16,76	15%
Média	28,81	14,51	34,62	16,77	16%

A análise por interferometria óptica apresentada na Figura 43 revelou a mesma estrutura prevista na microscopia eletrônica de varredura, com o desalinhamento já previsto entre as figuras de repetição.

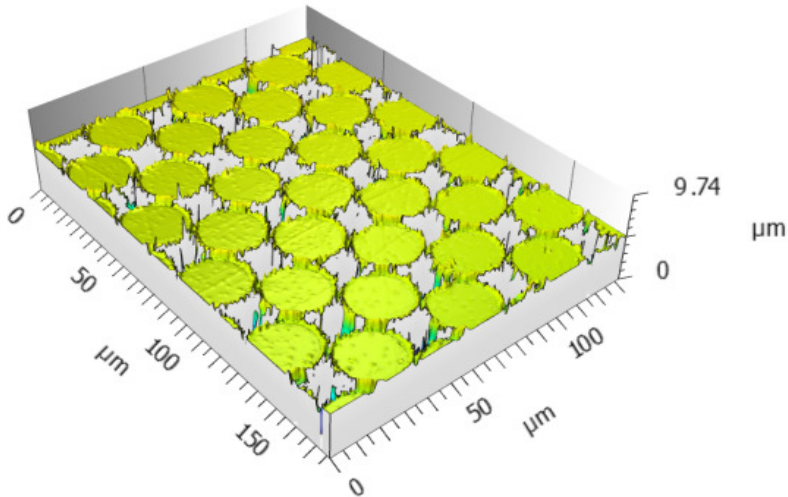


Figura 43 – Imagem de interferometria óptica do filme texturizado de PDMS – diâmetro de 20 μm e espaçamento de 20 μm.

A Figura 44 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme de PDMS utilizando vidro litografado com discos de 20 μm de diâmetro como molde, demonstrando que o aumento de 16% na eficácia luminosa ocorreu novamente na região visível do espectro.

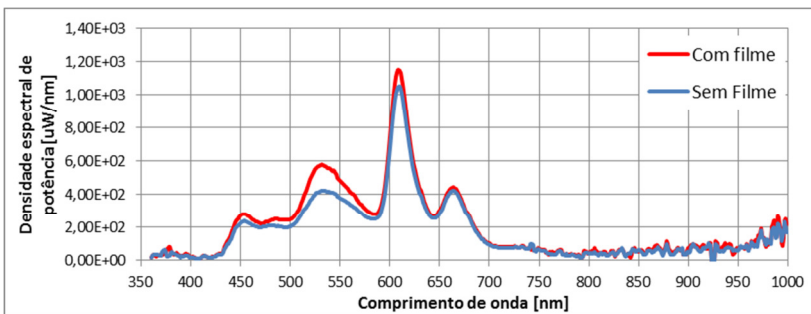


Figura 44 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 20 μm de diâmetro e espaçamento de 20 μm).

4.7 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 80 μm E ESPAÇAMENTO DE 19 μm)

Propôs-se então um aumento do diâmetro dos discos para 80 μm e mantendo-se o afastamento entre em aproximadamente 20 μm . Na Figura 45 e Figura 46 temos as imagens de microscopia eletrônica de varredura e de interferometria óptica com discos de diâmetros de cerca de 80 μm . A altura média dos discos obtida por interferometria foi de 11,4 μm .

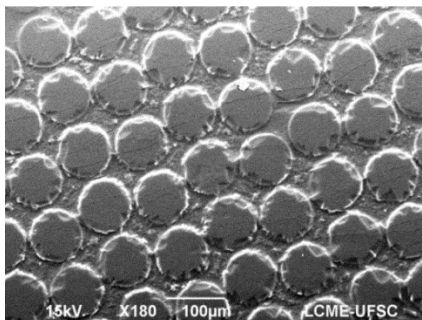


Figura 45 – Imagem de microscopia eletrônica do filme obtido utilizando-se vidro litografado – com círculos de diâmetro de 80 μm .

A imagem por interferometria óptica apresentada na Figura 46 revela a mesma estrutura obtida por microscopia eletrônica por varredura.

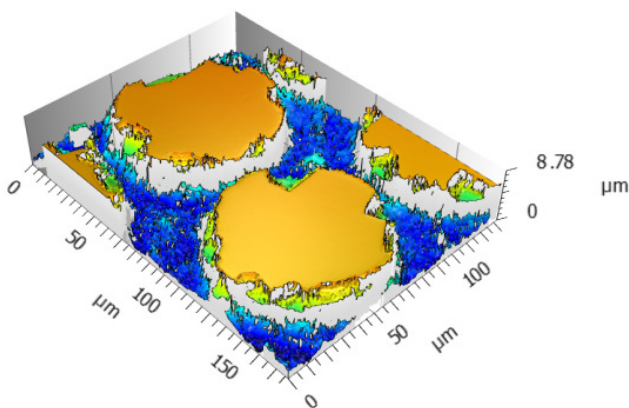


Figura 46 – Imagem de interferometria óptica do filme texturizado de PDMS – com molde com círculos de diâmetro de 80 μm e espaçamento de 19 μm .

A Figura 47 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme de PDMS utilizando vidro litografado com discos de 80 μm de diâmetro como molde, demonstrando que o aumento de 11% na eficácia luminosa ocorreu novamente na região visível do espectro.

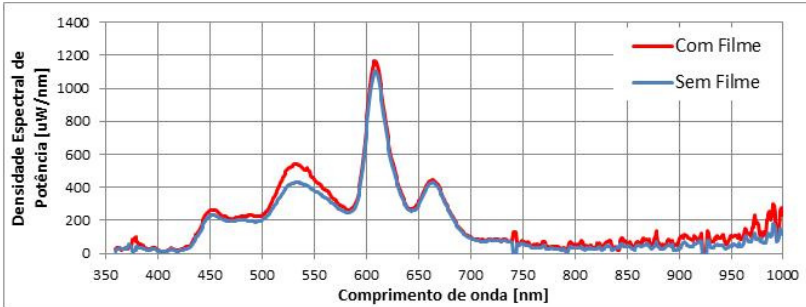


Figura 47 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 80 μm de diâmetro).

Os resultados obtidos da eficácia luminosa apresentados na Tabela 8 foram positivos, pois aumentaram a eficácia luminosa em 11% mas ficaram abaixo dos resultados obtidos com as semiesferas de 20 μm .

Tabela 8 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetro de 80 μm

FILME de PDMS texturizado (vidro litografado) ϕ 80 μm - espaçamento 19 μm					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,25	14,64	33,07	16,32	11%
2	29,26	14,69	33,06	16,36	11%
3	29,42	14,82	33,10	16,40	11%
Média	29,31	14,72	33,08	16,36	11%

Foi necessário então desenvolver um filme com diâmetro diferente para avaliar se essa característica de desalinhamento entre as figuras de repetição de fato proporcionava tal diferença na variação da eficácia luminosa, optando-se por semiesferas de 50 μm , cujos resultados são apresentados a seguir.

4.8 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO LITOGRAFADO COMO MOLDE (CÍRCULOS COM DIÂMETROS DE 50 μm E ESPAÇAMENTO DE 23 μm)

Na Figura 48 temos os resultados obtidos por interferometria óptica do molde de vidro litografado produzido com discos negativos com diâmetros de 50 μm e na Figura 49 a imagem do filme de PDMS produzido utilizando-se este vidro como molde. Os discos em ambos os casos possuem altura média de 25 μm e o espaçamento médio é de 23 μm .

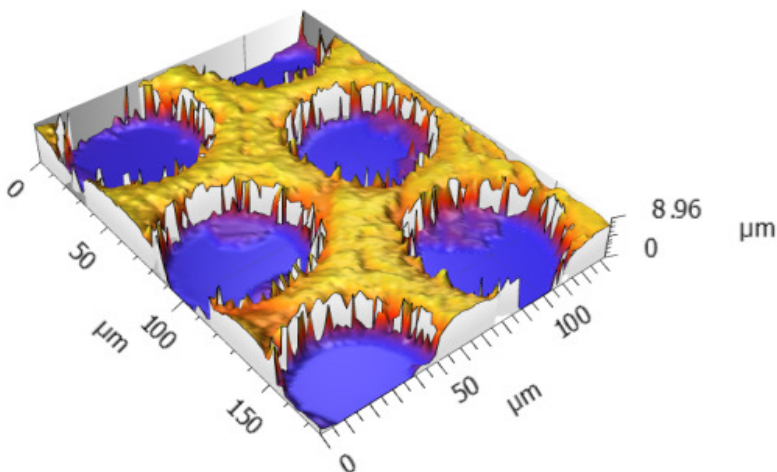


Figura 48 – Imagem de interferometria óptica do vidro litografado com discos de diâmetros de 50 μm .

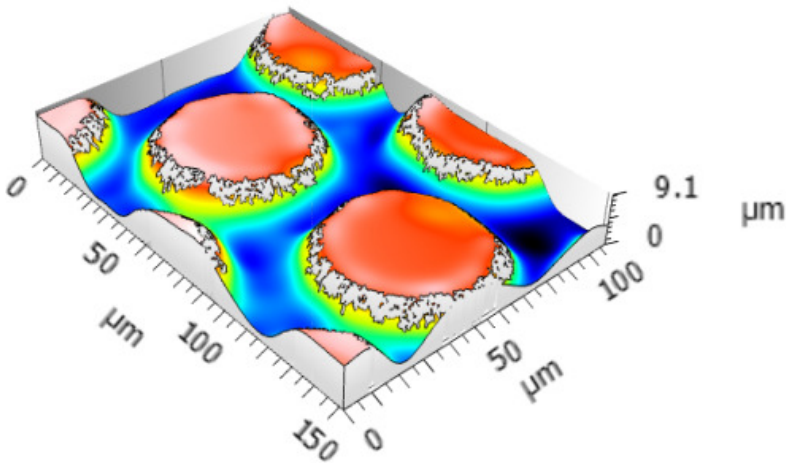


Figura 49 – Imagem de interferometria óptica do filme de PDMS obtido utilizando-se o vidro com discos de diâmetros de 50 μm como molde.

Com a estrutura apresentada acima, o filme de PDMS aumentou o fluxo luminoso do dispositivo OLED de aproximadamente 29,3 lm para quase 36 lm, o que resulta em uma variação positiva de 22% na eficácia luminosa.

Tabela 9 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS – diâmetros de 50 μm e espaçamento de 23 μm

FILME de PDMS texturizado (vidro litografado) ϕ 50 μm - espaçamento 23 μm					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,25	14,64	35,95	17,91	22%
2	29,26	14,69	35,96	17,90	22%
3	29,42	14,82	35,95	17,92	21%
Média	29,31	14,72	35,95	17,91	22%

A Figura 50 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme de PDMS utilizando vidro litografado com discos de 50 μm de diâmetro como molde, demonstrando que o aumento de 22% na eficácia luminosa ocorreu novamente na região visível do espectro.

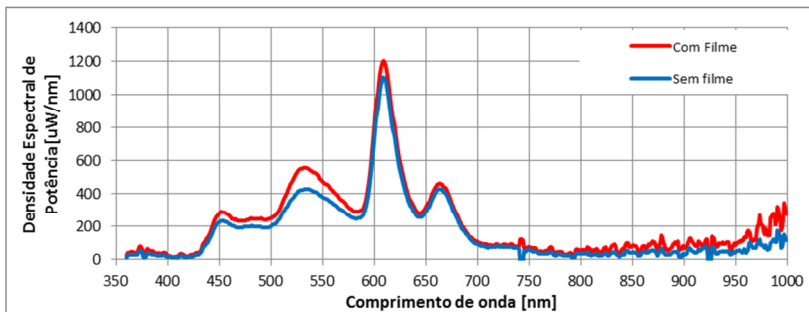


Figura 50 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 50 μm de diâmetro).

Com os resultados obtidos até então, identificou-se que o filme que proporcionou o aumento mais significativo na eficácia luminosa foi o filme litografado com semiesferas de 50 μm de diâmetro e espaçamento de 23 μm . Os resultados a seguir foram propostos para identificar se algum outro tipo de superfície poderia contribuir ainda mais além dos já estudados até então.

Além dos moldes de vidro litografado com discos de diâmetros de 20 μm , 50 μm e de 80 μm , foram realizadas tentativas de desenvolvimento de vidro litografado com discos com 5 μm e 10 μm de diâmetro porém o processo de ataque provocou uma corrosão excessiva na superfície do vidro, fazendo com que os discos se unissem em figuras maiores, inviabilizando a produção de filmes de PDMS com discos contendo estes diâmetros. A expectativa era a de que com discos com diâmetros menores seria possível produzir uma quantidade maior de discos por área e por consequência propiciar um aumento ainda maior na eficácia luminosa.

4.9 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO LIXA 1200 COMO MOLDE

Conforme descrito previamente, as lixas de especificação 800, 1200, 1500 e 2000 foram presas ao vidro para adquirir rigidez e então o filme de PDMS foi preparado sobre a superfície destas lixas. Os filmes formados sobre as lixas de 800, 1500 e 2000 romperam-se em todas as 9 amostras (3 para substrato de lixa) testadas no momento da remoção do substrato com pinças, impossibilitando a avaliação do desempenho dos mesmos. Possivelmente o rompimento está relacionado com ângulos

muito inclinados dos picos da superfície, conforme pode-se observar na Figura 51, que contém os resultados da análise por perfilometria da lixa de 1200. Verifica-se que o filme de PDMS apresentado na Figura 52 adquiriu uma superfície muito similar e com ângulos de inclinação dos picos elevados similares aos da lixa 1200.

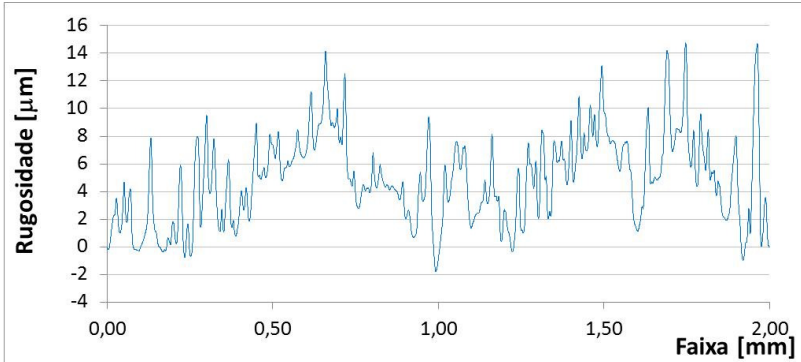


Figura 51 – Análise de perfilometria da superfície da lixa 1200 utilizando-se perfilômetro dektak.

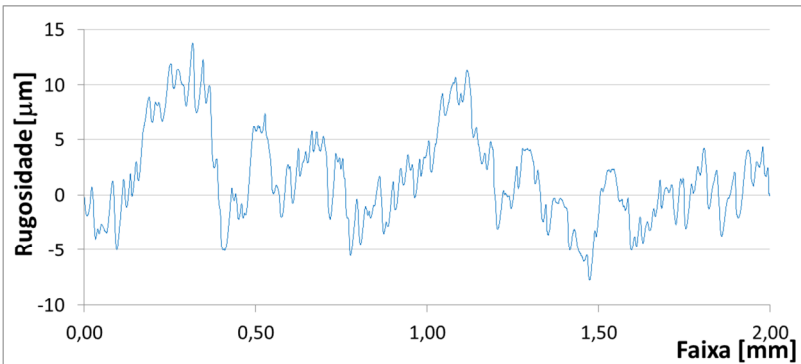


Figura 52 – Análise de perfilometria da superfície do filme de PDMS utilizando lixa 1200 como molde.

Com a imagem de interferometria da Figura 53 verifica-se que os picos da estrutura do PDMS atingem aproximadamente 20 µm, além do resultado da rugosidade média quadrática obtida que foi de 6,19 µm.

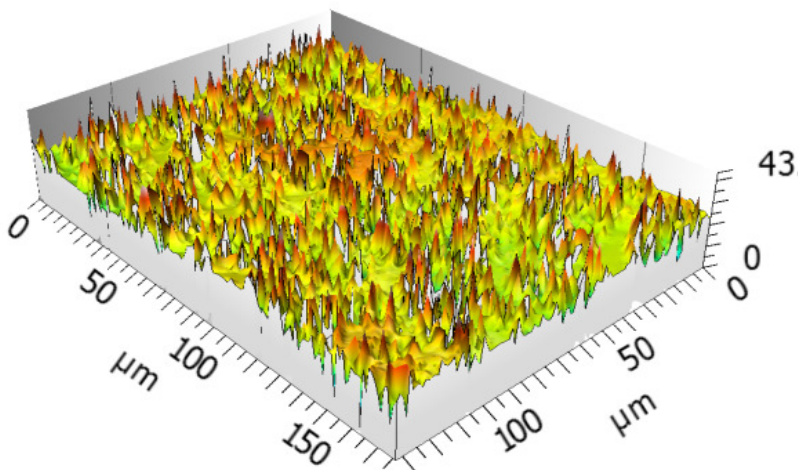


Figura 53 – Imagem de interferômetro do filme texturizado de PDMS utilizando-se lixa 1200 como molde.

Com este filme obtido a partir da lixa 1200 foi possível atingir um aumento na eficácia luminosa da ordem de 26%, sendo superior aos resultados alcançados com os filmes obtidos com o vidro litografado.

Tabela 10 – Resultados obtidos com filme texturizado de PDMS utilizando lixa 1200 como vidro.

Eficácia luminosa utilizando FILME de PDMS texturizado (com lixa 1200)					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,64	14,86	37,80	18,65	26%
2	29,68	14,91	37,94	18,79	26%
3	29,73	14,95	38,03	18,85	26%
Média	29,68	14,91	37,92	18,76	26%

A Figura 54 apresenta as curvas de espectro do OLED sem e com o filme de PDMS utilizando lixa 1200 como molde, demonstrando que o aumento de 26% na eficácia luminosa ocorreu novamente na região visível do espectro.

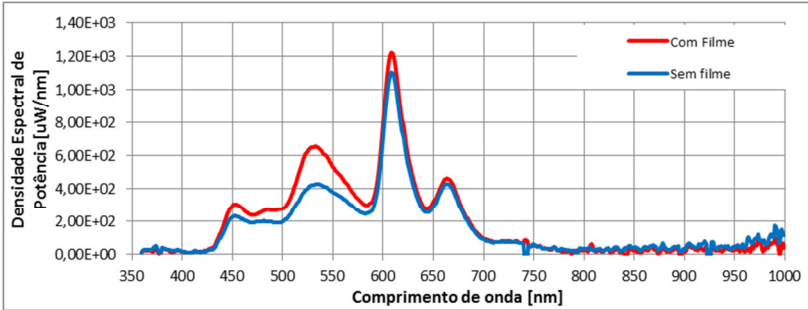


Figura 54 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme obtido utilizando vidro como molde (discos com 50 μm de diâmetro).

4.10 FILME TEXTURIZADO DE PDMS UTILIZANDO VIDRO JATEADO COMO SUBSTRATO

Na análise por perfilometria do vidro jateado apresentada na Figura 55, verifica-se uma superfície com picos de aproximadamente 20 μm e com largura dos picos maior do que aquelas encontrados na lixa 1200. O mesmo pode ser concluído quando é analisada a superfície do filme de PDMS da Figura 56, gerado a partir deste molde.

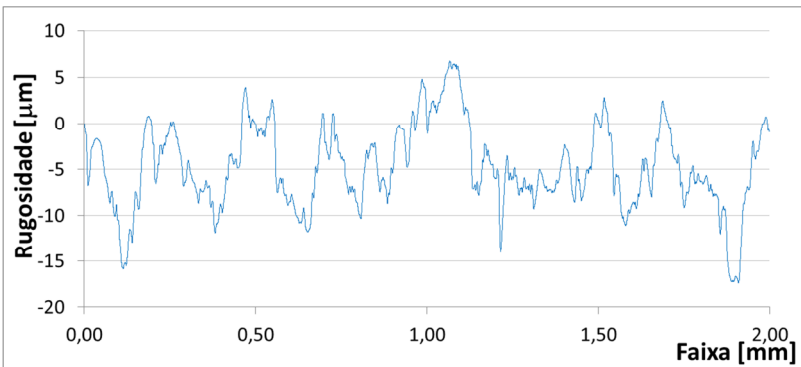


Figura 55 – Análise de perfilometria da superfície do vidro jateado.

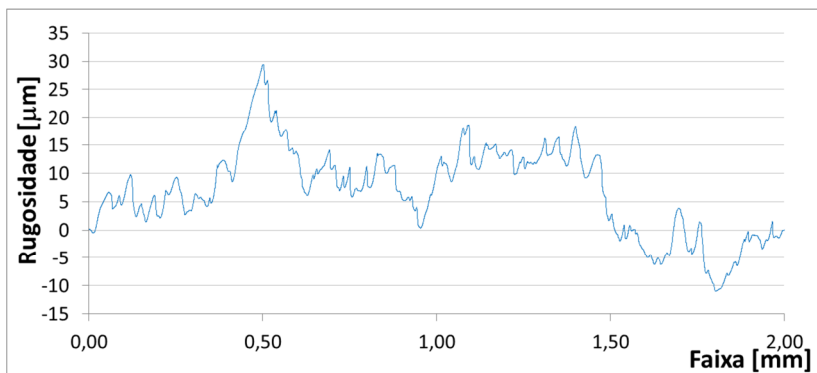


Figura 56 – Análise de perfilometria da superfície do filme de PDMS utilizando-se vidro jateado como vidro.

Na análise por microscopia eletrônica apresentada na Figura 57 observou-se uma superfície irregular que favorece a projeção dos feixes de luz que em teoria ficariam presos no substrato de vidro por atingirem tal interface com ângulo superior ao ângulo crítico, mas que ao atingir esta nova interface conseguem ser projetados para fora do OLED.

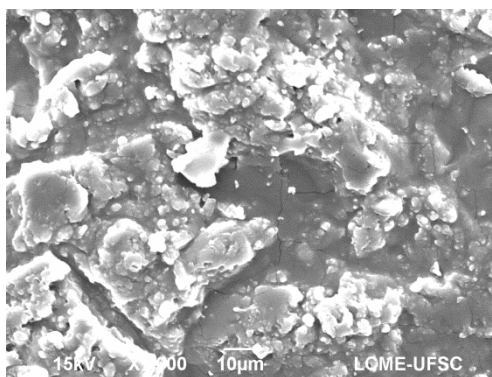


Figura 57 – Imagem de microscopia eletrônica do filme texturizado obtido com molde de vidro jateado.

Em análise tridimensional por interferometria apresentada na Figura 58 observou-se que esta característica de altura dos picos mostra-se mais evidente, cujo valor efetivamente medido foi de em torno de 21 μm , com uma rugosidade média quadrática de 5,51 μm .

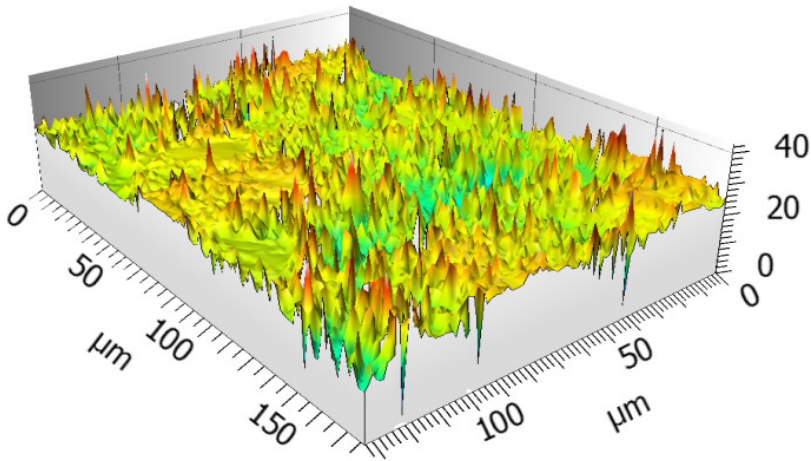


Figura 58 – Imagem de interferômetro do filme texturizado de PDMS utilizando-se vidro jateado como vidro.

Nos resultados da medição de eficácia luminosa apresentados na Tabela 11, observa-se um elevado aumento na eficácia luminosa de 14,78 lm/W para 20,14 lm/W, representando uma variação positiva da ordem de 36%, similar aos resultados obtidos com o filme comercial avaliado e que foi desenvolvido especificamente para OLEDs.

Tabela 11 – Resultados obtidos com filme texturizado utilizando-se vidro jateado como vidro

Eficácia luminosa utilizando FILME de PDMS texturizado (com vidro jateado)					
Medições	Sem filme		COM FILME		Variação da Eficácia Luminosa [%]
	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	Fluxo Luminoso [lm]	Eficácia Luminosa [lm/W]	
1	29,25	14,73	39,86	20,07	36%
2	29,26	14,75	39,98	20,15	37%
3	29,42	14,84	40,04	20,20	36%
Média	29,31	14,78	39,96	20,14	36%

Nos diagramas de cromaticidade apresentados na Figura 59 verifica-se que o OLED também preserva, a exemplo do filme comercial, a mesma característica de emissão da luz branca, apesar de as coordenadas de cor obtidas terem uma pequena variação de (0,437;

0,402) para o OLED sem filme e (0,417; 0,417) para o OLED com o filme de vidro jateado como molde.

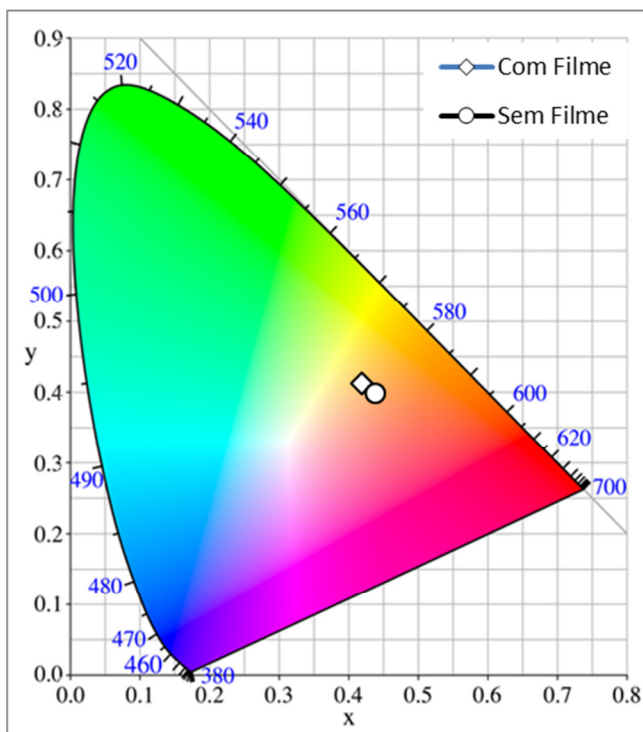


Figura 59 – Diagrama de cromaticidade de um dispositivo OLED sem filme e com filme obtido a partir do vidro jateado.

A Figura 60 apresenta as curvas de espectro do mesmo OLED para o qual as medições elétricas foram realizadas sem e com o filme de vidro jateado e que demonstra uma similaridade entre os comprimentos de onda emitidos dentro do espectro visível para olho nu, tendo picos mais elevados de emissão de comprimentos de onda na região de 450 nm a 580 nm e em torno de 610 nm.

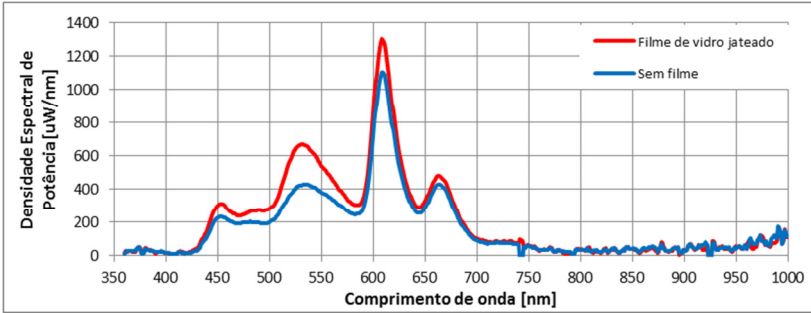


Figura 60 – Gráfico das curvas de espectro de um OLED sem filme e com filme produzido com vidro jateado como molde.

4.11 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela 12 apresenta uma compilação dos resultados obtidos com os 3 filmes comerciais obtidos e com os 8 filmes desenvolvidos nesta pesquisa. Como é possível observar, alguns dos filmes comerciais não propiciaram resultados satisfatórios, o que também foi observado com alguns dos filmes desenvolvidos nesta pesquisa. Por outro lado, o filme de PDMS desenvolvido utilizando-se vidro jateado como molde permitiu um aumento igual ao resultado obtido com um filme comercial do fabricante Optmate.

Tabela 12 – Resumo dos resultados obtidos de todos os filmes

Tabela resumo de resultados						
OLED utilizando filme	Rugos. RMS (μm)	Fluxo luminoso Φ_v [lm]		Eficácia Luminosa (lm/W)		Eficiência do filme [%]
		Sem filme	Com filme	Sem filme	Com filme	
Comercial 3M 8141	*	29,25	17,24	14,78	8,71	-41%
Comercial 3M 8171	*	28,81	17,30	14,51	8,70	-40%
Óptico comercial Optmate 09N1-D	9,74	29,47	40,47	14,76	20,09	36%
De PDMS sem textura	<0,05	29,68	30,41	14,91	15,30	3%
De PDMS utilizando alumina	*	1,05	1,05	0,53	0,53	0%
De PDMS (litograf. $\phi 20 \mu\text{m}$ - e $8,8 \mu\text{m}$)	0,48	29,68	29,67	14,91	14,65	-2%
De PDMS (litograf. $\phi 80 \mu\text{m}$ - e $19 \mu\text{m}$)	2,24	29,31	33,08	14,72	16,36	11%
De PDMS (litograf. $\phi 20 \mu\text{m}$ - e $20 \mu\text{m}$)	1,54	28,81	34,62	14,51	16,77	16%
De PDMS (litograf. $\phi 50 \mu\text{m}$ - e $23 \mu\text{m}$)	5,21	29,31	35,95	14,72	17,91	22%
De PDMS (lixa 1200)	6,19	29,68	37,92	14,91	18,76	26%
De PDMS (vidro jateado)	5,51	29,31	39,96	14,78	20,14	36%

* Não disponível

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do presente trabalho foi possível desenvolver uma variedade de filmes de PDMS com diferentes tipos de texturização que comprovaram ser eficazes para o aumento da eficácia luminosa de OLEDs sem a necessidade de modificação da estrutura interna dos mesmos, sendo soluções recomendáveis para países emergentes como aqueles integrantes do bloco chamado BRICS (Brasil, Rússia, Índia e África do Sul) e também para demais países da América Latina devido ao seu baixo custo. Em pesquisas disponíveis em literatura, já foi possível obter resultados similares, porém todos apresentaram uma desvantagem que poderia comprometer a aplicação em larga escala e a baixo custo como: a) o jateamento do vidro do OLED aumentou a eficácia luminosa de 20 a 23% (o que ainda é inferior ao obtido neste trabalho) mas implicaria em uma mudança nos processos de produção já implantados atualmente; b) Os filmes comerciais BEF também aumentaram a eficácia luminosa em apenas 23%; c) Os filmes texturizados obtidos com alumina porosa proporcionam um aumento de 46%, porém o processo não pode ser replicado e ainda há limitações quanto ao tamanho do filme a ser produzido em função do tamanho do molde de alumina; d) As macrolentes semiesféricas permitiram um aumento de cerca de 2,5 x na eficácia luminosa porém as dimensões de tais lentes com raios de até 5 mm por demandarem um alto custo para sua produção, além de desfavorecer a estética dos OLEDs.

A análise por interferometria demonstrou que os melhores resultados obtidos no aumento da eficácia luminosa foram aqueles cujo filme de PDMS apresentava rugosidade quadrática média em torno de 5 μm e picos em das texturas em torno de 20 μm (corroborados pelos resultados obtidos com os filmes de vidro litografado com semiesferas de 50 μm de diâmetro, filme de lixa 1200 e filme de vidro jateado). É importante lembrar que os filmes desenvolvidos neste trabalho aumentaram a eficácia luminosa dos OLEDs ao extrair uma parcela dos 30% de fótons que ficavam presos no substrato de vidro, fazendo com que a eficiência quântica externa passasse dos atuais 20% para 27%.

Como sugestões para trabalhos futuros para extração dos demais 23% de fótons presos no vidro pode-se explorar filmes de PDMS utilizando máquina industrial para produção do vidro jateado, por meio da qual é possível controlar parâmetros de produção do jateamento para variar a rugosidade média quadrática e/ou a altura dos picos, e avaliar se estas mudanças produzem uma melhora superior na eficácia luminosa.

Além disso, apesar do filme de PDMS desenvolvido possuir uma adesão satisfatória ao OLED, pode-se combinar a aplicação do mesmo com um adesivo óptico específico para este fim, o que possivelmente eliminará eventuais bolhas de ar na interface vidro-filme e assim provocar um novo aumento na eficácia luminosa. Esta solução não foi implementada nesta pesquisa porque os únicos adesivos ópticos obtidos junto ao fabricante 3M (modelos 8141 e 8171) provocaram uma considerável redução na eficácia luminosa, não sendo adequados para estes OLEDs analisados. Por último, podem ser realizados testes de envelhecimento acelerado para avaliar a durabilidade, aderência e eventuais problemas de amarelamento que poderiam prejudicar a eficácia luminosa da lâmpada ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- [1] C. W. Tang and S. A. VanSlike, "Organic electroluminescent diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 51, pp. 913-915, 1987.
- [2] C. EUROPEIA. (2008, 12/30/2013). Phasing out incandescent bulbs in the EU.
- [3] E. C. Hong, Louise A.; Scholand, Michael J., "U.S. Lighting Market Characterization. Vol. II: Energy Efficient Lighting Technology Options.," Navigant Consulting Inc., Washington D.C.2005 2005.
- [4] W. G. Quirino, "Produção e caracterização de dispositivos orgânicos eletroluminescentes (OLEDs) baseados em complexos β -dicetonatos de Terras-Raras," Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] A. Pereira, "Desenvolvimento de dispositivos orgânicos emissores de luz," Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [6] E. T. Polikarpov, Mark Edward. (2007, 2007) Achieving High Efficiency in Organic Light-Emitting Devices. *Material Matters*. 3.
- [7] K. Saxena, et al. (2009) A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices. *Optical Materials*. 13.
- [8] Y.-H. Cheng, J.-L. Wu, C.-H. Cheng, K.-C. Syao, and M.-C. M. Lee, "Enhanced light outcoupling in a thin film by texturing meshed surfaces," *Applied Physics Letters*, vol. 90, pp. -, 2007.
- [9] N. Wada, N. Nakamura, B. Domercq, S. Billet, N. Fukumoto, M. Tanida, Y. Aoki, and M. Ohgawara, "68.1: Novel Light-Scattering Glass Substrate for the Enhancement of OLED Lighting Out-coupling Efficiency," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 43, pp. 922-924, 2012.
- [10] S.-I. Tanaka, Y. Kawakami, and Y. Naito, "Improvement of the external extraction efficiency of OLED by using a pyramid array," 2004, pp. 184-193.
- [11] H. J. Peng, Y. L. Ho, C. F. Qiu, M. Wong, and H. S. Kwok, "11.4: Coupling Efficiency Enhancement of Organic Light Emitting Devices with Refractive Microlens Array on High Index Glass Substrate," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 35, pp. 158-161, 2004.
- [12] B. Sun, L. Zhao, T. Wei, X. Yi, Z. Liu, G. Wang, J. Li, and F. Yi, "Light extraction enhancement of bulk GaN light-emitting diode with hemisphere-cones-hybrid surface," *Optics Express*, vol. 20, pp. 18537-18544, 2012/08/13 2012.
- [13] A. I. Zhmakin, "Enhancement of light extraction from light emitting diodes," *Physics Reports*, vol. 498, pp. 189-241, 2// 2011.

- [14] B. J. Scholz, J. Frischeisen, A. Jaeger, D. S. Setz, T. C. g. Reusch, and W. Brütting, "Extraction of surface plasmons in organic light-emitting diodes via high-index coupling," *Optics Express*, vol. 20, pp. A205-A212, 2012/03/12 2012.
- [15] M. Grundman, *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics an Applications*, 2 ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [16] Y. Sun and S. R. Forrest, "Enhanced light out-coupling of organic light-emitting devices using embedded low-index grids," *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 483-487, Aug 2008.
- [17] E. Hecht, *Óptica*. Lisboa, 1991.
- [18] R. J. Holmes, S. R. Forrest, T. Sajoto, A. Tamayo, P. I. Djurovich, and M. E. Thompson, "Reduced geminate recombination in iridium-based electrophosphorescent materials," *Organic Electronics*, vol. 7, pp. 163-172, 6// 2006.
- [19] C. Madigan, M.-H. Lu, and J. Sturm, "Improvement of output coupling efficiency of organic light-emitting diodes by backside substrate modification," *Applied Physics Letters*, vol. 76, pp. 1650-1652, 2000.
- [20] P. A. Hobson, S. Wedge, J. A. E. Wasey, I. Sage, and W. L. Barnes, "Surface Plasmon Mediated Emission from Organic Light-Emitting Diodes," *Advanced Materials*, vol. 14, pp. 1393-1396, 2002.
- [21] S. Wedge, A. Giannattasio, and W. L. Barnes, "Surface plasmon-polariton mediated emission of light from top-emitting organic light-emitting diode type structures," *Organic Electronics*, vol. 8, pp. 136-147, 4// 2007.
- [22] Y. Sun and S. R. Forrest, "Enhanced light out-coupling of organic light-emitting devices using embedded low-index grids," *Nat Photon*, vol. 2, pp. 483-487, 08//print 2008.
- [23] K. Hong, H. K. Yu, I. Lee, K. Kim, S. Kim, and J.-L. Lee, "Enhanced Light Out-Coupling of Organic Light-Emitting Diodes: Spontaneously Formed Nanofacet-Structured MgO as a Refractive Index Modulation Layer," *Advanced Materials*, vol. 22, pp. 4890-4894, 2010.
- [24] Y.-J. Lee, S.-H. Kim, J. Huh, G.-H. Kim, Y.-H. Lee, S.-H. Cho, Y.-C. Kim, and Y. R. Do, "A high-extraction-efficiency nanopatterned organic light-emitting diode," *Applied Physics Letters*, vol. 82, pp. 3779-3781, 2003.
- [25] H. J. Peng, Y. L. Ho, X. J. Yu, and H. S. Kwok, "Enhanced coupling of light from organic light emitting diodes using nanoporous films," *Journal of Applied Physics*, vol. 96, pp. 1649-1654, 2004.
- [26] B. Riedel, I. Kaiser, J. Hauss, U. Lemmer, and M. Gerken, "Improving the outcoupling efficiency of indium-tin-oxide-free organic light-emitting diodes via rough internal interfaces," *Optics Express*, vol. 18, pp. A631-A639, 2010/11/08 2010.

- [27] H.-Y. Lin, Y.-H. Ho, J.-H. Lee, K.-Y. Chen, J.-H. Fang, S.-C. Hsu, M.-K. Wei, H.-Y. Lin, J.-H. Tsai, and T.-C. Wu, "Patterned microlens array for efficiency improvement of small-pixelated organic light-emitting devices," *Optics Express*, vol. 16, pp. 11044-11051, 2008/07/21 2008.
- [28] B. C. Krummacher, M. K. Mathai, V. Choong, S. A. Choulis, F. So, and A. Winnacker, "General method to evaluate substrate surface modification techniques for light extraction enhancement of organic light emitting diodes," *Journal of Applied Physics*, vol. 100, pp. -, 2006.
- [29] S. K. Chen, Hoi Sing, "Light extraction from organic light-emitting diodes for lighting applications by sand-blasting substrates," *Optics Express*, vol. 18, p. 3, 2009.
- [30] D. K. Gifford and D. G. Hall, "Emission through one of two metal electrodes of an organic light-emitting diode via surface-plasmon cross coupling," *Applied Physics Letters*, vol. 81, pp. 4315-4317, 2002.
- [31] K. Hong, H. K. Yu, I. Lee, K. Kim, S. Kim, and J. L. Lee, "Enhanced Light Out-Coupling of Organic Light-Emitting Diodes: Spontaneously Formed Nanofacet-Structured MgO as a Refractive Index Modulation Layer," *Advanced Materials*, vol. 22, pp. 4890-+, Nov 16 2010.
- [32] V. C. Zoldan, "Eletr deposição de Fe em Si monocristalino," Mestrado, Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [33] M. F. Alamini, R. C. da Silva, V. C. Zoldan, E. A. Isoppo, U. P. R. Filho, F. D. A. A. Reis, A. N. Klein, and A. A. Pasa, "Normal versus anomalous roughening in electrodeposited Prussian Blue layers," *Electrochemistry Communications*, vol. 13, pp. 1455-1458, 12// 2011.
- [34] W. Li, R. A. Jones, S. C. Allen, J. C. Heikenfeld, and A. J. Steckl, "Maximizing Alq₃ OLED Internal and External Efficiencies: Charge Balanced Device Structure and Color Conversion Outcoupling Lenses," *Journal of Display Technology*, vol. 2, pp. 143-152, 2006/06/01 2006.
- [35] J. Zhou, N. Ai, L. Wang, H. Zheng, C. Luo, Z. Jiang, S. Yu, Y. Cao, and J. Wang, "Roughening the white OLED substrate's surface through sandblasting to improve the external quantum efficiency," *Organic Electronics*, vol. 12, pp. 648-653, 4// 2011.
- [36] H.-Y. Lin, J.-H. Lee, M.-K. Wei, C.-L. Dai, C.-F. Wu, Y.-H. Ho, H.-Y. Lin, and T.-C. Wu, "Improvement of the outcoupling efficiency of an organic light-emitting device by attaching microstructured films," *Optics Communications*, vol. 275, pp. 464-469, 7/15/ 2007.
- [37] F. Schneider, J. Draheim, R. Kamberger, and U. Wallrabe, "Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 151, pp. 95-99, 4/29/ 2009.
- [38] J. C. Lötters, W. Olthuis, P. H. Veltink, and P. Bergveld, "The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane

for sensor applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 7, p. 145, 1997.

[39] G. J. B. Shugar, Jack T., *Chemical Technician's Ready Reference Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1996.

[40] R. C. Jaeger, *Introduction to microelectronic fabrication*: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1987.

[41] J. P. Uyemura, *Physical Design of CMOS Integrated Circuits Using L-Edit*, 1 ed. Georgia: CL-Engineering, 1994.

[42] G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, "Atomic Force Microscope," *Physical Review Letters*, vol. 56, pp. 930-933, 03/03/ 1986.

[43] O. Project, "OLLA White Paper on the Necessity of Luminous Efficacy Measurement Standardisation of OLED Light Sources," Olla Project, Aachen2007.

[44] A. K. Bhowmik, Z. Li, P. Bos, A. K. Bhowmik, Z. Li, and P. Bos, *Mobile Displays: Technology and Applications (Wiley Series in Display Technology)*: Wiley Publishing, 2008.

[45] S. R. Forrest, D. D. C. Bradley, and M. E. Thompson, "Measuring the Efficiency of Organic Light-Emitting Devices," *Advanced Materials*, vol. 15, pp. 1043-1048, 2003.

[46] L. S. Rohwer and J. E. Martin, "Measuring the absolute quantum efficiency of luminescent materials," *Journal of Luminescence*, vol. 115, pp. 77-90, 11// 2005.

[47] I. E. Society, "Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products," vol. LM-79-08, ed. New York: Illuminating Engineering Society, 2008, p. 15.

[48] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 2 ed. New York: Cambridge University Press, 2006.

APÊNDICE A – Parâmetros para desenvolvimento do padrão para litografia do vidro

Aquecimento do vidro antes da aplicação do fotorresiste	2 min em chapa quente a 100 °C
Parâmetros do spin-coater para uniformização do fotorresiste	2000 rpm por 40 s
Pré-cozimento	3 min a 110 °C
Cozimento	2 min a 110 °C
Tempo de ação da solução de revelação	2 min
“Pós-cozimento”	5 min a 135 °C
Tempo de ação da solução de ataque (BOE)	10 min