

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – FATEC-SP

Ana Carolina Campos dos Reis Santos

**O PROCESSO DE RECICLAGEM DO PMMA DE TELAS DE
COMPUTADORES PARA FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS
POLIMÉRICAS: UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E FÍSICO-QUÍMICA**

SÃO PAULO

2020

Ana Carolina Campos dos Reis Santos

**O PROCESSO DE RECICLAGEM DO PMMA DE TELAS DE
COMPUTADORES PARA FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS:
UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E FÍSICO-QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia dos Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo FATEC-SP, orientado pelo Prof^o. José Angelo Bortoloto, como requisito total para a obtenção do título em Tecnólogo em Materiais.

SÃO PAULO

2020

Ana Carolina Campos dos Reis Santos

José Angelo Bortoloto

**O PROCESSO DE RECICLAGEM DO PMMA DE TELAS DE COMPUTADORES
PARA FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS: UMA ABORDAGEM
HISTÓRICA E FÍSICO-QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, apresentado à Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP, no Sistema de Ensino Presencial Conectado, como requisito total para a obtenção do título de Tecnólogo em Materiais, com nota final igual a _____, conferida pela Banca Examinadora formada pelos professores:

Orientador: Prof^o. José Angelo Bortoloto
Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP

2^o Membro: Prof^a. Dr^a. Regina Maria Ricotta
Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP

3^o Membro: Prof^o. Dr^o. Eduardo dos Santos Tada
Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP

São Paulo

2020

São Paulo, 10 de dezembro de 2020.

Dedico este trabalho aos meus pais: Cristiane C. Reis Santos e Antonio J. Reis Santos e a todas as mentes revolucionárias.

Agradecimentos

Primeiramente à Deus por ter me dado saúde e força para eu poder estudar e me aperfeiçoar.

À FATEC-SP por me dar a base sólida dos conhecimentos técnicos durante todos esses anos. Aos Laboratórios Didático de Física, Química e Ciência de Materiais, por darem as condições de realizar este projeto.

Agradeço muito a minha família por estar me apoiando nesta jornada. Agradeço também ao Prof^o. José Angelo Bortoloto, por ter proporcionado esta oportunidade de ter me orientado.

Agradeço a Prof^a. Dra. Regina Maria Ricotta e ao Prof^o. Dr. Eduardo dos Santos Tada, por ter proporcionado esta oportunidade e ter me ensinado muito ao longo deste período.

Aos Professores membros da banca por se disponibilizarem a avaliar e contribuírem com esse trabalho.

RESUMO

A facilidade com a qual se adquirem equipamentos eletrônicos (computadores, televisores, notebooks) atualmente e a velocidade com que as tecnologias avançam, acabam gerando enorme quantidade de descarte desses equipamentos. Quando estes não são destinados aos locais corretos, causam danos a natureza. Reciclar é umas das melhores maneiras de minimizar os danos causados, sendo assim, este trabalho explora a reciclagem de um polímero contido em telas de notebooks, o PMMA (polimetilmetacrilato), de forma a utilizá-lo com finalidades tecnológicas aplicando-a as fibras ópticas poliméricas. Fazendo uma revisão histórica e físico-química deste processo, abordando os principais acontecimentos durante seu desenvolvimento. No processo visto a aplicação que foi proposta é a fabricação de fibras ópticas poliméricas para a utilização em sistemas de telecomunicações e sensoriamento. Com o objetivo de validar a qualidade do material produzido é avaliar a viabilidade de sua utilização, comparando-as com as utilizadas atualmente no mercado, portanto realizou-se a caracterização por espectrometria de Infravermelho, visível e Análise Térmica (TGA) da fibra.

Palavras Chaves: Reciclagem, Fibra Óptica e PMMA.

ABSTRACT

The ease with electronic equipment (computers, televisions, notebooks) are acquired today and the speed with which technologies advance, end up generating an enormous amount of disposal of this equipment. When these are not destined for the right places, they cause damage to nature. Recycling is one of the best ways to minimize the damage caused, so this work explores the recycling of a polymer contained in notebook screens, the PMMA (polymethylmethacrylate), in order to use it for technological purposes by applying it to optical fibers polymeric. Making a historical and physical – chemical review of this process, addressing the main events during its development. In the process seen, the proposed application is the manufacture of polymeric optical fibers for use in telecommunications and sensing systems. In order to validate the quality of the produced material, it is to evaluate the feasibility of its use, comparing them with those currently used in the market, therefore, the characterization was performed by visible, Infrared spectrometry and Thermal Analysis (TGA) of the fiber.

Key works: Recycling, Optical Fiber e PMMA.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| FIGURA-1: Isaac Newton, nascido em 4 de janeiro de 1643, falecimento em 31 de março de 1727..... | 11 |
| FIGURA-2: Jean Bernard Léon Foucault, nascido em 18 de setembro de 1819, falecimento em 11 de fevereiro de 1868..... | 11 |
| FIGURA-3: James Clerk Maxwell, nascido em 13 de junho de 1831, falecimento em 5 de novembro de 1879..... | 11 |
| FIGURA-4: Amplitude a , Comprimento de onda λ e Velocidade v de uma onda..... | 13 |
| FIGURA -5: Escala de Radiações Eletromagnéticas..... | 15 |
| FIGURA-6: Estrutura de uma Fibra Óptica..... | 16 |
| FIGURA-7: Imagem Ilustrativa Estrutura de uma Cabo Óptico..... | 18 |
| FIGURA-8: Seção Transversal de uma Fibra Óptica e Perfil do Índice de Refração de uma Fibra..... | 19 |
| FIGURA-9: Raios Luminosos em uma Fibra de Índice Degrau..... | 21 |
| FIGURA-10: Representação da Refração , Ângulo Crítico e Reflexão..... | 23 |
| FIGURA -11: Janela de Transmissão Observada para as Fibras Ópticas a base de PMMA..... | 28 |
| FIGURA -12: Exemplo ilustrativo Molécula de Monômero e Molécula do Polímero..... | 30 |
| FIGURA -13: Exemplo ilustrativo de Moléculas de Homopolímeros e Copolímeros..... | 30 |
| FIGURA-14: Representação esquemática dos principais tipos de Estruturas Poliméricas observadas a) estrutura linear; b) estrutura ramificada e c) estrutura em rede..... | 31 |
| FIGURA-15: Estrutura dos Polímeros Termoplásticos e Termorrígidos..... | 32 |
| FIGURA-16: Variação do Volume específico com o aumento da Temperatura mostrando as faixas de Temperatura em que ocorrem as transições t_g e t_m | 33 |
| FIGURA-17: Exemplo Genérico da Reação de Polimerização do PMMA..... | 35 |
| FIGURA-18: Espectro de Transmissão do PMMA com Espessura de 3,2 mm..... | 39 |
| FIGURA-19: Esquema dos Filmes PMMA depositados sobre Substrato de Sílicio..... | 40 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| FIGURA-20: Estrutura Interna Tela LCD..... | 41 |
| FIGURA-21: Representação Esquemática de uma Extrusora de Rosca Única..... | 45 |
| FIGURA-22: Canhão da Extrusora com Rosca simples e Rosca Dupla..... | 45 |
| FIGURA-23: Mini Extrusora Thermo Scientific modelo haake mini lab | 46 |
| FIGURA-24: Imagem da Espectrometria de Infravermelho do PMMA antes do processo de Extrusão..... | 48 |
| FIGURA-25: Imagem da Espectrometria de Infravermelho do PMMA depois do processo de extrusão..... | 49 |
| FIGURA-26 : Curvas Termogravimétricas e Suas respectivas derivadas do PMMA..... | 50 |
| FIGURA-27: Espectro no Visível do PMMA não Processado e PMMA Processado a 220, 230 e 240 °c..... | 51 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 2 | OBJETIVO | 20 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 3.1 | Natureza da Luz | 21 |
| 3.2 | Ondas Eletromagnéticas | 23 |
| 3.2.1 | Características da Ondas Eletromagnéticas | 24 |
| 3.3 | Espectro Eletromagnético | 24 |
| 4 | FIBRAS ÓPTICAS | 25 |
| 4.1 | Estrutura da Fibra Óptica | 26 |
| 4.1.1 | Cabo Óptico | 26 |
| 4.1.2 | Características Construtivas | 27 |
| 4.2 | Fabricação e Geométrica de Fibras Ópticas Vítreas | 28 |
| 4.3 | Tipos de Fibras Ópticas | 30 |
| 4.3.1 | Fibras de Índice Degrau | 30 |
| 4.3.2 | Fibras de Índice Gradual | 32 |
| 4.4 | Propagação de Ondas em Fibras | 32 |
| 4.4.1 | Equações de Maxwell | 33 |
| 4.5 | Modos Ópticos das Fibras | 35 |
| 4.6 | Atenuação e Dispersão em Fibras Ópticas | 36 |
| 4.7 | Fibras Ópticas Poliméricas | 37 |
| 4.8 | Vantagens das Fibras Ópticas | 39 |
| 5 | POLÍMEROS | 39 |
| 5.1 | Características Gerais | 41 |
| 5.2 | Propriedades Térmicas | 41 |

| | | |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.1 | Termorrígidos | 42 |
| 5.2.2 | Termoplásticos | 42 |
| 5.3 | Temperaturas Características | 43 |
| 5.3.1 | Temperatura de Transição Vítreia t_g | 43 |
| 5.3.2 | Temperatura de Fusão ou t_m | 44 |
| 5.3.3 | Temperatura de Cristalização ou t_c | 44 |
| 5.4 | Técnicas de Caracterização | 46 |
| 5.4.1 | Análise Termogravimétrica (tga) | 46 |
| 5.4.2 | Microscopia Óptica | 46 |
| 5.4.3 | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 47 |
| 5.5 | Poli (metacrilato de metila) (pmma) | 48 |
| 6 | TELAS DE LCD (Display de Cristal Líquido) | 50 |
| 6.1 | O que é uma tela de LCD | 51 |
| 6.2 | Revisão da literatura | 52 |
| 6.3 | Estrutura da tela de LCD | 52 |
| 6.3.1 | Folhas Difusoras e Placa de pmma | 53 |
| 7 | PROCESSO DE EXTRUSÃO DE POLÍMEROS | 54 |
| 7.1 | A extrusora e o processo de extrusão | 54 |
| 7.2 | Tipos de Máquinas de extrusão | 55 |
| 8 | REVISÃO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO PMMA PARA FABRICAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA | 57 |
| 8.1 | Materiais e Métodos | 57 |
| 9 | REVISÃO DAS ANÁLISES E DOS RESULTADOS | 58 |
| 10 | CONCLUSÃO | 62 |
| 11 | REFERÊNCIAS | 63 |

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução tecnológica, a fabricação de equipamentos eletrônicos como computadores, televisores, notebooks entre outros, tem aumentado em grande escala, tornando esses equipamentos cada vez mais acessíveis. O aumento destes eletrônicos e o consumo pela população resultam em grande quantidade de descartes. Desta forma, nas últimas décadas o consumo destes equipamentos, principalmente notebooks, aumentou drasticamente resultando em uma grande quantidade de resíduos sólidos tóxicos ao serem descartados. Sendo assim o descarte incorreto desses equipamentos, causa diversos danos ao meio ambiente, como a liberação de substâncias químicas que contaminam os solos e águas. Em geral, trata-se de materiais de difícil decomposição tais como os plásticos contido neles. Como consequência, por todo o mundo, as empresas tornaram-se responsáveis por todo o ciclo de existência de seus produtos. Isto inclui desde a fabricação, até o descarte correto de seus materiais [1,2].

A reciclagem desses materiais torna-se uma solução economicamente viável, sendo uma forma de amenizar a poluição causada por esses equipamentos descartados de forma inconsciente na natureza.

Um dos materiais presentes nestes notebooks e computadores é o polimetilmetacrilato (PMMA). Nos últimos anos pesquisadores tem estudado a extração deste polímero contido na tela desses equipamentos, durante o processo de reciclagem para a fabricação de fibras ópticas poliméricas [3].

2 OBJETIVO

Desta forma, este trabalho apresenta uma revisão histórica e físico-química sobre primeiramente; o funcionamento de uma fibra óptica e seus conceitos como também uma revisão conceitual sobre polímeros e o processo de extração do PMMA e a sua utilização como matéria prima para a fabricação de fibra óptica polimérica, fornecendo um panorama dos principais trabalhos publicados sobre este tema. Servindo como um “review” para técnicos, físicos, químicos e pesquisadores.

Objetivando - se, portanto, dar um fim nobre a esses equipamentos, reciclando o plástico utilizado como dispersor de luz nas telas de notebooks ou computadores pessoais para a fabricação

de Fibras Ópticas Poliméricas. Tanto a tela de notebook como a fibra plástica têm em sua composição o mesmo polímero, o Polimetilmetacrilato (PMMA). Lembrando que essas fibras plásticas têm aplicação em sistemas de telecomunicações e sensoriamento em fibra óptica [3].

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Natureza da Luz

Em 1672, o físico inglês Isaac Newton apresentou uma teoria conhecida como modelo corpuscular da luz. Nesta teoria a luz era considerada como um feixe de partículas emitidas por uma fonte de luz que atingia o olho estimulando a visão. Esta teoria conseguia explicar muito bem alguns fenômenos de propagação da luz [4].



Figura – 1: Isaac Newton, nascido em 4 de janeiro de 1643, falecimento em 31 de março de 1727.

No século XIX, o cientista francês Jean Bernard Léon Foucault (1819 – 1868), medindo a velocidade da luz em diferentes meios (ar/água), verificou que a velocidade da luz era maior no ar do que na água, contradizendo a teoria corpuscular que considerava que a velocidade da luz na água deveria ser maior que no ar (Newton não tinha condições, na época, de medir a velocidade da luz) [4].



Figura – 2: Jean Bernard Léon Foucault, nascido em 18 de setembro de 1819, falecimento em 11 de fevereiro de 1868.

Na segunda metade do século XIX, James Clerk Maxwell, através da sua teoria de ondas eletromagnéticas, provou que a velocidade com que a onda eletromagnética se propagava no espaço era igual à velocidade da luz. Maxwell estabeleceu teoricamente que a luz é uma modalidade de energia radiante que se propaga através de ondas eletromagnéticas. Quando parecia que realmente a natureza da luz era onda eletromagnética, essa teoria não conseguia explicar o fenômeno de emissão fotoelétrica, que é a ejeção de elétrons quando a luz incide sobre um condutor [4].

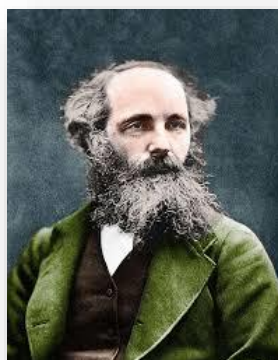


Figura – 3: James Clerk Maxwell, nascido em 13 de junho de 1831, falecimento em 5 de novembro de 1879.

Einstein usando a ideia de Planck (1900) mostrou que a energia de um feixe de luz era concentrada em pequenos pacotes de energia, denominados fótons, que explicava o fenômeno da

emissão fotoelétrica. A natureza corpuscular da luz foi confirmada por Compton (1911). Verificou que quando um fóton colide com um elétron, eles se comportam como corpos materiais [4].

Atualmente, estuda-se a luz de um modo dual: os fenômenos de reflexão, refração, interferência, difração e polarização da luz podem ser explicados pela teoria ondulatória e os de emissão e absorção podem ser explicados pela teoria corpuscular [4].

3.2 Ondas Eletromagnéticas

Num sentido bastante amplo uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio com velocidade definida. A distância entre dois máximos sucessivos de uma onda é denominada comprimento de onda λ (Figura 4) e ele pode ser visto como o espaço percorrido durante um período T . Então a velocidade v da onda pode ser dada por:

(1.1)

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

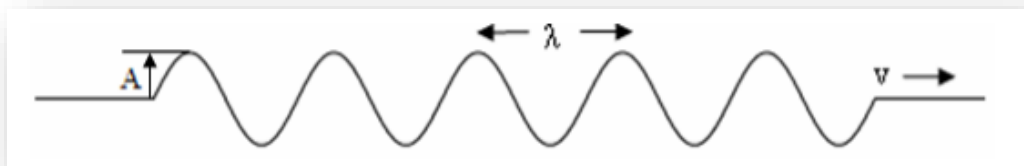


Figura - 4: Amplitude A , comprimento de onda λ e velocidade v de uma onda.

A frequência é o inverso do período e é a mais importante característica da onda eletromagnética usada em comunicações. A frequência é expressa em ciclos por segundo ou Hertz (Hz).

(1.2)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$$

3.2.1 Características das ondas eletromagnéticas.

Algumas características próprias das ondas eletromagnéticas:

- São **transversais**, isto é, a perturbação responsável por produzi-las acontece em uma **direção perpendicular** à sua direção de propagação. Nas ondas eletromagnéticas, o campo elétrico, o campo magnético e a direção de propagação são perpendiculares entre si;
- Propagam-se no vácuo com a mesma velocidade que a luz visível: **2,99792458.10⁸ m/s**, simbolizada pela letra *c*;
- Sua **amplitude** diz respeito à sua **intensidade**, quanto maior for a amplitude de uma onda eletromagnética, maior é a perturbação que ela é capaz de produzir;
- São **tridimensionais**, isto é, depois de produzidas, propagam-se igualmente em todas as direções;
- Quando atravessam meios materiais, como o ar ou a água, sua **velocidade de propagação** diminui, enquanto o seu **comprimento de onda** aumenta, de modo que a sua **frequência** não se altera. Esse fenômeno é conhecido como refração [5].

3.3 Espectro Eletromagnético.

Espectro eletromagnético é uma escala de radiações eletromagnéticas. Nele estão representados os 7 tipos de ondas eletromagnéticas: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios x e raios gama [6].

As ondas se propagam à velocidade da luz e, com exceção da luz visível, são todas invisíveis a olho nu. Ele mede as ondas eletromagnéticas. Elas têm a mesma velocidade, mas diferem em frequência e em comprimento. Essa mediação é feita através das faixas do espectro, que indicam a distribuição da intensidade do eletromagnetismo [6].

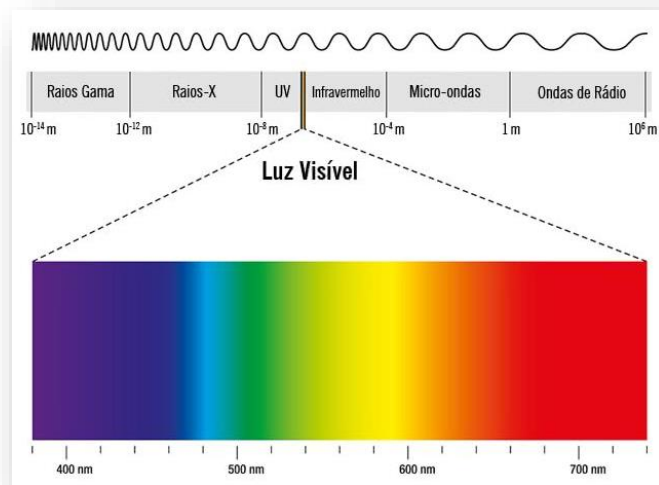


Figura - 5: Escala de radiações eletromagnéticas.

Importante observar que o espectro é colorido porque cada uma das ondas oferece a sensação de uma cor, cores essas que estão associadas às suas frequências. Desse modo, as ondas mais longas localizam-se mais próximo do vermelho. Por sua vez, quanto menor, mais perto do azul. As ondas que têm a frequência mais baixa são as mais longas. As ondas que têm a frequência mais alta são as mais curtas [6].

4 FIBRAS ÓPTICAS

Com o advento da comunicação em massa e sistemas computacionais, a necessidade de transmissão de grandes volumes de dados levou a utilização dos chamados "cabos ópticos", constituídos por fibras ópticas onde o sinal utilizado é um sinal de luz. Em comparação com a utilização de sinais elétricos em cabos de cobre, a utilização de luz como transportador de informação leva a enormes vantagens na velocidade de transmissão, na quantidade de informação que pode ser transportada e na ausência de interferência eletromagnéticas [7].

Quando as fibras ópticas são usadas como guias de onda na transmissão de sinais ópticos, a propagação da luz é possível devido ao fenômeno de reflexão total da luz, conhecido desde de 1854.

No entanto, fibras ópticas com revestimento só foram idealizadas a partir de 1950 por Brian O'Brien, porém estas fibras possuíam alta perdas e por isso suas aplicações eram limitadas a pequenas distâncias.

Kao e Hockham (1966) foram os primeiros a sugerirem a possibilidade de fibras com baixas perdas ópticas, podendo ser competitivas com cabos coaxiais e guias metálicos em aplicações na área de telecomunicações. Em 1970, foi anunciada uma fibra óptica, constituída basicamente por sílica, apresentando perda inferior a 10 dB/km que revolucionou e possibilitou o rápido desenvolvimento das comunicações ópticas e a sua utilização em aplicações comerciais [8].

Uma fibra óptica é um guia de onda eletromagnético que é constituída de núcleo, casca e revestimento protetor como mostra a Figura 6 [8], [9].

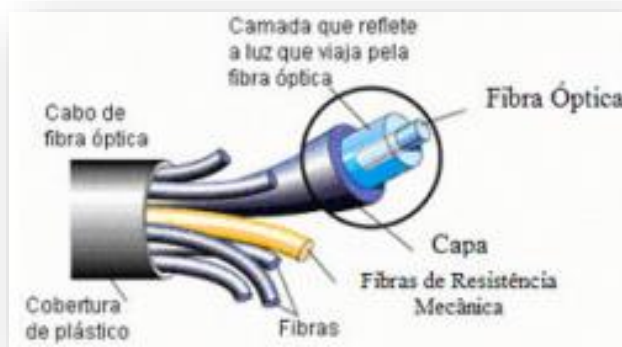


Figura - 6 : Estrutura de uma Fibra Óptica

4.1 Estrutura da Fibra Óptica

4.1.1 Cabo Óptico

O cabo de fibra óptica é constituído por fibras ópticas do tipo monomodo ou multimodo como veremos mais pra frente, que são revestidas, agrupadas em unidades básicas, preenchidas por geléia, tendo um elemento central para sustentação e elemento de tração dielétricos [10].

O núcleo da fibra pode ser preenchido ou protegido com material hidroexpansível para evitar penetração da umidade já a capa externa (cabo óptico) é constituída de material termoplástico resistente a intempéries [10].

4.1.2 Características Construtivas

O cabo óptico é constituído por: unidade básica, elemento central, núcleo, elemento de tração, capa interna, proteção contra roedores, cordão de rasgamento e capa externa.

- **Unidade Básica:** As fibras são agrupadas entre si de forma não aderente e protegidas por um tubo de material termoplástico, preenchendo seu interior com um composto para evitar a penetração de umidade proporcionando proteção mecânica às fibras.
- **Elemento Central:** Elemento de material dielétrico, posicionado no centro do núcleo para prevenir os esforços de contração do cabo.
- **Núcleo:** O núcleo deve ser protegido por um composto de geleia ou materiais hidroexpansíveis para prevenir a entrada de umidade. Se necessário, poderão ser usados tubos de material termoplástico para manter o núcleo cilíndrico.
- **Elemento de Tração:** Filamentos dielétricos dispostos sobre o núcleo do cabo para proteção contra esforços de tração.
- **Capa Interna :** Camada interna de material termoplástico aplicada por processo de extrusão.
- **Proteção contra Roedores:** Sobre a capa interna deve ser aplicada uma camada de fibra de vidro com espessura de 1,5 mm com a finalidade de proteger o cabo contra o ataque de roedores.
- **Cordão de Rasgamento:** Um cordão de rasgamento (RIP CORD) deverá ser incluído sob a (s) capa (s) do cabo.
- **Capa Externa:** Camada de material termoplástico na cor preta com proteção contra intempéries e resistente a luz solar, contínua, homogênea e isenta de imperfeições. Geralmente o material é o polietileno [10].



Figura - 7 : Imagem ilustrativa estrutura de uma cabo óptico

4.2 Fabricação e Geometria de Fibras Ópticas Vítreas

Uma fibra óptica de óxido de silício (SiO_2) consiste de um núcleo central cilíndrico envolvido por uma camada denominada de casca (*cladding*) [11]. Fibras de vidro são bastante resistentes desde que sua superfície não seja arranhada, desta forma, um outro revestimento plástico externo é encontrado na configuração destas fibras para uma maior proteção.

O processo de fabricação das fibras mais usado é a deposição química por fase vapor modificada (MCVD) [11]. Primeiramente, se fabrica uma preforma de óxido de silício (SiO_2) com um diâmetro entre 3 e 10 cm. A seção transversal da preforma apresenta uma forma circular, onde a região central é da ordem de alguns milímetros e possui um índice de refração ligeiramente maior que a periferia. Fibras de telecomunicação são feitas de sílica pura (SiO_2) sendo o núcleo dopado com GeO_2 . Alguns outros dopantes também são muito usados, como por exemplo, pentóxido de fósforo (P_2O_5), alumínio e fluorenos. Esses elementos alteram algumas propriedades dos vidros, como a viscosidade e o ponto de fusão, alterando conseqüentemente o índice de refração do núcleo [11].

A preforma é aquecida em um forno a uma temperatura de aproximadamente 2000°C e puxada pela extremidade inferior a uma velocidade constante para que o diâmetro final seja constante ao longo da fibra. Durante o processo de puxamento é depositado um revestimento plástico de proteção, sendo a fibra óptica coletada em bobinas.

Bobinas de fibras com quilômetros de comprimento podem ser fabricadas com este processo.

As fibras ópticas podem ser produzidas em diversos diâmetros, entretanto, as fibras padrões para telecomunicação possuem o diâmetro do núcleo e da casca tipicamente da ordem de $8\mu\text{m}$ e $125\mu\text{m}$, respectivamente.

Com este processo de fabricação, o índice de refração do núcleo (n_1) é ligeiramente maior que o índice de refração da casca (n_2) devido a presença de germânio no núcleo. Existem dois tipos de perfis de índices de refração para as fibras ópticas mais comumente encontradas, conhecidos como índice degrau e índice gradual. Nas fibras com índice degrau, o índice de refração entre o núcleo e a casca varia abruptamente, enquanto que nas fibras com índice gradual o índice de refração decresce gradualmente do centro à interface núcleo-casca [11]. A seção transversal e o perfil do índice de refração de uma fibra de índice degrau e gradual são mostrados na figura 8. Nesta figura, os raios do núcleo e da casca são definidos por a e b , respectivamente, enquanto que n_0 é o índice de refração do ar [11].

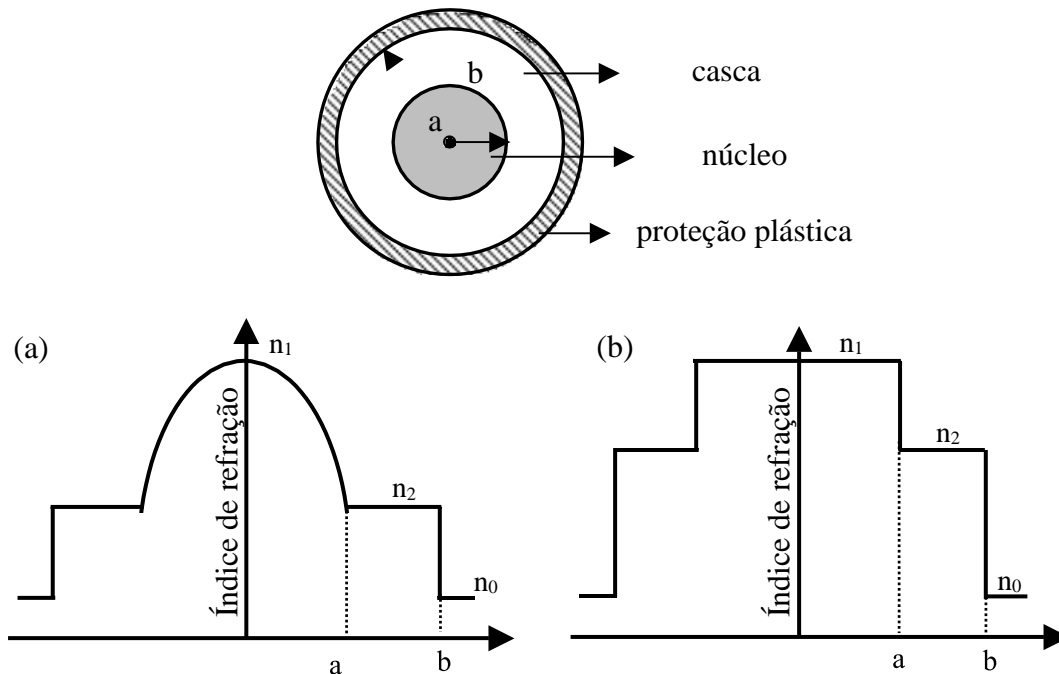


Figura – 8: Seção transversal de uma fibra óptica e perfil do índice de refração de uma fibra de (a) índice gradual e (b) índice degrau .

Existem diferentes tipos de fibras ópticas que, por sua vez, possuem diferentes características construtivas, sendo otimizadas para determinadas aplicações. As fibras ópticas são classificadas

como multimodo ou monomodo. As dimensões do revestimento e da casca são aproximadamente iguais para as fibras ópticas monomodo e multimodo. Entretanto, o diâmetro do núcleo da fibra óptica monomodo da ordem de $8 \mu\text{m}$ é muito menor do que as multimodos ($>50 \mu\text{m}$).

As fibras multimodo são utilizadas na maioria das aplicações em redes locais (LAN) [11]. Em função do diâmetro maior do seu núcleo é possível a utilização de transmissores relativamente baratos, como os diodos, e conectores de baixo custo. As fibras monomodo são adequadas para aplicações que envolvam grandes distâncias devido as baixas perdas, embora requeiram conectores de maior precisão possuindo um alto custo [10].

4.3 Tipos de Fibras

4.3.1 Fibras de índice degrau

Numa fibra de índice de refração gradual os raios incidentes na interface ar- fibra se afastam da normal devido à refração causada pela diferença dos índices de refração [10] como mostrado na figura 9. O ângulo de refração θ_r é obtido a partir da seguinte relação (Lei de Snell):

(2.1)

$$n_o \text{ sen } \theta_i = n_1 \text{ sen } \theta_r$$

onde n_o e n_1 são os índices de refração do ar e do núcleo da fibra, respectivamente, e θ_i é o ângulo de incidência do feixe. Uma nova refração será sofrida pelo feixe quando este incidir na interface entre o núcleo e a casca. No entanto, esta refração somente será possível quando $\text{sen } \phi < n_2/n_1$, onde n_2 é o índice de refração da casca.

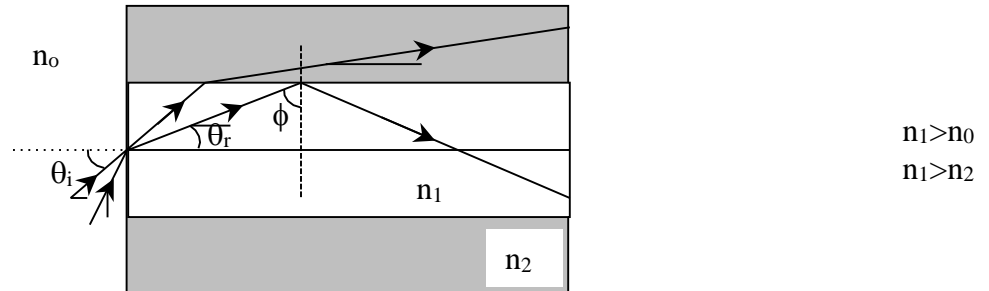


Figura – 9: Raios luminosos em uma fibra de índice degrau.

Para ângulos maiores que o ângulo crítico ϕ_c , definido através da equação:

(2.2)

$$\text{sen } \phi_c = n_2 / n_1$$

o feixe sofrerá reflexão total na interface núcleo-casca. Como os feixes sofrem diversas reflexões ao longo do comprimento da fibra, apenas raios com $\phi > \phi_c$ permanecerão confinados no núcleo da fibra.

O ângulo máximo que o feixe incidente pode ter para permanecer confinado no núcleo é determinado pelas equações 2.1 e 2.2 e notando que $\theta_r = \pi/2 - \phi_c$, desta forma obtém-se que:

(2.3)

$$n_0 \text{ sen } \theta_i = n_1 \text{ cos } \phi_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

A quantidade $n_0 \text{ sen } \theta_i$ é definida como abertura numérica (AN) de uma fibra que representa a capacidade da fibra de captar luz. Se $n_1 \approx n_2$, a abertura numérica será aproximadamente:

(2.4)

$$AN = n_1 (2\Delta)^{1/2}, \quad \Delta = (n_1 - n_2) / n_1$$

onde Δ é a variação relativa do índice de refração na interface núcleo-casca. O valor de Δ dever ser o maior possível para que se possa acoplar uma maior quantidade de luz na fibra. Entretanto, tais fibras não são úteis para sistemas de telecomunicação pois apresentam um fenômeno conhecido como dispersão modal [12].

A dispersão modal pode ser explicada através da existência de diferentes percursos ópticos no núcleo em função do ângulo de incidência na fibra. Os feixes que incidem com ângulos superiores

aos demais deslocam-se através de percursos mais longos e demoram mais tempo para atingir a extremidade oposta da fibra que os feixes que se deslocam ao longo do eixo. Os diferentes tempos de propagação fazem com que a forma dos impulsos (pulsos curtos) que representam o sinal se alterem [12]. O efeito de dispersão modal é reduzido se fibras de índice gradual são utilizadas.

4.3.2 Fibras de índice gradual

Nestas fibras [1], o índice de refração varia gradualmente a partir de um valor máximo n_1 diminuindo radialmente na direção da casca até um valor mínimo n_2 . O índice de refração na maioria das fibras gradual varia na forma quadrática decrescente.

O caminho percorrido por feixes com maior ângulo de incidência será maior, entretanto a velocidade dos feixes varia ao longo do percurso devido a variação do índice de refração. Isto é, feixes propagando ao longo do eixo da fibra percorrem um caminho menor, porém, com velocidade menor, consequentemente feixes que percorrem maior caminho terão velocidades maiores, desta forma, a dispersão modal é menor em fibras ópticas gradual.

4.4 Propagação de Ondas em Fibras

Quando a luz se propaga na fibra, esta viaja como em um guia de onda de simetria cilíndrica. Como todo fenômeno eletromagnético, campos ópticos de propagação em fibras são governados pelas equações de Maxwell [5]. Desta forma, o campo óptico guiado em uma fibra é descrito pela solução da equação de onda.

Nesta seção as equações de Maxwell serão apresentadas para o caso de uma fibra óptica com perfil de índice degrau, como também, serão descritos os modos que podem ser guiados neste tipo de fibra.

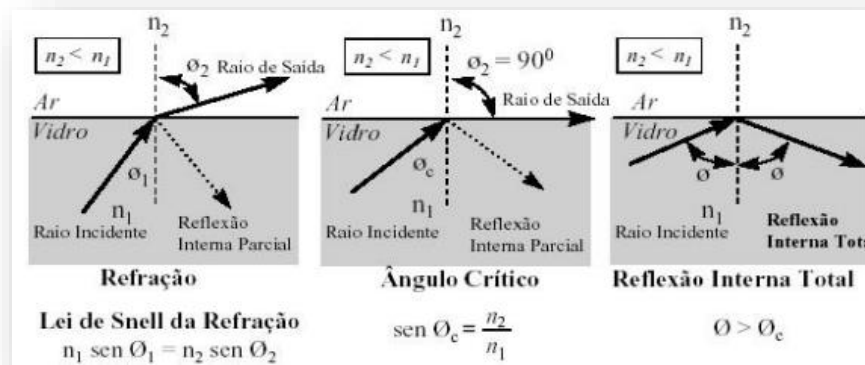


Figura – 10: Representação da refração , ângulo crítico e reflexão.

4.4.1 Equações de Maxwell

Em um meio não condutor sem cargas livres com densidade de corrente nula [11], as equações de Maxwell podem ser escritas da seguinte forma:

(2.5)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

(2.6)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

(2.7)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

(2.8)

onde \mathbf{E} e \mathbf{H} são os campos elétricos e magnéticos, respectivamente, enquanto, \mathbf{D} e \mathbf{B} são os campos de deslocamento elétrico e magnético, respectivamente [11]. A resposta do meio aos campos elétrico e magnético do sinal óptico é expressa por:

(2.9)

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

(2.10)

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}$$

onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e \mathbf{P} e \mathbf{M} são as polarizações elétrica e magnética, respectivamente e que dependem do material. As fibras ópticas são compostas basicamente por sílica ou acrilato, que possui uma natureza não magnética, ou seja, \mathbf{M} é igual a zero ($\mathbf{M} = \mathbf{0}$). Utilizando as equações 2.5 - 2.10, obtém-se:

(2.11)

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}$$

onde c é a velocidade da luz sendo definida por $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$.

A polarização \mathbf{P} expressa a forma como a fibra responde a presença de um campo óptico. Para baixas intensidades de luz, os elétrons oscilam harmonicamente, e efeitos não lineares são desprezados. A polarização elétrica é então expressa como:

(2.12)

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E}$$

onde $\chi^{(1)}$ é a susceptibilidade linear. No entanto, se a intensidade da luz for alta, a relação entre \mathbf{P} e

\mathbf{E} pode ser não-linear.

Com a equação 2.12 é possível escrever a equação 2.11 da seguinte forma:

(2.13)

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

sendo n o índice de refração definido como $n^2 = 1 + \chi^{(1)}$, na ausência de absorção. Neste caso, alterações no campo óptico ao longo da fibra são causadas por dispersão devido a dependência do índice de refração com o comprimento de onda.

O campo elétrico pode ser escrito em termos da transformada de Fourier, dado por:

(2.14)

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega$$

desta maneira, podemos escrever a equação 2.13 da seguinte forma:

(2.15)

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + n^2 k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0$$

onde o número de onda é definido como $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$, e λ é o comprimento de onda do campo óptico oscilando na frequência ω .

4.5 Modos ópticos das fibras

A solução da equação 2.15 fornece os modos ópticos de fibras ópticas com perfil degrau [10]. O conceito de modos é um conceito geral na Óptica ocorrendo também na teoria de lasers. Utilizando coordenadas cilíndricas [11] devido a simetria das fibras ópticas pode-se determinar a solução da equação de onda, entretanto, é necessário tomar duas das seis componentes de \mathbf{E} e \mathbf{H} como independentes. As demais componentes serão escritas em função das componentes

independentes. Aplicando separação de variáveis nas equações é possível obter todas as soluções para a equação de onda. As soluções das duas componentes independentes são encontradas em termos de quatro constantes que podem ser determinadas pelas condições de contorno.

Os modos das fibras são modos híbridos e denotados por HE_{mn} ou EH_{nm} , onde m e n são autovalores da equação de onda. No caso em que $m = 0$, a seguinte notação é usada: TE_{0n} e TM_{0n} , pois estes correspondem aos modos elétrico-transverso e magnético-transverso, respectivamente. A notação usada para denotar o modo de propagação fundamental na fibra é TM_{01} . Este modo somente é encontrado em fibras monomodo. Fibras que suportam outros modos propagantes são as fibras multimodo. A notação LP_{mn} é usada para modos propagantes linearmente polarizados.

4.6 Atenuação e Dispersão em Fibras Ópticas

Um parâmetro relevante na fibra é a medida da perda de potência do sinal óptico durante a propagação na fibra [10]. Se P_0 é a potência na entrada de uma fibra óptica, a potência transmitida P_T é dada por:

(2.16)

$$P_T = P_0 e^{-\alpha L}$$

onde α é a constante de atenuação sendo referida como perda da fibra óptica e L é o comprimento da fibra óptica. A perda da fibra é expressa em unidade de dB/km pelo uso da relação:

(2.17)

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log \left(\frac{P_T}{P_0} \right)$$

onde a Eq.2.16 foi utilizada para relacionar α_{dB} e α .

A dispersão está relacionada à dependência do índice de refração com a frequência. Quando uma onda eletromagnética interage com os elétrons de um dielétrico, a resposta do meio depende da frequência óptica ω . Isto faz com que as diferentes componentes espectrais contidas no pulso se propaguem com diferentes velocidades $c/n(\omega)$. Isto produz um alargamento temporal do pulso que se muito grande, pode produzir a chamada interferência entre pulsos adjacentes [13].

Ao propagar dois pulsos com diferentes comprimentos de onda, um vai se atrasar em relação

ao outro devido a dispersão. Este atraso (ΔT) é proporcional ao comprimento da fibra L e diferença dos comprimentos de onda ($\Delta\lambda$) e a constante de proporcionalidade define o parâmetro de dispersão (D):

(2.18)

$$D = \frac{\Delta T}{L\Delta\lambda}$$

No caso de $D(\lambda) > 0$, falamos de propagação na região de dispersão anômala da fibra onde as frequências menores (frequências ‘vermelhas’) viajam mais devagar que as maiores (frequências ‘azuis’). No caso $D(\lambda) < 0$ temos propagação na região normal e o oposto ocorre. No caso de $D = 0$ dizemos que temos propagação no zero de dispersão da fibra.

4.7 Fibras Ópticas Poliméricas

Em paralelo à utilização de materiais vítreos para utilização em fibras ópticas, os polímeros foram considerados também para a fabricação da mesma nos anos 60 [8]. Os altos valores de atenuação óptica observados limitaram seu uso em telecomunicações. A Figura 11 indica as janelas de transmissão das fibras ópticas à base de PMMA. É possível observar que essas janelas estão na região visível do espectro. Porém como será visto a seguir, algumas características apresentadas por estas fibras as torna um material bastante atraente para algumas aplicações específicas [14].

Fibras multimodo podem ser feitas inteiramente de plástico [12]. Muitas destas fibras possuem o núcleo de um tipo de polimetil (PMMA) enquanto que a casca é dopada com um material de menor índice de refração como polímeros contendo 35 fluorenos. As fibras de plástico apresentam como desvantagens, alta atenuação e baixa resistência a altas temperaturas. Pelo fato de ter um custo baixo e uma grande flexibilidade, essas fibras têm sido usadas há muitos anos na indústria automotiva, onde as distâncias de transmissão são pequenas e a largura de banda requerida é modesta [14].

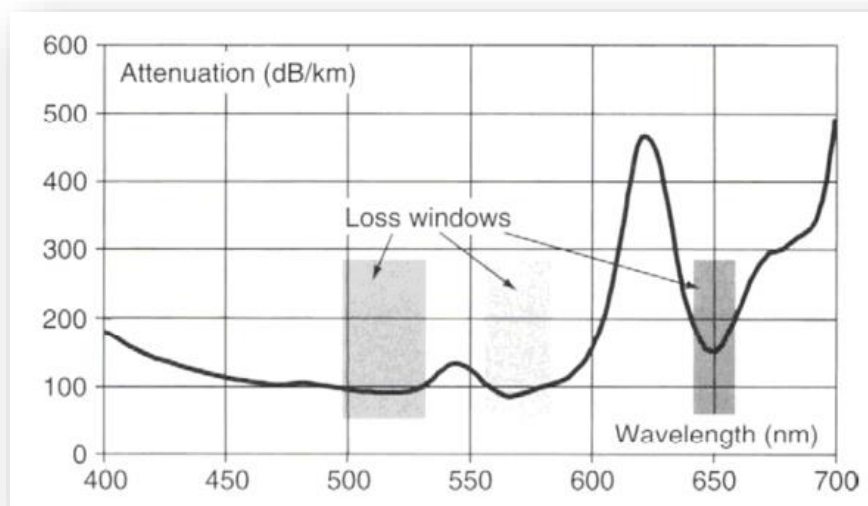


Figura – 11: Janela de Transmissão observada para as fibras ópticas a base de PMMA.

Materiais poliméricos apresentam baixo peso, excelente flexibilidade, baixo custo de fabricação e permitem a obtenção de fibras com diâmetros maiores capazes de transmitir maior quantidade de sinal luminoso, facilidade de manuseio e acoplamento entre cabos [15]. Atualmente encontram-se alguns sistemas de iluminação à base de fibras poliméricas para os quais os principais requisitos são a baixa perda de sinal óptico, excelente flexibilidade e boa resistência ao calor gerado pela fonte de luz [16].

Dentre os polímeros mais usados encontram-se o poli(cloreto de vinila), PVC; policarbonato, PC; poliestireno, PS; poli(metacrilato de metila), PMMA [17].

As fibras ópticas poliméricas (FOPs) se destacam quanto ao seu uso em relação às fibras de sílica para aplicações a curta distância, mesmo apresentando elevada atenuação. Os baixos custos associados à facilidade de manuseio e conexão atestam a aplicação das FOPs em redes de computadores, sistemas de sinalização em edifícios, conversação a curta distância, sensores, etc. Particularmente, as fibras de PMMA são totalmente adequadas para este fim por apresentarem atenuação abaixo de 150 dB/km, operarem em 650 nm e podendo ser capazes de transmitir dados a uma taxa de 10 Gbit/s [18].

4.8 Vantagens das Fibras Ópticas

A principal vantagem das fibras ópticas quando comparadas aos tradicionais meios de comunicação feitos por fios de cobre e frequências de micro-ondas, é a sua capacidade de transportar um grande volume de informações em distâncias maiores e em muito menos tempo do que os demais meios de comunicação. Por exemplo, uma rede local que utiliza linhas de cobre pode carregar três mil chamadas de telefone por vez, enquanto um sistema similar usando fibras ópticas pode carregar mais de 31 mil chamadas simultaneamente. Além disso, as fibras ópticas não são afetadas por interferências de radiação eletromagnética, tornando possível a transmissão de informação e dados com menos ruídos e erros[11].

As fibras ópticas são constituídas de vidro ou plástico, material abundante e que é um isolador elétrico, não havendo necessidade de se preocupar com aterramento, problemas de interface de equipamento e interferência eletromagnética[11].

A enorme redução do tamanho dos cabos, promovida pelas fibras ópticas, permitiu reduzir o problema de espaço e de congestionamento de dutos nos subsolos das grandes cidades e em grandes edifícios comerciais. O efeito combinado do tamanho e peso reduzido fez das fibras ópticas o meio de transmissão ideal em aviões, navios, satélites, entre outros. Além disso, os cabos ópticos oferecem vantagens quanto ao armazenamento, transporte, manuseio e instalação em relação aos cabos metálicos de resistência e durabilidade equivalentes[10].

As fibras ópticas não irradiam significativamente a luz propagada, implicando em um alto grau de segurança para a informação transportada. Isso torna a fibra importante em aplicações bancárias, redes de computadores e sistemas militares[12].

As aplicações das fibras ópticas são as mais diversas, como por exemplo, em telecomunicações e em medicina, na indústria automotiva e militar [12].

5 POLÍMEROS

Os polímeros são macromoléculas constituídas por unidades menores, os monômeros. Os monômeros ligam-se entre si através de ligações covalentes [19].

O termo polímero deriva do grego, *poli* "muitas" e *meros* "partes".

Os **meros** são as unidades que se repetem em um polímero. O **monômero** é a molécula constituída por um único mero e o **polímero** é constituído por vários meros, como mostra na figura ilustrativa a seguir.

A polimerização é o nome dado a reação de formação dos polímeros. O grau de polimerização refere-se ao número de meros em uma cadeia polimérica [19].

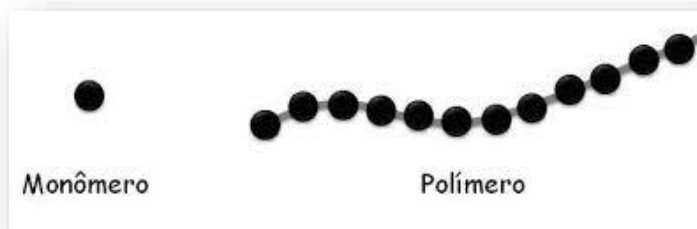


Figura – 12: Exemplo ilustrativo molécula de monômero e molécula do polímero.

- Classificação quanto ao número de monômeros:

Homopolímero é o polímero derivado de apenas um tipo de monômero.

Copolímero é polímero derivado de dois ou mais tipos de monômeros.

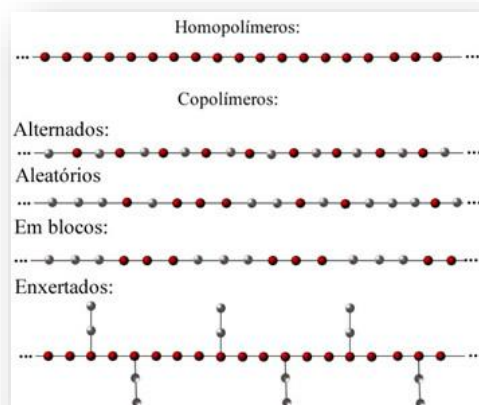


Figura - 13: Exemplo ilustrativo de moléculas de homopolímeros e copolímeros.

5.1 Características Gerais

O estudo dos materiais poliméricos teve início no século passado, em 1902, quando Staudinger propôs a teoria da macromolécula e em 1929 a descoberta do NYLON por W. H. Carothers foram dois pontos importantes para fundamentar o que é conhecido por ciência dos polímeros [20, 21]. Este material teve seu campo de atuação virtuosamente impulsionado após a segunda guerra mundial com o advento dos polímeros sintéticos e o desenvolvimento das técnicas de processamento que permitem a obtenção do material nas mais variadas formas [23].

A facilidade de processamento e o baixo custo fizeram com que os polímeros se tornassem abundantemente presentes na vida cotidiana. A utilização de materiais poliméricos como uma alternativa mais econômica e versátil vem ocorrendo nas mais diversas áreas e aplicações. Um bom exemplo é a sua utilização na indústria elétrica desde o seu uso como materiais isolantes elétricos até condutores [23].

Dependendo da estrutura química dos monômeros e da técnica empregada para a polimerização, os polímeros podem exibir diferentes tipos de estruturas e, com isso, diferentes propriedades físicas que irão determinar a sua aplicabilidade. Os tipos mais comuns são os polímeros de estrutura linear, ramificada ou em rede esquematicamente representados na Figura 14.



Figura - 14: Representação esquemática dos principais tipos de estruturas poliméricas observadas a) estrutura linear; b) estrutura ramificada e c) estrutura em rede.

5.2 Propriedades Térmicas

Os polímeros são classificados de diversas maneiras: pela sua origem, método de síntese, estrutura, comportamento térmico ou aplicação final. De acordo com o seu comportamento térmico os polímeros podem ser classificados como termoplásticos ou termorrígidos [24].

5.2.1 Termorrígidos

Polímeros com estrutura em rede são conhecidos como termorrígidos. Na sua formação é criada uma estrutura reticulada, com ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas impossibilitando ser fundido ou remodelado. Na maioria dos casos, resinas termorrígidas são preparadas em estados de polimerização parcial que pode ser moldadas termicamente e posteriormente enrijecidas por um processo de cura (polimerização).

As resinas termorrígidas mais utilizadas comercialmente são as resinas fenólicas, epóxi, poliésteres insaturados e uretanas. Para a etapa de cura, a resina é misturada com um agente de polimerização apropriado e depois é aquecida. Em alguns sistemas termorrígidos, como em resinas epóxi e poliéster, a polimerização pode ocorrer com pouca ou praticamente nenhuma aplicação de calor [21].

5.2.2 Termoplásticos

Um polímero termoplástico possui uma mudança reversível em sua dureza com mudança de temperatura. Tanto os polímeros lineares como os polímeros ramificados são termoplásticos e podem ser amolecidos até tornarem-se um fluido viscoso com aumento de temperatura. Esses polímeros são aplicados em processos de moldagem, injeção e sopro. A rigidez dos termoplásticos em baixas temperaturas é atribuída à existência de forças secundárias entre as cadeias poliméricas que são quebradas com o aumento da temperatura [21].

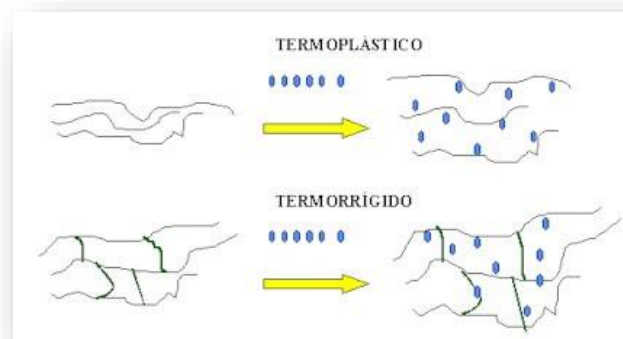


Figura – 15: Estrutura dos polímeros termoplásticos e termorrígidos.

5.3 Temperaturas Características

5.3.1 Temperatura de Transição Vítrea ou T_g

Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura que, durante o aquecimento de um material polimérico de uma temperatura muito baixa para valores mais altos, permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade, ou seja, adquiram possibilidade de mudança de conformação. Abaixo da T_g o polímero não tem energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia com relação à outra por mudanças conformacionais. Ele está no estado vítreo caracterizado por apresentar-se duro, rígido e quebradiço como um vidro, por isto *g*, do inglês “glass”. A transição vítrea apresenta características de transições da fase termodinâmicas de segunda ordem permitindo que alguns autores identifiquem o estado vítreo como estado termodinâmico. Algumas propriedades mudam com a T_g e, portanto, podem ser utilizadas para sua determinação como: módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, índice de refração, calor específico, entre outras [22].

Em polímeros amorfos a T_g , é a temperatura característica mais importante em suas propriedades mecânicas. De fato, a temperatura de transição vítrea está entre as primeiras propriedades a ser medida [25].

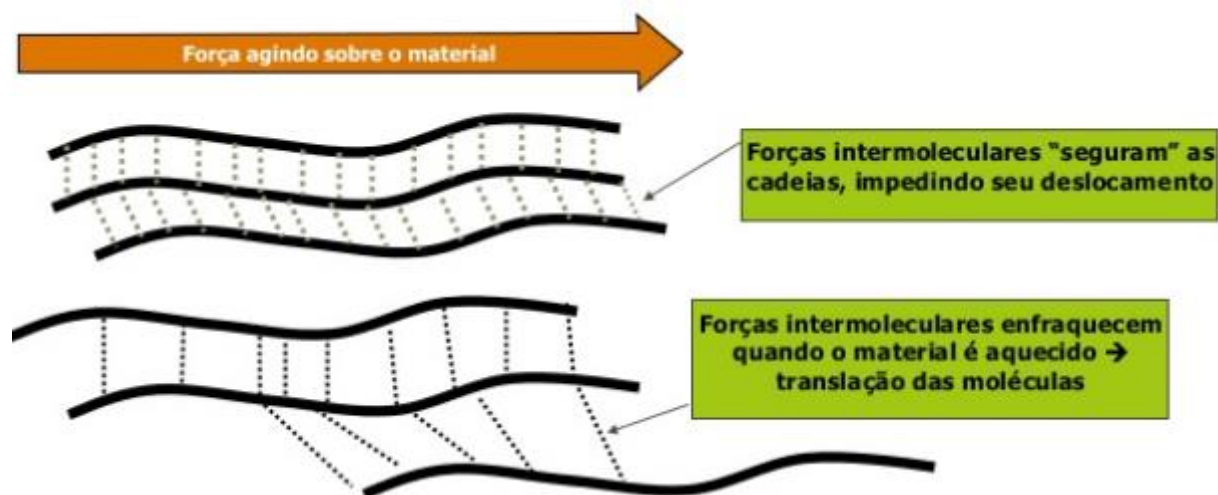


Figura – 16: Representação da cadeia polimérica antes e depois da T_g .

5.3.2 Temperatura de Fusão ou T_m

Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura em que, durante o aquecimento, desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos (*m* do inglês “melt”). Neste ponto, a energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina, destruindo a estrutura regular de empacotamento, mudando do estado borrachoso para o estado viscoso (fundido). Esta transição só envolve fases cristalinas, portanto só tem sentido se aplicada para polímeros semicristalinos. Trata-se de uma mudança de primeira ordem, afetando variáveis, tais como volume específico, entalpia, etc [22].

5.3.3 Temperatura de Cristalização ou T_c

Durante o resfriamento de um polímero semicristalino a partir de seu estado fundido, isto é, de uma temperatura acima da T_m , ele atinge uma temperatura baixa o suficiente para que, em um dado ponto dentro da massa polimérica fundida, um número grande de cadeias poliméricas se organize especialmente de forma regular. Esta ordenação espacial permite que a ordenação de uma estrutura cristalina (cristalito ou lamela) naquele ponto. Cadeias em outros pontos também estarão aptas a se ordenarem formando novos cristais. Isto se reflete em toda a massa polimérica produzindo-se a cristalização da massa fundida [22].

A figura mostra de forma esquemática a variação no volume específico de um polímero em função da temperatura. Um aumento da temperatura ocasiona um aumento do volume devido à expansão térmica. Este aumento é esperado ser linear com a temperatura, a não ser que ocorra alguma modificação na mobilidade do sistema, o que implicaria em um mecanismo de expansão diferente. Para simplificar a análise dividem-se os polímeros em dois grandes grupos: amorfos e cristalinos, quando então são esperados dois comportamentos característicos[22].

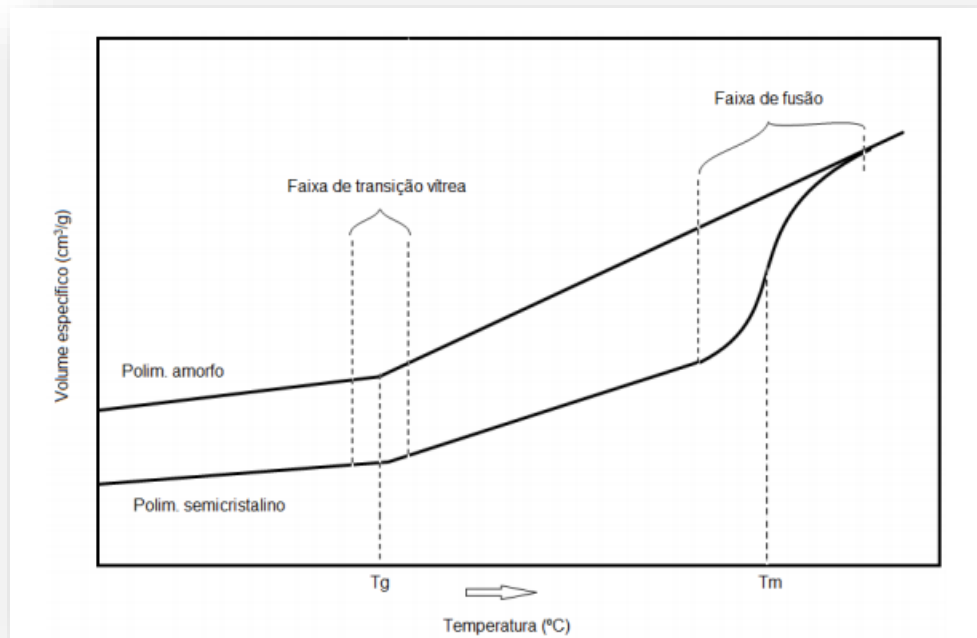


Figura - 16: Variação do volume específico com o aumento da temperatura mostrando as faixas de temperatura em que ocorrem as transições T_g e T_m .

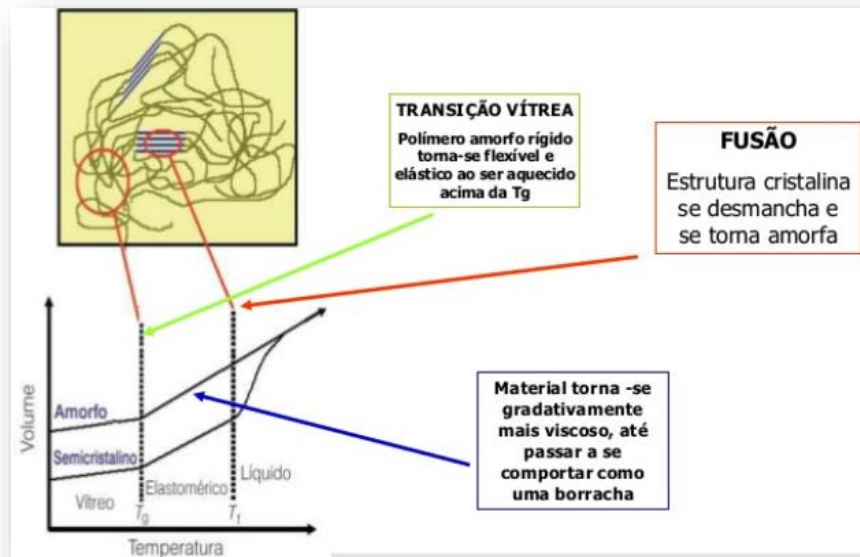


Figura - 17: Temperaturas Características do Polímero: T_g , T_m , T_c .

5.4 Técnicas de Caracterização

5.4.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica é definida como um processo contínuo que envolve a medida da variação de massa de uma determinada amostra em função da temperatura (varredura de temperatura) ou do tempo a uma temperatura constante (modo isotérmico) [26].

A amostra pode ser aquecida ou resfriada, a uma velocidade programada, ou mantida a uma temperatura fixa. O mais comum para análises de polímeros é por aquecimento a velocidades na faixa de 5 a 10 °C/min. O resultado da análise é mostrado sob a forma de gráfico cuja abscissa contém os registros de temperatura (ou do tempo) e a ordenada, o percentual em massa perdido ou ganho [26].

As aplicações específicas da termogravimétrica podem ser resumidas em:

- decomposição térmica de substâncias inorgânicas, orgânicas de baixa massa molar e de polímeros: determinação da temperatura de decomposição.
- pirólise de diversas substâncias.
- determinação de umidade, teor de voláteis e de cinzas.
- estudos de degradação e higroscopicidade.
- oxidação térmica degradativa de substâncias poliméricas.
- estudos cinéticos de reações.
- curvas de adsorção e dessorção.

5.4.2 Microscopia Óptica

O microscópio óptico é um instrumento usado para ampliar e regular, com uma série de lentes capazes de distinguir através da luz, estruturas pequenas.

Dois tipos de microscópio óptico são utilizados na análise de materiais: de reflexão e de transmissão. O microscópio óptico de transmissão é bastante utilizado na análise de materiais cerâmicos e poliméricos. Nos metais e semicondutores a penetração da luz, devido sua interação com os elétrons de condução, é muito pequena, por isso utiliza-se exclusivamente o microscópio óptico de luz refletida [27].

A resolução do microscópio óptico é determinada pelo comprimento de onda da luz visível (4000-8000 Å), que é relativamente alta. Por microscopia pode - se observar grande parte dos defeitos cristalinos e constituintes maiores que 0,5 µm [27].

5.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) ou Scanning Electron Microscope (SEM) permite a obtenção de informações estruturais e químicas com alta ampliação e resolução, podendo apresentar detalhes menores que 1 nm. As imagens têm alta profundidade de foco. Para análise de materiais não condutores, como os poliméricos, é depositada uma fina camada de um elemento condutor (ouro, liga de ouro-paládio, platina, alumínio ou carbono), sobre o material, para estabelecer a necessária condutividade superficial imprescindível para visualização no monitor [28].

O equipamento de MEV consiste de um canhão de elétrons, o qual possui um filamento de tungstênio, um conjunto de lentes magnéticas, detectores de sinais e um sistema de processamento de imagens, operando sob vácuo. Entre a lente eletromagnética e a amostra, é interposta uma bobina de varredura que provoca um desvio do feixe de elétrons, de forma que o mesmo vai incidir sobre o objeto ponto a ponto, numa sequência determinada. Desse modo, a irradiação da amostra com elétrons provoca emissão de elétrons secundários, elétrons retroespalhados e de raios-X [28].

Os detectores dos elétrons secundários e retroespalhados normalmente são utilizados para obtenção de imagens. Conforme o feixe de elétrons primário percorrem a superfície, os sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações contidas na amostra. Os elétrons secundários fornecem imagens de topografia da superfície da amostra e são responsáveis pela obtenção de alta resolução. Já os elétrons retroespalhados fornecem imagens características de variação de composição [28].

Através do acessório de espectrometria dispersiva de raios-X (EDS) é possível realizar análises químicas das amostras. No EDS, quando o feixe de elétrons incide sobre a amostra, os elétrons mais externos dos átomos e íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro dos raios-X. A energia associada a esse elétron é medida por um detector instalado no equipamento. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas,

é possível, no local de incidência do feixe, determinar os elementos químicos presentes na amostra [28].

5.5 Poli (metacrilato de metila) (PMMA)

A história dos polímeros acrílicos começa com a preparação do etilmetacrilato por Frankland e Duppa (1865), enquanto em 1877, Fittig e Paul notaram que ele possuía certa tendência para polimerização. Por volta de 1900, a maioria dos acrílicos mais comuns já havia sido preparados em laboratório e ao mesmo tempo já existiam alguns trabalhos sobre sua polimerização. Em 1901, o Dr. Rohn, na Alemanha, começou um trabalho sistemático no campo dos acrílicos e mais tarde tomou parte ativa no desenvolvimento industrial do Ester acrílico naquele país. O poli(metacrilato de metila) (PMMA) foi o primeiro polímero acrílico produzido industrialmente por Rohn e Mass, em 1927. A solução do polímero em solvente orgânico foi usada principalmente em lacas e formulações para revestimento de superfície. Mais tarde o estudo do metacrilato e a sua polimerização levaram a um método econômico para a fabricação dos monômeros [29].

O poli(metacrilato de metila) é obtido da polimerização do metacrilato de metila (Figura 17), é resistente a intempéries, tem elevada estabilidade dimensional e excelentes combinações de propriedades estruturais e térmicas.

É um polímero termoplástico, amorfo, rígido e vítreo à temperatura ambiente. É muito utilizado em substituição ao vidro devido a sua alta transparência; atinge 92% de transmissão da luz na faixa de comprimento de onda na região do visível. Possui índice de refração de 1,49 e densidade de 1,17 - 1,20 g/cm³. Peso molecular de 105 – 106. A figura 17 mostra a estrutura repetitiva, e a figura 18 apresenta o gráfico de transmitância do PMMA (da marca Plexiglas V052), em função do comprimento de onda.

O PMMA, quando submetido à elevada temperatura, sofre despolimerização, produzindo o monômero MMA [28].

Seu índice de refração de 1,49 é suficientemente alto para utilização em lentes e outras aplicações ópticas especiais [30]. O PMMA é resistente a soluções aquosas, porém tem baixa resistência aos ésteres, hidrocarbonetos aromáticos e cetonas [31].

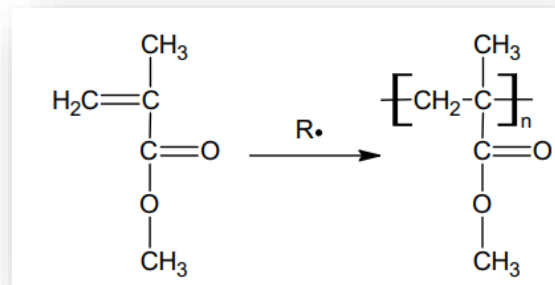


Figura - 17: Exemplo genérico da reação de polimerização do PMMA.

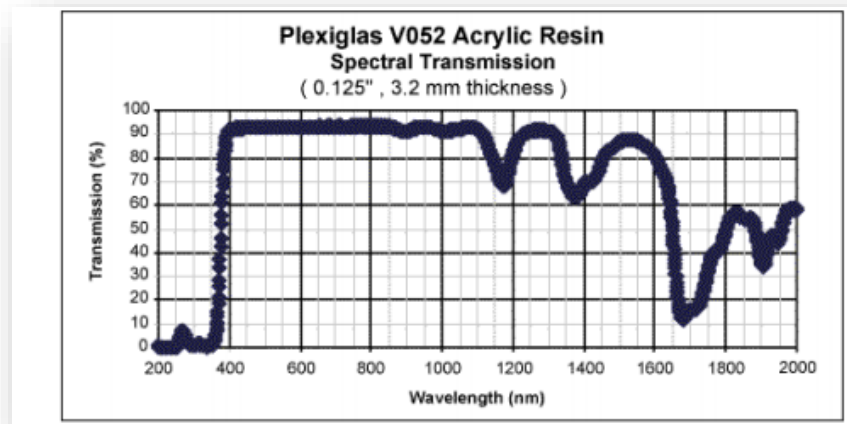


Figura - 18: Espectro de transmissão do PMMA com espessura de 3,2 mm (ARKEMA, 2006).

O PMMA apresenta melhores propriedades ópticas e mecânicas quando comparado com outros polímeros como o poliestireno (PS), policarbonato (PC) e poliimidas. Em relação a estabilidade térmica, fibras ópticas de PC apresentam maior estabilidade em relação as fibras constituídas por PMMA (120°C para o PC e 80 °C para o PMMA). Todavia, as fibras de PMMA possuem menores perdas de transmissão na região visível da luz quando comparadas às fibras de PC, o que é importante em sistemas de iluminação [27]. As fibras ópticas de PS possuem propriedades mecânicas inferiores as fibras de PMMA, sendo que este pode resistir a deformações elásticas de até 13%, enquanto para o PS este valor é de até 6% [32].

Muitos trabalhos vêm sendo realizados utilizando o PMMA como guia de luz. Giacon (2004)

confeccionou guias de onda planares a base de PMMA em substrato de silício com modificação na superfície por plasma de CHF₃. Essa fluoração diminui o índice de refração da superfície do filme de PMMA dando a ela a característica de um guia de onda, conforme esquematizado na Figura 9. Esses filmes possibilitam a escrita de circuitos ópticos por fotolitografia com aplicações em sistemas de óptica integrada [33].



Figura - 19: Esquema dos filmes PMMA depositados sobre substrato de silício (Giacon (2004)).

Ma et al. (2006) [34], estudaram a fabricação de fibras ópticas poliméricas com índice de refração gradual. Seu método baseia-se na polimerização rápida do MMA por ativação térmica e depois a co-extrusão, o PMMA obtido em seu trabalho possui uma baixa polidispersividade na distribuição de pesos moleculares quando comparado com os métodos convencionais de obtenção do PMMA utilizadas na engenharia, além disso, as fibras ópticas produzidas a partir desse PMMA obtiveram perdas ópticas um pouco menores, sendo essa diferença acentuada em comprimentos de ondas próximos a 650 nm.

Blendas poliméricas a base de PMMA também estão sendo estudadas para a confecção de fibras ópticas poliméricas tanto para aplicação na área de iluminação como na área de transmissão de dados. O MMA é polimerizado junto com o butilacrilato e o etilenoglicoldimetacrilato para melhorar as propriedades mecânicas das fibras ópticas obtidas [35].

6 TELAS DE LCD (Display de Cristal Líquido)

6.1 O Que é uma Tela LCD?

LCD é a sigla para “Display de Cristal Líquido”, originalmente Liquid Crystal Display, em inglês. Este é o padrão de telas para muitos equipamentos portáteis como TVs, notebooks ou tablets [35].

O LCD é a parte frontal que gera as cores e forma a imagem da tela, o que muda é o padrão da luz de fundo. **As telas LCD’s funcionam com cores projetadas em uma transparência**, ou seja, não brilham. Desse modo, a tela precisa de uma fonte de luz localizada na parte de trás, o **backlight**, para mostrar a imagem [35].

Praticamente todos os equipamentos vendidos atualmente possuem essa estrutura, ou seja, todas são LCD. O que irá diferenciar cada tela é o tipo de retroiluminação (backlight), podendo ser **LED** ou **CCFL**. As lâmpadas do backlight podem estar localizadas atrás, ao lado ou até mesmo na parte frontal do LCD [35].

O objetivo do **backlight** é destacar as diferenças claro-escuro e melhorar a capacidade de leitura. Abaixo você vê como funciona a estrutura interna de uma tela:

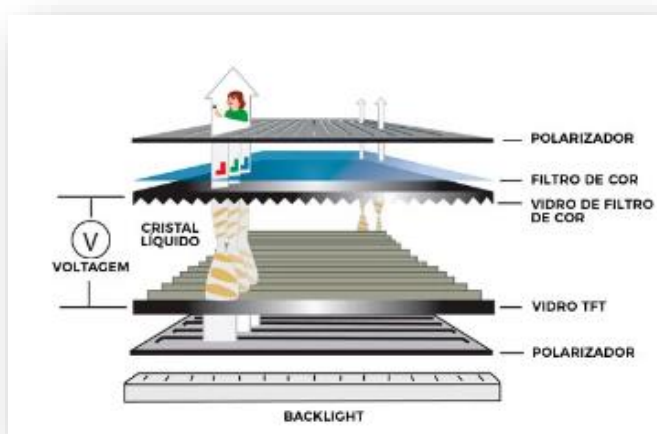


Figura - 20: Estrutura interna tela LCD (NEWHAVENDISPLAY)

6.2 Revisão da Literatura

Os monitores de LCD (*Liquid Crystal Displays*) surgiram como uma proposta tecnológica mais avançada em substituição aos monitores de Tubos de Raios Catódicos (CRTs) [36]. O *design* compacto com tela plana mostrou-se muito atrativo aos consumidores, além da vantagem de redução de energia elétrica, devido ao melhor desempenho no quesito economia de energia [37,38].

Outras tecnologias que empregam tela plana também foram desenvolvidas, tais como o plasma e o LED (*Light Emitting Diode*), porém foram suplantadas pela elevada demanda de equipamentos LCD, devido principalmente à popularização desta tecnologia e às vantagens agregadas a esse produto, como o tamanho e a baixa tensão de acionamento [39].

Os monitores de LCD para notebooks empregam em sua composição materiais pertencentes às classes de metais, cerâmicas e **polímeros**. Dentre esses materiais, os principais são plástico, ferro, metais não ferrosos, e vidro [40]. Por esse motivo, há elevada dificuldade na reciclagem desses equipamentos.

A unidade plástica dos monitores, carcaça (cobertura superior e inferior), geralmente é fabricada utilizando polímeros termoplásticos como o ABS, copolímero constituído por acrilonitrila, butadieno e estireno, e HIPS, poliestireno de alto impacto. A blenda de PC (policarbonato)/ABS também é muito utilizada para a fabricação das carcaças poliméricas [41]. Esses polímeros, juntamente com o PVC poli (cloreto de vinila), fazem parte de muitos equipamentos eletrônicos em geral.

6.3 Estrutura da Tela de LCD

A tela de LCD, principal componente de um monitor, apresenta uma estrutura organizacional complexa [42]. O filme de cristal líquido é composto principalmente por uma mistura de compostos: bifenilo, azometina, pirimidina ou difluorfenileno. Cada tela de LCD tem 0,6 mg de cristal líquido por cm^2 , o que representa 0,2% da massa total do monitor [43,44]. O cristal líquido é protegido por duas placas delgadas de vidro, de 0,4 a 1,1 mm de espessura, formando um sanduíche. Um filme de ITO (óxido de índio dopado com óxido de estanho) reveste a parte interna das placas e é utilizado na condução de eletricidade para o cristal líquido, no qual a imagem é formada [42,45,46,44]. A tela apresenta, aderida às superfícies externas das placas de vidro (que não estão em contato com o cristal

líquido), filmes poliméricos multicamada que funcionam como polarizadores de luz.

6.3.1 Folhas Difusoras e Placa de PMMA

Após a tela de LCD encontram-se folhas difusoras, designadas nesse trabalho por folha difusora metalizada, folha difusora opaca e folha difusora transparente, para facilitar a identificação das mesmas. Em seguida, há uma placa de poli (metil metacrilato), cujo nome comercial é Perspex. Essa placa de PMMA, junto com as a folhas difusoras, encontram-se dentro da *light box* (caixa de iluminação), que é um suporte metálico que contém as lâmpadas CCFL, do inglês *Cold Cathode Fluorescent Lamp* (Lâmpadas Fluorescentes de Catodo Frio). As CCFL são lâmpadas de mercúrio que se encontram dispostas na *light box*, equidistantes entre si. O número de lâmpadas pode variar de um monitor para outro, de acordo com o tamanho do aparelho [37]. Em seguida há um suporte metálico que contém as PCIs (Placas de Circuito Impresso).

As PCIs são compostas por um material base chamado de laminado. Esse material pode apresentar variações quanto à sua composição, que pode ser de fenolite, resina fenólica impregnada em papelão; composite, resina fenólica com adição de fibra de vidro, ou ainda de material cerâmico. Os componentes eletrônicos são montados sobre o laminado, que recebe um recobrimento de cobre antes da montagem. As PCIs empregam vários metais em sua composição como cobre, ferro, níquel, zinco, ouro, prata e estanho, além de materiais plásticos e cerâmicos [37,47]. A figura 20 apresenta, de forma esquemática, a sequência em que os componentes, citados anteriormente, estão arranjados em um monitor de LCD.

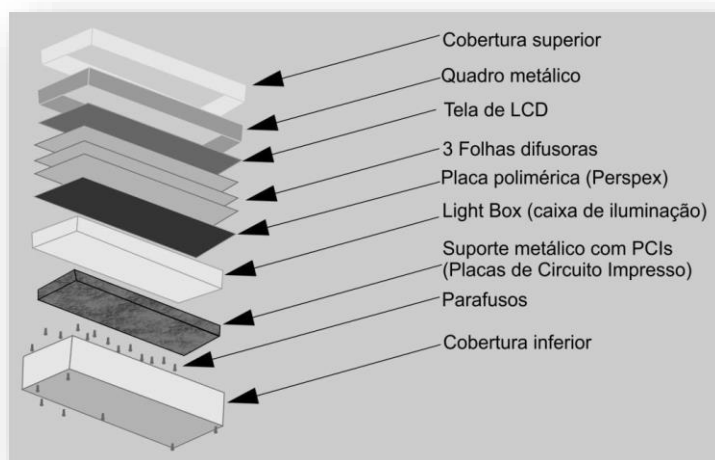


Figura – 20: Sequência das unidades básicas de um monitor de LCD visto de frente para trás.

7 PROCESSO DE EXTRUSÃO DE POLÍMEROS

7.1 A Extrusora e o Processo de Extrusão

A Extrusora é um equipamento largamente empregado na indústria do plástico na fabricação de produtos contínuos como filmes, tubos, monofilamentos entre outros. Além da produção de um material granulado novo ou reciclado [48].

O processo de extrusão consiste em alimentar o funil da extrusora com o material moído ou granulado, o qual através da gravidade cairá sobre uma rosca que o transportará dentro de um cilindro aquecido por resistências elétricas, parte deste calor é provido pelo atrito do próprio material com as paredes do cilindro. Nessa fase o material passa por 3 zonas: alimentação compressão e dosagem [48].

- **Zona de Alimentação:** Na zona de alimentação a rosca possui sulcos profundos, pois a intenção é apenas aquecer o material próximo ao seu ponto de fusão e transportá-lo a próxima zona.
- **Zona de Compressão:** Nesta zona, existe uma diminuição progressiva dos sulcos da rosca, comprimindo o material contra as paredes do cilindro promovendo sua plastificação.
- **Zona de Dosagem:** Os sulcos da rosca são continuamente rasos, fazendo com que exista

uma mistura eficiente do material e a manutenção da vazão através da pressão gerada [48].

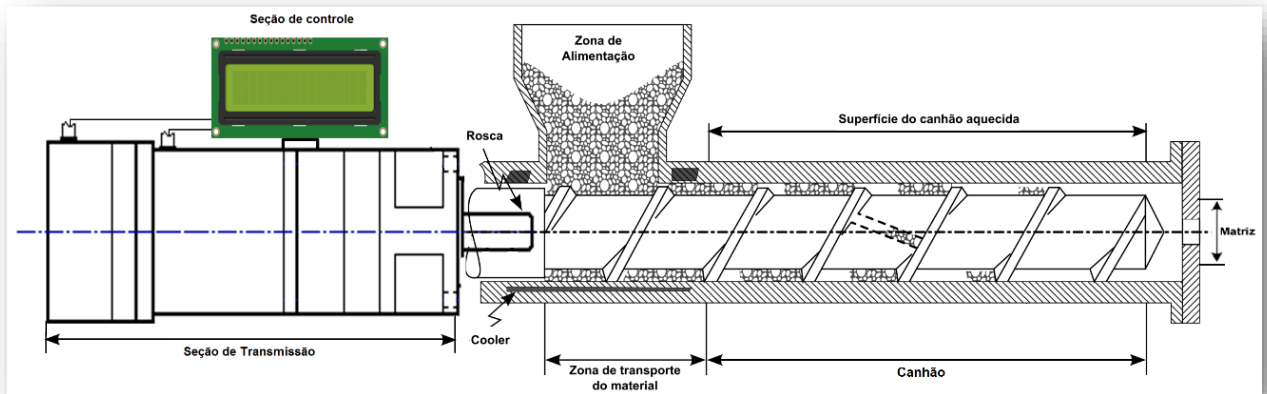


Figura – 21: Representação esquemática de uma extrusora de rosca única.

7.2 Tipos de Máquinas Extrusoras de Plásticos

Existem diferentes tipos de máquinas de extrusão, onde possuem desde uma única rosca á duas ou até mesmo quatro (está é a mais rara).

A seguir os diferentes tipos de extrusoras.

- **Extrusora dupla-rosca:** é adequada para processamento de materiais mais sensíveis como PVC, masterbatch, blendas e compostos. Por ter mais de uma rosca sua capacidade de mistura e bombeamento do fundido é muito melhor. As roscas podem ser co-rotantes (giram no mesmo sentido) ou não [48].

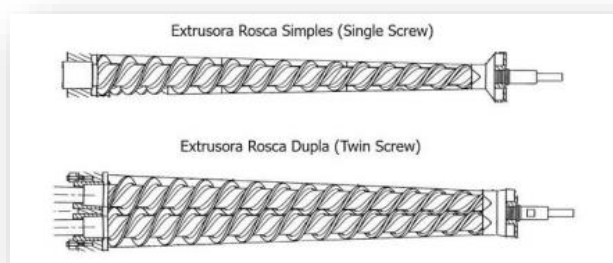


Figura - 22: Canhão da extrusora com rosca simples e rosca dupla.

- **Mini extrusora:** muito usada para testes de desenvolvimento de novos produtos, tem como objetivo a produção em baixa escala. Aqui, usa-se o mínimo de matéria-prima possível, para que se consiga a melhor forma de produzir um material plástico com determinadas características [48].
- **Exemplo de mini extrusora é a Thermo Scientific Modelo Haake Mini Lab II:**

O compositor gêmeo micro-cônico científico Thermo do parafuso de HAAKE™ MiniCTW é um dispositivo eficiente, autônomo rápido, seguro, do custo com função da exportação dos dados, e exige tão pouco quanto cinco gramas ou sete mililitros (ml) do material combinando, e é ideal para a extrusão reativa precisamente controlada de derretimentos elevado-viscous. Com o uso de um alimentador opcional da força, os usuários podem expulsar volumes materiais muito pequenos. O torque do motor de movimentação pode ser monitorado, conseqüentemente, diretamente aumentando a eficácia total da operação inteira [49].



Figura - 23: Mini extrusora Thermo Scientific Modelo Haake Mini Lab II.

8 REVISÃO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO PMMA PARA FABRICAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA

A seguir virar a revisão do artigo BLUCHER sobre : Reciclagem de polímeros para aplicação em telecomunicações coordenado pelo professores Leite, S. T. ; Prado, A. R; Ribeiro, M. R.; Pontes, M. J.; Machado, L. C.; Borges, A. S. ; Sena, G. L. , descrevendo como foi feito o processo de extração do PMMA de telas de notebook e o método utilizado para transformar este PMMA reciclado em fibra óptica. [50]

8.1 Materiais e Métodos

A amostra de PMMA foi retirada das telas de notebooks com defeito que aguardavam o descarte na Sucata da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) [50].

O PMMA é a placa de fundo dessas telas e é utilizado como difusor de luz.

A primeira etapa consistiu na limpeza da amostra, em seguida sua trituração e armazenagem em estufa à vácuo por 24 horas. Em seguida, o material foi colocado em uma mini-extrusora da

Thermo Scientific Modelo Haake Mini Lab II com dupla rosca, ambas à rotação de 60 rpm. O diâmetro de saída escolhido foi o mesmo de fibras ópticas comerciais (125 μm) e as temperaturas foram 220, 230 e 240 $^{\circ}\text{C}$. As amostras foram caracterizadas por infravermelho (IV) e análise termogravimétrica (TG) para monitorar se houve degradação do material. Também foi realizado um teste de emissão no espectro visível, para comprovar se a fibra não apresentava absorções indesejáveis em sua faixa de operação [50].

9 REVISÃO DAS ANÁLISES E DOS RESULTADOS

As análises realizadas para acompanhar a degradação das fibras devido ao calor utilizado no processo de extrusão mostraram que não houve prejuízos às amostras, como é possível observar nas Figuras 24 e 25.

As bandas de absorção no Infravermelho não foram alteradas pela degradação do PMMA no processo de extrusão.

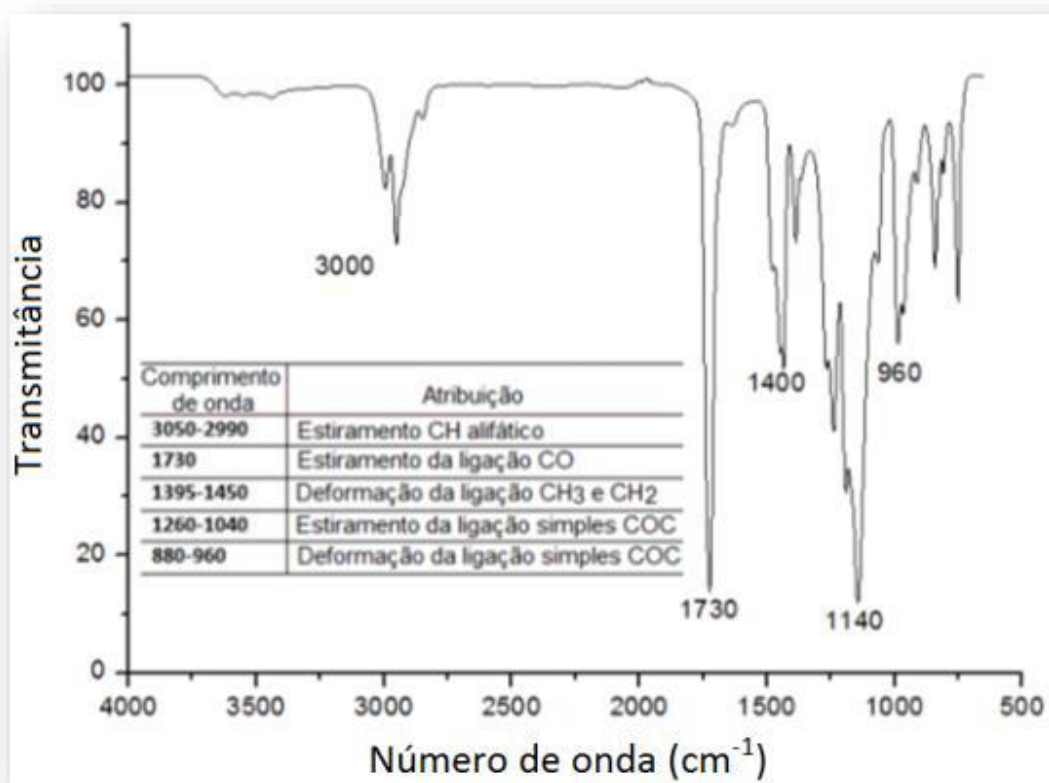


Figura - 24: Imagem da espectrometria de Infravermelho do PMMA antes do processo de extrusão.

Na Figura 25, há a medida de absorbância das amostras processadas em diferentes temperaturas.

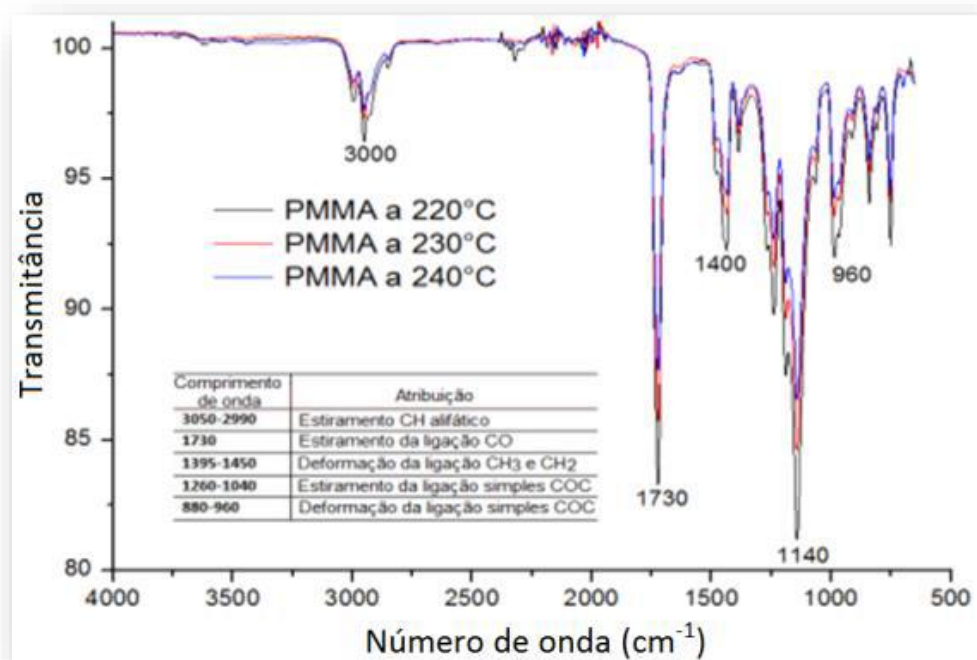


Figura - 25: Imagem da espectrometria de Infravermelho do PMMA depois do processo de extrusão.

As curvas termogravimétricas, na Figura 26, apresentam os mesmos perfis e a temperatura de decomposição do material manteve-se praticamente constante, para as quatro amostras analisadas.

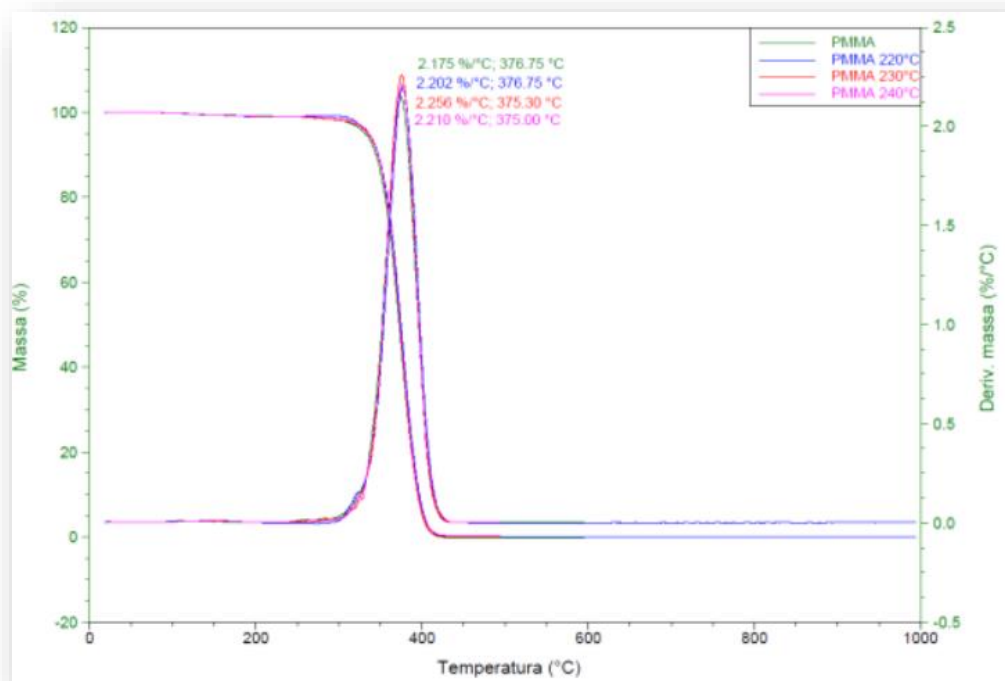


Figura - 26 : Curvas termogravimétricas e suas respectivas derivadas do PMMA.

Tais resultados evidenciam o baixo índice de contaminação e alteração estrutural entre as amostras.

As informações da espectrometria no visível foram realizadas entre 400 e 800 nm. Verificou-se que a amostra processada a 220 °C apresenta características de absorção próximas ao do PMMA antes da reciclagem. Na Figura 27 há os dados de absorção no visível e a foto da fibra produzida a 220 °C ao lado de uma POF comercial [50].

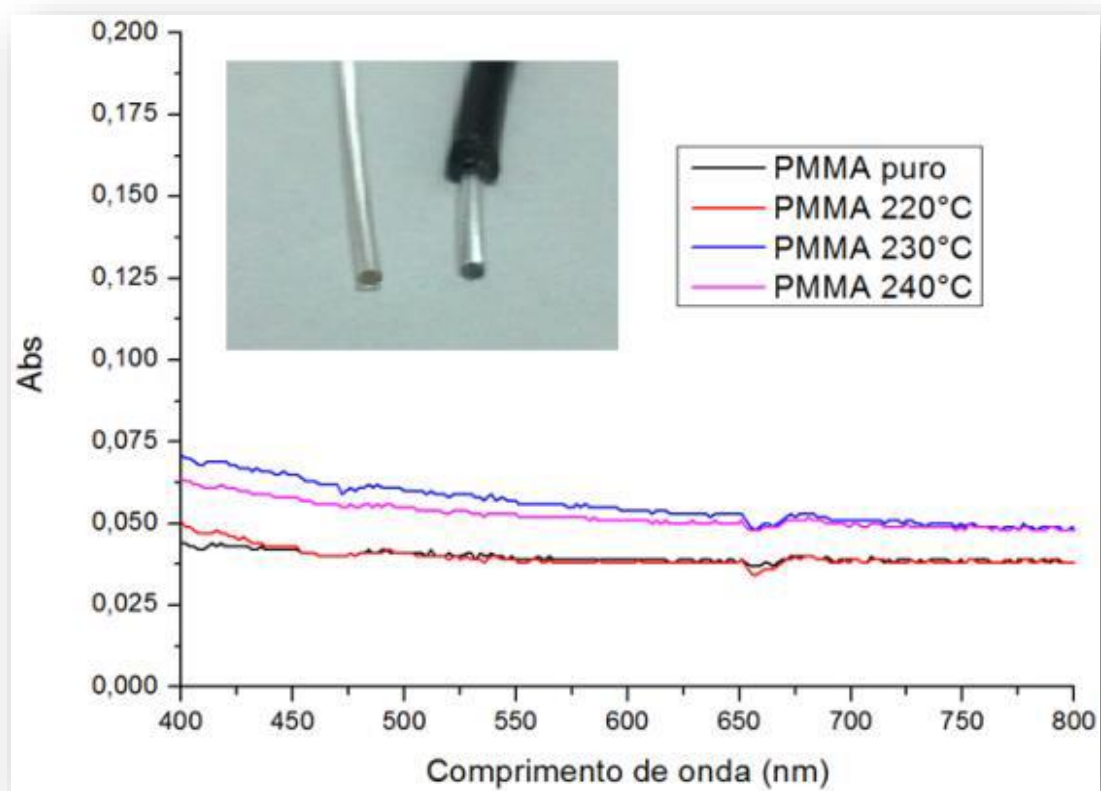


Figura – 27 : Espectro no visível do PMMA não processado e PMMA processado a 220, 230 e 240 °C.

10 CONCLUSÃO

Este estudo sobre o Processo de Reciclagem do PMMA de telas de computadores para fabricação de Fibras Ópticas Poliméricas: uma abordagem histórica e físico-química; teve a intenção de demonstrar, que é possível usar de artigos considerados lixo eletrônico, para o aproveitamento sensato para produzir fibra óptica, porém esse meio de comunicação, as fibras ópticas, são meios bastante complexos, onde demanda um estudo avançado e aprofundado.

Ao decorrer desse estudo, foi revisados os principais fundamentos, sobre a natureza da luz e seus conceitos, bem como, fibras ópticas desde o seu funcionamento, composição até as suas aplicações, bem como o breve estudo sobre polímeros enfatizando o Poli (metacrilato de metila) (PMMA), ao qual foi extraído da tela de um notebook para a fabricação de um tipo específico de fibra óptica de PMMA. Mostrando assim, o porque esse polímero se adequa em fibras ópticas.

Posteriormente foi citado a revisão do processo de fabricação e o método utilizado desde o princípio, onde foi extraído o polímero PMMA da tela até a fabricação e análise da fibra óptica de pmma oriunda do processo. Tendo como respostas das análises de caracterizações, e tratamentos térmicos que as fibras de PMMA reciclado a partir de telas de notebooks não degradaram ou modificaram o material. Isto permite então explorar o seu uso como fibra óptica para sistemas de telecomunicações e sensoriamento.

REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, Juliana Martins de Bessa; FERREIRA, Antônio Claudio. A sociedade da informação e o desafio da sucata eletrônica. **Revista de ciências exatas e tecnologia**. São Paulo, v. 3, p. 157–170. 08 dez. 2008.
- [2] Chung, S.S.;Zhang, C. **Waste Management**. 31, 2638, 2011.
- [3] Zubia, J.; Arrue, J. **OpticalFiber Technology**. 7, 101, 2001.
- [4] FAVILA,L. **Curso fibras ópticas, dispositivos fotônicos**. Unicamp. Disponível em: <https://www.ft.unicamp.br/~lfavila/TT503/Curso_Fibras_opticas_Dispositivos_Fotonicos.pdf> Acesso em: 18 de abril de 2020.
- [5] HELERBROCK, Rafael. **O que são ondas eletromagnéticas**. Brasil escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-que-sao-ondas-eletromagneticas.htm>> Acesso em: 18 de abril de 2020.
- [6] ALAMEDA. Santos. **Espectro eletromagnético**. Toda matéria. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/#:~:text=Espectro%20eletromagn%C3%A9tico%20%C3%A9%20uma%20escala,ultravioleta%2C%20raios%20x%20e%20raios%20gama>> Acesso em: 18 de abril de 2020.
- [7] FLIPSEN, T. A C. **Design, synthesis and properties of new materials based on densely crosslinked polymers for polymer optical fiber and amplifier applications**. 2000. 230 f. Dissertation (Master’s in Mathematics and Natural Sciences) – Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Groningen, Groningen, 2000.
- [8] KAO, K. C.; HOCKHAM, G. A. **Dielectric fibre surface waveguides for optical frequencies**. Proceedings of the IEEE, v. 113, p. 1151-1158, 1966.
- [9] KAPRON, F. P.; KECK, D. B.; MAURER, R. D. **Radiation losses in glass optical waveguides**. Applied Physics Letters, v. 17, p. 423, 1970.
- [10] STYLEBOY,F.H.Jonas. **Cabo óptico cfo-ddr**. Self tech (telecon e segurança eletrônica). Disponível em : <http://www.fibraoptica.ind.br/conteudo/cabo-optico-cfoa-ddr.html> Acesso em: 5 de maio de 2020.
- [11] CAO, Yashimotto. **Funcionamento de uma fibra óptica e Equações de Maxwell**. PUC-RJ(revista digital N°0014235/CA). Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5261/5261_3.PDF Acesso em : 5 de maio de 2020.
- [12] COELHO, Josemir Santos. **Componentes e sistemas de comunicação e sensoriamento a fibras ópticas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas - PEA Av. Prof. Luciano Gualberto, Travessa 3, No.158 Butantã - São Paulo - SP. Disponível em: <

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2273336/mod_resource/content/1/PEA-5716%20-%20Aula%2002%202016.pdf> Acesso em :18 de agosto de 2020.

[13] BARROS, Walesca Barbosa. Introdução a fibras ópticas, Atuação e Dispersão. CBPF. Disponível em < http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/nt01103.2010_10_06_11_31_02.pdf> Acesso em: 18 de agosto de 2020.

[14] FONSECA, Daniel Segura. **Estudos preliminares da preparação de fibras ópticas plásticas e híbridos orgânicos-inorgânicos luminescentes a partir de poli(metacrilato de metila) comercial.** Unesp (repositório). Disponível em :< https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 21 de agosto de 2020.

[15] EMSLIE, C. **Review polymer optical fibers.** *Journal of Materials Science*, v. 23, p. 2281-2293, 1988. Unesp (repositório). Disponível em :< https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 21 de agosto de 2020.

[16] FLIPSEN, T. A C. **Design, synthesis and properties of new materials based on densely crosslinked polymers for polymer optical fiber and amplifier applications. 2000. 230 f. Dissertation (Master's in Mathematics and Natural Sciences) – Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Groningen, Groningen, 2000.** Unesp (repositório). Disponível em :< https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 21 de agosto de 2020.

[17] TAKEDA, N.; KOSAKA, T. **Smart composites III. Smart sensor materials and technologies.** *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, v. 22, n. 6, p. 203-207, 1996. Unesp (repositório). Disponível em :< https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 21 de agosto de 2020.

[18] NALWA, H. S. **Polymer optical fibers.** New York: American Scientific, 2004. 300 p. Unesp (repositório). Disponível em :< https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 21 de agosto de 2020.

[19] VARGAS, Jennifer Fogaça. **Polímeros e suas propriedades.** Manual da Química (2018). Disponível em: < <https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/o-que-sao-os-polimeros.htm>> Acesso em 30 de agosto de 2020.

[20] MÜLHAUPT, R. **Hermann Staudinger and the origin of macromolecular chemistry.** *Angewandte Chemie International Edition*, v. 43, n. 9, p. 1054-1063, 2004. Unesp (repositório). Disponível em :< https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 30 de agosto de 2020.

[21] HERMES, M. E. **Enough for one lifetime: Wallace Carothers, inventor of nylon**. Philadelphia: Chemical Heritage Foundation, 1996. 345 p Unesp (repositório). Disponível em :<
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 5 de setembro de 2020.

[22] CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Carlos: Artliber, 2002. 280 p. Unesp (repositório). Disponível em :<
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 5 de setembro de 2020.

[23] ZOPPI, R. A.; PAOLI, M. A. de. **Aplicações tecnológicas de polímeros intrinsecamente condutores: perspectivas atuais**. Química Nova, v. 16, n. 6, p. 560-569, 1993. Unesp (repositório). Disponível em :<
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 5 de setembro de 2020.

[24] RUDIN, A. **The elements of polymer science and engineering**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1982. 509 p. Unesp (repositório). Disponível em :<
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 5 de

[25] SPERLING, L. H. **Introduction to physical polymer science**. 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 845 p. Unesp (repositório). Disponível em :<
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1> Acesso em 5 de setembro de 2020.

[26] LUCAS, E.F., et al, **Caracterização de Polímeros : Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica**, Ed. E-Papers, Rio de Janeiro, 2001. Unicamp (repositório). Disponível em:<
http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/266858/1/Melo_DeniseFurigode_M.pdf>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[27] PADILHA, A.F., FILHO, F.A., **Técnicas de Análise Micro Estrutural**, Ed. Hemus, 2004. Disponível em:<
http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/266858/1/Melo_DeniseFurigode_M.pdf>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[28] CANEVAROLO, S.V., **Técnicas de Caracterização de Polímeros**, Ed. Artliber, 2004. Disponível em:<
http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/266858/1/Melo_DeniseFurigode_M.pdf>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[29] BRISTON, J. H.; MILES, D. C. **Tecnologia dos polímeros**. São Paulo: Polígono, 1975. 572 p. UNESP (repositório) Disponível em :<

https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[30] JORDÃO JUNIOR, A.; ROMÃO, E. **Implante de lente intra-ocular dobrável acrílica em crianças**. Arquivos Brasileiros de Oftalmologia, v. 63, n. 2, p. 115-118, 2000. Disponível em :<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[31] GRANADO, R. M. **Avaliação da integridade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA) no torneamento com ferramenta de diamante**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. UNESP (Repositório)
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[32] GIACON, V. M. **Modificação da superfície de filmes de PMMA via polimerização por plasma de CHF₃**. 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. UNESP (Repositório)
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[33] GIACON, V. M.; BARTOLI, J. R.; CARREÑO, M. N. P. **Guia de onda polimérico a base de PMMA modificado com plasma**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. Anais ... São Paulo: IPEN, 2006. v. 1, p. 8568-8578. UNESP (Repositório)
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[34] MA, S.; ZHONG, L.; WANG, P.; XU, C. **A fast way to fabricate polymethyl methacrylate for graded-index polymer optical fibers**. Polymer-Plastics Technology and Engineering, v. 45, p. 373-378. 2006. UNESP (Repositório)
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[35] NALWA, H. S. Polymer optical fibers. New York: American Scientific, 2004. 300 p. UNESP (Repositório)
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97883/segura_df_me_araiq.pdf;jsessionid=4BC0FEDE886C002DE071AB3DC2A900AF?sequence=1>. Acesso em 15 de setembro de 2020.

[35] PETTER, Junior Gonçalves. **Telas de LCD e LED, estrutura e composição**. BRING IT; julho de 2020. Disponível em : <https://www.bringit.com.br/blog/dicas-e-tutoriais-para-notebook/diferenca-tela-lcd-led-ccfl/>. Acesso em 12 de outubro de 2020.

- [36] MUELLER, J. R.; BOEHM, M. W.; DRUMMOND, C. Direction of CRT waste glass processing: Electronics recycling. **Waste Management**, v. 32, p. 1560- 1565, 2012.
- [37] RYAN, A.; DONOGHUE, L. O.; LEWIS, H. Characterising components of liquid crystal displays to facilitate disassembly. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1066-1071, 2011.
- [38] FRANKE, C.; KERNBAUM, S.; SELIGER, G. Remanufacturing of flat screen monitors. Grenoble: Springer, 2006. p. 139-152.
- [39] MA, J.; YE, X.; JIN, B. Structure and application of polarizer film for thin-film- transistor liquid crystal displays. **Displays** , v. 32, p. 49-57, 2011.
- [40] OLIVEIRA, C. R. **Alternativas tecnológicas para o tratamento e reciclagem do lixo de informática**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 65. 2010.
- [41] BALART, R.; LÓPEZ, J.; GARCÍA, D.; SALVADOR, M. D. Recycling of ABS and PC from electrical and electronic waste. Effect of miscibility and previous degradation on final performance of industrial blends. **European Polymer Journal.**, v. 41, p. 2150-2160, 2005.
- [42] LI, J.; GAO, S.; DUAN, H.; LIU, L. Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel. **Waste Management** , n. 29, p. 2033-2039, 2009.
- [43] JUCHNESKI, N. C. F.; SCHERER, J.; GROCHAU, I. H.; VEIT, M. H. Disassembly and characterization of liquid crystal screens. **Waste Management & Research**, v. 31, p. 549-558, 2013.
- [44] BECKER, W.; SIMON-HETTICH, B.; HÖNICKE, P. **Toxicological and Ecotoxicological Investigations of Liquid Crystals and Disposal of LCDs**. LSP Division (formerly at Waste Management Department)-MERCK. [S.l.], p. 16. 2003.
- [45] TAVARES, V. **Caracterização e processamento de telas de cristal líquido visando a reciclagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 105. 2006.
- [46] WANG, X.; LU, X.; ZHANG, S. Pyrolytic and kinetic characteristics of waste glass substrate from liquid crystal display panels. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, p. In press, 2012.
- [47] OLIVEIRA, C. R. **Alternativas tecnológicas para o tratamento e reciclagem do lixo de informática**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 65. 2010.
- [48] HARPER, Charles A; PETRIE Edward M. **Plastics Materials and Process: A Concise Encyclopedia**. Hoboken: John Wiley& Sons, Inc, 2003. Disponível em :<<https://www.tudosobreplasticos.com/processo/extrusao.asp>> Acesso em: 15 de outubro de 2020.
- [49] ENROKY, Fonsy. **Thermo Scientific HAAKE-miniCTW** . DIRECT INDUSTRY.

Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/thermo-scientific-environmental-and-process/product-23500-1261621.html>> Acesso em : 15 de outubro de 2020.

[50] Leite, S. T.1; Prado, A. R.2,3; Ribeiro, M. R.3; Pontes, M. J.3; Machado, L. C.5; Borges, A. S.4; Sena, G. L.5.. **Reciclagem de polímero para aplicação em telecomunicações.**1Graduação em Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil ; 2 Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, ES, Brasil; 3Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil; 4 Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil; 5 Departamento de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.