

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)**

ANDERSON DIOGO SPACEK

**DESENVOLVIMENTO DE TUBOS SOLARES APLICADOS EM ILUMINAÇÃO DE
INTERIORES A PARTIR DE MATERIAIS POLIMÉRICOS METALIZADOS**

Porto Alegre

2017

ANDERSON DIOGO SPACEK

DESENVOLVIMENTO DE TUBOS SOLARES APLICADOS EM ILUMINAÇÃO DE INTERIORES A PARTIR DE MATERIAIS POLIMÉRICOS METALIZADOS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade acadêmica. Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti

Coorientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior

Porto Alegre

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Afonso Reguly

ANDERSON DIOGO SPACEK

DESENVOLVIMENTO DE TUBOS SOLARES APLICADOS EM ILUMINAÇÃO DE INTERIORES A PARTIR DE MATERIAIS POLIMÉRICOS METALIZADOS

Esta Tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovado em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Orientadora: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti

Coorientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Canal Marques (Dr.) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Prof. Hugo Marcelo Veit (Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Jean-Marc Stephane Lafay (Dr.) – Universidade Tecnológica Fed. do PR (UTFPR)

Prof. Jovani Castelan (Dr.) – Associação Benef. da Ind. Carbonífera de SC (SATC)

Dedico este trabalho aos meus pais pelo incentivo e por terem me feito compreender a importância do conhecimento. A minha esposa pelo incentivo e compreensão, ao meu irmão e minha cunhada por serem o socorro nas horas difíceis deste caminho. Por fim, dedico este principalmente à minha filha por ser a minha inspiração diária.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa. Muitas foram as pessoas que fizeram parte deste trabalho para as quais gostaria neste momento de deixar meus agradecimentos. Primeiramente gostaria de agradecer à BAESA (Energética Barra Grande S.A.) e a ENERCAN (Campos Novos Energia S.A.) representadas pelo gerente de projetos, Sr. Marcus Vinícius Ferreira de Santana que aportaram os recursos para execução do projeto que culminou no desenvolvimento desta tese. À orientadora professora Dra. Célia de Fraga Malfatti e ao coorientador professor Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior, pelo valioso auxílio durante a realização do doutorado. Agradeço também à Faculdade SATC através do diretor Prof. Me. Carlos Antônio Ferreira, do coordenador de curso Prof. Dr. João Mota Neto e do coordenador de pesquisa Prof. Dr. Luciano Dagostin Biléssimo, pelo apoio, incentivo, disponibilização de infraestrutura e compreensão por algumas ausências exigidas durante esse processo. Ao Me. Agonir Wenginowics da empresa Nanoplas Precision Machini pelo auxílio em relação aos processos de metalização a vácuo das amostras e dos tubos reflexivos. Ao graduando e bolsista Marco Aurélio de Oliveira Rocha pelo grande auxílio no desenvolvimento de vários desenhos apresentados no trabalho. Por fim, gostaria de agradecer a todos familiares, amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para o sucesso no cumprimento desta etapa.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.” (Henry Ford)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver sistemas tubulares de condução de luz natural propondo a substituição do alumínio revestido com prata (que é o sistema comercializado atualmente por diversas empresas internacionais), por polímero metalizado. Espera-se com isso diversificar os materiais empregados na fabricação destes dispositivos reduzindo significativamente o custo. Os sistemas tubulares de condução de luz natural permitem o aproveitamento da luz solar para iluminação de interiores, contribuindo para a redução do consumo de energia elétrica. No presente estudo foram avaliados como material estrutural os polímeros (PP, PS, PEAD, PEBD, ABS nas condições virgem e reciclada), revestidos com alumínio e cromo e submetidos à metalização por evaporação no vácuo (*ion plating*) ou por projeção catódica (*sputtering*). Os materiais poliméricos foram caracterizados quanto sua resistência mecânica através de ensaios de tração (norma ASTM D638). Os revestimentos de alumínio e cromo depositados nos materiais poliméricos, foram caracterizados quanto à adesão (norma ASTM D3359-09) e quanto à reflexividade (norma ASTM E903). Essas propriedades foram avaliadas comparativamente ao material empregado em um sistema tubular de condução de luz natural comercial (referência). Os resultados obtidos dos ensaios realizados, demonstraram que os melhores sistemas obtidos foram o PP reciclado metalizado com alumínio pelo processo de projeção catódica, e também ABS e PS virgem metalizados com alumínio pelo processo de evaporação no vácuo. Para a validação em escala real, foram elaborados: um protótipo de PP reciclado metalizado com alumínio pelo processo de projeção catódica e um protótipo de ABS virgem metalizado com alumínio pelo processo de evaporação no vácuo. Enquanto, o tubo protótipo de ABS virgem metalizado com alumínio chegou em média diária a atingir 65% do rendimento comparado com o tubo referência, o PP reciclado metalizado com alumínio pelo processo de projeção catódica chegou apenas a 21%. Isso evidenciou a viabilidade técnica de construção de um tubo para condução da luz solar direta para iluminação utilizando ABS virgem metalizado com alumínio com rendimento de 65% do tubo de referência, o qual pode ser comercializado uma redução de custo estimado de 46,5% em relação a referência.

Palavras chaves: Sistemas tubulares de iluminação natural. Polímeros. Metalização à vácuo.

ABSTRACT

This paper aims to develop tubular daylight systems for transporting natural light by substituting silver coated aluminum (which is the system currently supplied by several international companies), for metalized polymer. This is expected to diversify the materials used in the manufacturing of those tubular devices, significantly reducing their cost. The tubular systems for conducting natural light enable to maximize the use of natural daylight for interior lighting, minimizing the consumption of electric energy. In this study some polymers (virgin and recycled PP, PS, HDPE, LDPE, and ABS) aluminum or chromium coated were evaluated as structural material. The coating were obtained metallization by vacuum evaporation (ion plating) or by cathodic projection (sputtering). The polymeric materials were evaluated for their mechanical resistance through tensile tests (American Society for Testing and Materials - ASTM D638 standard). The aluminum and chromium coatings deposited on polymeric materials were evaluated for their adhesion (ASTM D3359-09) and for their reflectivity (ASTM E903). These properties were measured comparatively to the material commonly used in a commercial tubular daylight conducting system (reference). The tests results showed that the best systems were the recycled PP metalized with aluminum by the cathodic projection process, and also virgin ABS and virgin PS metalized with aluminum by the vacuum evaporation process. For the real-scale validation, a prototype of recycled PP metalized with aluminum by the cathodic projection process and a prototype of virgin ABS metalized with aluminum by the vacuum evaporation process were made. While the prototype made with virgin ABS metalized with aluminum attained an average daily efficiency of 65% compared to the reference tube, the prototype made with recycled PP metalized with aluminum by the cathodic projection process attained only 21%. Thus, these results demonstrate the technical feasibility of producing a tubular direct daylight conducting system using virgin ABS metalized with aluminum with an efficiency of 65% of the reference tube at an estimated cost 46.5% lower than the reference tube.

Keywords: Tubular systems for natural lighting. Polymers. Vacuum metalization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico demonstrativo da capacidade instalada de energia elétrica.....	26
Figura 2 – Gráfico demonstrativo da capacidade instalada de fontes alternativas	27
Figura 3 – Espectro eletromagnético	28
Figura 4 – Curva internacional de luminosidade espectral relativa (CIE)	29
Figura 5 – Reflexão especular (a) versus reflexão difusa (b)	33
Figura 6 – Distribuição das luminárias no ambiente	37
Figura 7 – Interação da energia solar com a atmosfera	39
Figura 8 – Radiação global, direta e difusa	39
Figura 9 – Espectro da radiação solar incidente na terra	40
Figura 10 – Espessura da atmosfera em relação a inclinação do sol	40
Figura 11 – Definição de latitude	41
Figura 12 – Variação anual da declinação solar	42
Figura 13 – Instrumentos solarimétricos – (a) piranômetros (b) piroheliômetro	42
Figura 14 – Mapa da irradiação solar direta no mundo	43
Figura 15 – Mapa da irradiação solar direta no Brasil	44
Figura 16 – Região Sul do Brasil e quantidade de estações meteorológicas do INMET	44
Figura 17 – Radiação solar média anual – Paraná (ano de 2015).....	45
Figura 18 – Radiação solar média anual – Santa Catarina (ano de 2015).....	45
Figura 19 – Radiação solar média anual – Rio Grande do Sul (ano de 2015).....	46
Figura 20 – Modelos de céu	47
Figura 21 – Energia solar fotovoltaica (a) e energia solar fototérmica (b).....	48
Figura 22 – Eficiência luminosa de fontes de luz natural e artificial	48
Figura 23 – Iluminação natural.....	49
Figura 24 – Redução da luz em função da distância das janelas	49
Figura 25 – Sistema de captação solar baseado em tubos de luz	50
Figura 26 – Sistema de iluminação natural tubular	54
Figura 27 – Domo SOLATUBE.....	54
Figura 28 – Tubo reflexivo SOLATUBE	55
Figura 29 – Difusor SOLATUBE.....	55
Figura 30 – Sistema proposto de iluminação por tubo duplo	56
Figura 31 – Sistema proposto de iluminação multinível	57

Figura 32 – Sistema proposto de iluminação retangular	57
Figura 33 – Sistema proposto de iluminação retangular	58
Figura 34 – Ranking mundial de produção de polímeros em 2013.....	61
Figura 35 – Aplicações dos polímeros por tipo em 2012	61
Figura 36 – Principais setores da economia consumidores de polímeros	62
Figura 37 – (a) Cadeia sem ramificação (b) Cadeia com ramificações (c) Cadeia reticulada .	63
Figura 38 – Fluxograma do processo de execução do trabalho.....	67
Figura 39 – SOLATUBE modelo 160DS (Referência).....	68
Figura 40 – Matérias primas (virgens e recicladas).....	70
Figura 41 – Princípio da reflexão aplicada a proposta	71
Figura 42 – Equipamento para metalização a vácuo (projeção catódica)	72
Figura 43 – Fluxograma de execução dos ensaios preliminares	75
Figura 44 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração (ASTM D638).....	76
Figura 45 – (A) Modelagem da matriz (B) Matriz usinada.....	77
Figura 46 – Injetora PAVAN ZENETTI modelo NFN 150P com a matriz produzida	77
Figura 47 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-310	78
Figura 48 – Microscópio eletrônico Olympus modelo BX5M.....	79
Figura 49 – Amostras para ensaio de reflexão	81
Figura 50 – Desenho das peças (partes) do tubo do protótipo.....	82
Figura 51 – Matriz para injeção das peças do tubo	82
Figura 52 – Tubos reflexivos finalizados	83
Figura 53 – Ambiente de validação e suas características.....	83
Figura 54 – Ambiente de validação com os protótipos instalados	84
Figura 55 – Disposição dos luxímetros nas salas de validação	85
Figura 56 – Corpos de prova injetados (materiais virgens e reciclados).....	86
Figura 57 – Amostras metalizadas com cromo (materiais virgens)	90
Figura 58 – Amostras metalizadas com cromo (materiais reciclados).....	90
Figura 59 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais virgens)	91
Figura 60 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais reciclados).....	91
Figura 61 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo (materiais virgens).....	92
Figura 62 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo (materiais reciclados)	92
Figura 63 – Superfície das amostras metalizadas: Alumínio (materiais virgens)	93
Figura 64 – Superfície das amostras metalizadas: Alumínio (materiais reciclados).....	93
Figura 65 – Amostras metalizadas com cromo (materiais virgens)	94

Figura 66 – Amostras metalizadas com cromo (materiais reciclados).....	94
Figura 67 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais virgens)	95
Figura 68 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais reciclados).....	95
Figura 69 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo com verniz (materiais virgens).....	95
Figura 70 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo com verniz (materiais reciclados) .	96
Figura 71 – Superfície das amostras metalizadas: Alumínio com verniz (materiais virgens) .	96
Figura 72 – Superfície amostras metalizadas: Alumínio com verniz (materiais reciclados) ...	97
Figura 73 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais virgens)	98
Figura 74 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais reciclados).....	98
Figura 75 – Superfície amostras metalizadas: Alumínio (materiais virgens).....	99
Figura 76 – Superfície amostras metalizadas: Alumínio (materiais reciclados)	99
Figura 77 – Ensaio de adesão (materiais metalizados por projeção catódica)	101
Figura 78 – Ensaio de adesão (materiais metalização por evaporação no vácuo).....	102
Figura 79 – Ensaio de reflexão (Amostra referência).....	104
Figura 80 – Ensaio de reflexão (PP reciclado – projeção catódica).....	105
Figura 81 – Ensaio de reflexão (ABS virgem – evaporação no vácuo)	107
Figura 82 – Ensaio de reflexão (PS virgem – evaporação no vácuo).....	108
Figura 83 – Ensaio de reflexão (PP reciclado – evaporação no vácuo)	109
Figura 84 – Iluminamento dos ambientes (Referência x Protótipo – PP reciclado).....	113
Figura 85 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala protótipo)	114
Figura 86 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala referência).....	114
Figura 87 – Iluminamento dos ambientes (Referência x Protótipo – ABS virgem).....	115
Figura 88 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala protótipo)	116
Figura 89 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala referência).....	116
Figura 90 – Protótipo da luminária gerando luz (Sala do protótipo: ABS virgem).....	117
Figura 91 – Iluminamento dos ambientes (Referência x Protótipo PP x ABS)	118
Figura 92 – Dados técnico lâmpada LED OSRAM modelo CLASSIC A60	119
Figura 93 – Potência de luz natural x Potência de luz artificial - Referência.....	120
Figura 94 – Potência de luz natural x Potência de luz artificial – ABS virgem	120
Figura 95 – Potência de luz natural x Potência de luz artificial – PP reciclado	120
Figura 96 – Potência complementar para 300 lux (Sala referência).....	121
Figura 97 – Potência complementar para 300 lux (Sala ABS virgem)	122
Figura 98 – Potência complementar para 300 lux (Sala PP reciclado)	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil e no mundo (GW)	26
Tabela 2 – Fator de utilização do recinto (tabela parcial)	36
Tabela 3 – Energia solar anual média na superfície da terra em relação a latitude	41
Tabela 4 – Composição dos tubos solares comercializados atualmente	52
Tabela 5 – Trabalhos publicados sobre iluminação natural tubular	58
Tabela 6 – Materiais poliméricos, suas características e aplicações	62
Tabela 7 – Valores da temperatura de fusão e vítrea dos principais polímeros	64
Tabela 8 – Especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante (tubo reflexivo).....	68
Tabela 9 – Parâmetros da metalização (projeção catódica).....	72
Tabela 10 – Parâmetros da metalização por de posição iônica (evaporação no vácuo).....	73
Tabela 11 – Contrações sofridas pelos corpos de provas produzidos	87
Tabela 12 – Resultados ensaios em todos os corpos de prova (média).....	89
Tabela 13 – Amostras selecionadas para ensaios de adesão	100
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de adesão (projeção catódica)	101
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de adesão (evaporação no vácuo)	103
Tabela 16 – Amostras selecionadas para ensaios de reflexão	104
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de reflexão (PP reciclado – projeção catódica).....	106
Tabela 18 – Resultados do ensaio de reflexão (ABS virgem – evaporação no vácuo)	107
Tabela 19 – Resultados do ensaio de reflexão (PS virgem – evaporação no vácuo)	108
Tabela 20 – Resultados do ensaio de reflexão (PP reciclado – evaporação no vácuo)	109
Tabela 21 – Rugosidades (Ra) nos corpos de prova metalizados por projeção catódica	110
Tabela 22 – Rugosidades (Ra) nos corpos de prova metalizados por evaporação no vácuo .	111
Tabela 23 – Materiais selecionados para validação e suas características	112
Tabela 24 – Iluminamento médio dos ambientes (Protótipo x Referência – PP reciclado) ...	112
Tabela 25 – Iluminamento dos ambientes (Protótipo x Referência – ABS virgem)	115
Tabela 26 – Fluxo luminoso total gerado por dia (médio)	118
Tabela 27 – Potência complementar para 300 lux (Sala referência)	121
Tabela 28 – Potência complementar para 300 lux (Sala ABS virgem)	122
Tabela 29 – Potência complementar para 300 lux (PP reciclado).....	123
Tabela 30 – Custos estimados para montagem do protótipo	124
Tabela 31 – Dados técnicos do protótipo desenvolvido	125

Tabela 32 – Relação de periódicos já publicados sobre o tema abordado	130
---	-----

LISTA DE SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAESA	Energética Barra Grande S/A
CIE	<i>Comission Internationale de l'Eclairage</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ENERCAN	Campos Novos Energia S/A
EPE	Empresa de pesquisa Energética
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
IRC	Índice de reprodução de cor
LACAMI	Laboratório de Caracterização Microestrutural
NBR	Norma Brasileira
NEMAF	Núcleo de Ensaios de Materiais e Análise de Falha
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SI	Sistema Internacional de Unidades
TDD	<i>Tubular Daylighting Device</i>
TDGS	<i>Tubular Daylighting Guidance Device</i>
UGR	<i>Unified Glare Rating</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de Onda
ψ	Fluxo Luminoso
η	Eficiência Luminosa;
I	Intensidade Luminosa;
E	Iluminância ou Iluminamento;
S	Área do Recinto;
Fu	Fator de Utilização do Recinto;
Fdl	Fator de Depreciação do Serviço da Luminária;
A	Comprimento do Recinto;
B	Largura do Recinto;
X e Y	Distância entre as Luminárias;
K	Índice de utilização do Recinto;
Hlp	Altura do Ponto de Luz ao Plano de Trabalho;
Nlu	Número de Luminárias;
Nla	Número de Lâmpadas por Luminária;
Ψ_t	Fluxo Luminoso Total;
Ψ_l	Fluxo Luminoso da lâmpada;
φ	Fluxo Luminoso incidente;
φ_r	Fluxo Luminoso refletido;
φ_t	Fluxo Luminoso transmitido;
φ_a	Fluxo Luminoso absorvido;
ρ	Fator de Reflexão da Luz;
τ	Fator de Transmissão da Luz;
α	Fator Absorção da Luz;
θ	Ângulo Zenital;
δ	Declinação Solar;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVO GERAL	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.3	CONTRIBUIÇÕES, RELEVÂNCIA E INEDITISMO.....	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO	25
2.2	PRINCÍPIOS GERAIS DA LUZ	28
2.2.1	Fluxo luminoso	30
2.2.2	Eficácia e eficiência luminosa	30
2.2.3	Intensidade luminosa	30
2.2.4	Iluminância ou iluminamento	31
2.2.5	Ofuscamento	31
2.2.6	Índice de reprodução de cor	31
2.2.7	Reflexão, transmissão e absorção da luz	32
2.2.7.1	<i>Reflexão da luz</i>	32
2.2.7.2	<i>Transmissão da luz</i>	33
2.2.7.3	<i>Absorção da luz</i>	34
2.3	Projetos de iluminação de interiores	35
2.4	ENERGIA SOLAR	38
2.4.1	Irradiação solar	42
2.4.2	Luz natural	46
2.4.3	Aplicações da energia solar	47
2.5	ESTADO DA ARTE DE ILUMINAÇÃO NATURAL TUBULAR	52
2.5.1	Sistema de iluminação tubular comercial	53
2.5.2	Pesquisas Recentes	56
2.6	MATERIAIS POLIMÉRICOS	60
2.7	METALIZAÇÃO DE POLÍMEROS	64
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	67
3.1	METODOLOGIA APLICADA	67
3.2	ETAPA 01 – PROBLEMATIZAÇÃO.....	67
3.3	ETAPA 02 – DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS E DOS MATERIAIS	69
3.3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	69

3.3.1.1	<i>Materiais: Parte estrutural</i>	69
3.3.1.2	<i>Materiais: Parte reflexiva</i>	70
3.3.2	DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS	73
3.4	ETAPA 03 – ENSAIOS PRELIMINARES	74
3.4.1	Ensaio de tração	76
3.4.2	Medição de rugosidade	78
3.4.3	Microscopia ótica	79
3.4.4	Ensaio de adesão	79
3.4.5	Ensaio de reflexão	80
3.5	ETAPA 04 – CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS	81
3.6	ETAPA 05 – VALIDAÇÃO	83
3.6.1	Metodologia de validação	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	86
4.1	Resultados dos ensaios de tração	86
4.2	Resultados das metalizações	90
4.2.1	Metalizações por projeção catódica	90
4.2.2	Metalizações por evaporação no vácuo	98
4.3	Resultados dos ensaios de adesão	100
4.3.1	Ensaio de adesão: Amostras metalizadas por projeção catódica	101
4.3.2	Ensaio de adesão: Amostras metalizadas evaporação no vácuo	102
4.4	Resultados dos ensaios de reflexão	103
4.4.1	Ensaio de reflexão: Amostras metalizadas por projeção catódica	105
4.4.2	Ensaio de reflexão: Amostras metalizadas por evaporação no vácuo	107
4.4.3	Ensaio de Rugosidade	110
4.5	Resultados das validações	111
4.5.1	Validação: Tubo de PP reciclado metalizado (Al) por projeção catódica	112
4.5.2	Validação: Tubo de ABS virgem (Al) metalizado evaporação no vácuo	114
4.5.3	Análise comparativa do rendimento	117
4.5.4	Resultados finais	124
5	CONCLUSÃO	127
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
7	PRODUÇÃO CIENTÍFICA	130
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

1 INTRODUÇÃO

Ações para ampliação da oferta de energia elétrica nos últimos anos têm sido tomadas a nível mundial para suprir a crescente demanda. Porém, estas ações geralmente demandam investimentos elevados, grande mobilização de infraestrutura e geram muitos impactos ambientais. Faz-se necessário, portanto, a tomada de ações sustentáveis, menos onerosas e com efeitos mais rápidos que permitam a otimização do uso da energia elétrica aumentando em curto prazo a oferta de energia elétrica. Estas ações passam pela otimização da eficiência dos equipamentos inseridos nos sistemas de geração, transmissão, distribuição e consumo permitindo assim uma redução do uso de energia elétrica causada pelo melhor aproveitamento da energia consumida (GOLDEMBERG; LUCON, 2012). Outra forma de se reduzir o consumo de energia elétrica com potencial de aplicabilidade em larga escala e que tem sido abordada ainda de forma muito “tímida” é o aproveitamento das energias naturais (térmica, solar, vento, água, etc.) de forma direta, como por exemplo, o uso da energia solar para aquecimento de água e a captação da luz solar para iluminação de ambientes (BOCCIA; CHELLA; ZAZZINI, 2014; SHUKLA *et al.*, 2013).

Em termos de luz solar, o Brasil se encontra em uma posição geográfica favorável apresentando incidência solar superior à maioria da Europa onde este tipo de energia é explorada com grande intensidade à alguns anos. A Alemanha por exemplo, que destaca-se no uso da energia solar para geração de energia elétrica, apresenta índices de radiação 40% menor que a pior região brasileira neste quesito, indicando um grande potencial a ser explorado nacionalmente (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013). Além disso, algumas regiões do nordeste brasileiro atingem índices de radiação solar de cerca de 19,7 MJ/m².dia, valores estes próximos aos obtidos na cidade de Dongola localizada no deserto do Sudão que apresenta um dos maiores índices de radiação solar do planeta por ser uma região desértica, oferecendo uma radiação anual de 23,8 MJ/m².dia (TIBA, 2000).

Estes dados demonstram a necessidade, viabilidade, e motivam o desenvolvimento de pesquisas para captação da energia solar de forma direta para a iluminação, que segundo estudos apontam, corresponde a 44% consumo de energia elétrica dos setores comerciais e públicos, condizente com a realidade nacional (GHISI; TINKER, 2008). Mundialmente, a busca por novas fontes de energia limpas e inesgotáveis é constante, destacando-se a captação da luz solar para iluminação por ser um bem inesgotável, limpo e de acesso a todos. Assim, sabe-se que investir na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento deste

tipo de energia, significa otimizar o uso da energia elétrica permitindo a curto prazo contribuir para a redução de investimentos em construção e manutenção de usinas, minimizando impactos ambientais e além disso, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas, onde o custo para eletrificação convencional é elevado (PEREIRA *et al.*, 2006).

Visando otimizar o consumo de energia elétrica existe uma tendência mundial de utilizar energias renováveis de forma direta, ou seja, sem conversão. Dentro desse contexto estão os chamados sistemas de orientação solar, *Tubular Daylighting Device (TDD)* ou ainda *Tubular Daylight Guidance System (TDGS)*, responsáveis por conduzir a luz natural captada externamente para dentro de ambientes a serem iluminados. Os sistemas tubulares de condução de luz natural (tubos reflexivos) permitem o aproveitamento da luz solar para iluminação de interiores, contribuindo para a redução do consumo de energia elétrica.

Os tubos reflexivos, são os grandes responsáveis pela condução da luz captada na cúpula até o interior do ambiente, usando para isso os princípios físicos ópticos da reflexão. Os tubos reflexivos, também conhecidos como tubos de luz, tem capacidade comprovada para condução da luz solar em distâncias médias, inclusive em instalações que apresentam curvas nos tubos. Dentro das aplicações existentes, é possível mencionar o uso para iluminação de túneis, construções multinível, dentre outras (GARCIA-HANSEN; EDMONDS, 2015; GIL-MARTÍN *et al.*, 2014)

Esses sistemas são comercializados por diversas empresas internacionais em estrutura de alumínio revestido com prata de alta pureza, o que eleva o custo dos mesmos e torna restrito o acesso ao dispositivo, ainda que a fonte de energia seja renovável e abundante.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema tubular de condução de luz natural (um tubo reflexivo), propondo a substituição do alumínio com prata, por polímeros metalizados. Espera-se com isso diversificar os materiais empregados na fabricação desses dispositivos reduzindo significativamente o custo e contribuindo para a ampliação do uso destes. Isso deverá ter impacto sobre a sustentabilidade energética e melhoria da eficiência energética no Brasil. A proposta ainda contribui com a mitigação das perdas no sistema elétrico nacional por possibilitar a implantação em comunidades isoladas e áreas de grande complexidade social. A proposta de fabricação de tubos reflexivos de mais baixo custo também poderá beneficiar diretamente as comunidades carentes melhorando a qualidade de vida das pessoas promovendo a inclusão social.

O presente trabalho está dividido em: Fundamentação Teórica que traz uma revisão bibliográfica sobre o panorama da geração de energia elétrica no Brasil e no mundo; revisão sobre os princípios gerais de luz seguido posteriormente por informações sobre o

comportamento solar apresentando dados de radiação a nível de Brasil e mundo além de tecnologias de aplicação da luz solar direta. Ainda na fundamentação teórica capítulo são apresentadas informações sobre materiais poliméricos e reciclagem abordando conceitos, metodologias e dados pertinentes focados na aplicação proposta. Finaliza-se com uma revisão do estado da arte abordando tecnologias de captação da luz solar através de tubos reflexivos e seu potencial para iluminação de ambientes. No item Metodologia e Desenvolvimento Experimental é descrita a metodologia de desenvolvimento experimental cujos dados são analisados e discutidos no item Resultado e Discussão dos Resultados.

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor o conceito construtivo de um tubo reflexivo para captação da luz solar direta utilizada na iluminação de ambientes, empregando materiais poliméricos metalizados visando a redução de custos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Avaliar e selecionar materiais poliméricos com potencial de aplicabilidade na proposta;
- Avaliar revestimentos de cromo e alumínio aplicados por evaporação no vácuo e projeção catódica sobre os materiais poliméricos;
- Projetar e dimensionar e construir o protótipo de um tubo reflexivo para captação da luz solar direta empregando os materiais com melhor desempenho quanto às propriedades requeridas para aplicação;
- Realizar ensaios de validação com o protótipo de um tubo reflexivo para captação da luz solar direta com os materiais que apresentaram melhor desempenho.

1.3 CONTRIBUIÇÕES, RELEVÂNCIA E INEDITISMO

No ano de 2014, o Brasil teve um consumo de energia elétrica de 475,4TWh distribuído entre as classes residencial, industrial, comercial, rural, poder público, iluminação pública, serviço público e consumo próprio. Somente o consumo residencial atingiu aproximadamente 132 TWh em 66 milhões de lares representando um consumo médio de cerca de 2 MWh por ano em cada residência (EPE, 2015). Sabendo que 16,2% do consumo residencial refere-se a parcela de iluminação (EPE, 2014), tem-se um consumo individual por ano de aproximadamente 324kWh para iluminar o ambiente. Assumindo de forma empírica que a iluminação diurna represente apenas 30% destes 324kWh, o consumo anualizado será de 97,2kWh por unidade consumidora/ano. Por fim, considerando de forma pessimista que se o produto proposto neste trabalho tiver uma aceitação de apenas 5%, ou seja, for instalado apenas uma luminária em 3,3 milhões de lares em todo o país, o consumo evitado será de aproximadamente 320,76 GWh/ano. Este consumo evitado representaria 0,35% da energia gerada pela usina hidrelétrica de ITAIPU no ano de 2015 que segundo dados da própria empresa, gerou o montante de 89.215GWh de energia, suprimindo cerca de 15% da energia consumida no Brasil e 75% da energia consumida no Paraguai. Além da otimização do uso da energia e consequente benefícios ao sistema elétrico nacional, também se considera uma mitigação dos gases de efeito estufa emitidos pela geração de energia elétrica de alguns tipos de fontes (principalmente as de combustíveis fósseis) com a redução de CO₂ (dióxido de carbono), contribuindo para o meio ambiente e qualidade do ar.

A proposta do presente trabalho, do ponto de vista conceitual, é análoga a tecnologia de iluminação de interiores desenvolvida na Austrália em 1986, ou seja, conduzir a luz solar de fora para dentro de ambientes através do uso de tubos reflexivos. No entanto, enquanto a tecnologia difundida a nível internacional e comercializada por diversos fabricantes utilizam os mesmos materiais (alumínio metalizado com prata de alta pureza) tornando o produto inviável para a maioria da população nacional, nesta proposta busca-se utilizar o polímero metalizado com cromo ou alumínio, visando a minimização do custo garantindo o acesso a uma fração maior da população. Dessa forma, a ampliação do uso da tecnologia poderá também impactar sobre a redução do consumo de energia elétrica no Brasil.

A contribuição da proposta discutida neste trabalho para o setor elétrico é de fato importante e agrega originalidade, sendo ela inclusive parte integrante de um projeto de pesquisa fomentado pelas empresas do ramo de energia elétrica BAESA (Energética Barra

Grande S.A.) e ENERCAN (Campos Novos Energia S.A) sendo executado pela Faculdade SATC (Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina), em atendimento ao programa de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) regulado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O projeto intitulado “Nacionalização da Tecnologia de Captação da Luz Solar e Desenvolvimento de Sistema Híbrido Controlado (Solar e Fotovoltaico) para Iluminação de Ambientes através de Luminária Híbrida (Difusor e LED)” é alvo de depósito de patente no INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual) sob o número BR1020170133362, de modo a preservar a ideia e a pesquisa realizada para possível posterior comercialização.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos e definições para a consolidação dos conhecimentos aplicados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

2.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO

Com a crescente evolução tecnológica das últimas décadas associada às mudanças de hábitos de consumo energético da população mundial, tem-se o crescimento exponencial do consumo e dependência da energia elétrica pela sociedade moderna (LEITE, 2007). O crescimento do consumo de energia elétrica tem forçado os países e seus respectivos governantes a tomarem ações emergenciais e investirem para aumentar a oferta de energia suprimindo a demanda necessária. Fato este que, nos últimos anos tem sido agravado, devido às mudanças climáticas e possível esgotamento dos recursos energéticos fósseis, dando origem a busca por novas fontes de energia para maximizar a produção energética, diversificando a base geradora com fontes alternativas em busca ao atendimento da demanda de energia e a sustentabilidade energética (JUNIOR, O. H. A. *et al.*, 2014a).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia do Brasil, os dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica apontam que o incremento da capacidade de geração de energia elétrica entre os anos de 2010 a 2012 no mundo foi de 22,5% que representa aproximadamente 1.021GW a mais de energia para suprir com reservas o crescimento de 12% do consumo no mesmo período. Enquanto no Brasil, de acordo com EPE o incremento foi de 17,5% no mesmo período representando a inserção de 18 GW na matriz energética nacional que no mesmo período teve um crescimento no consumo de 14% (EPE, 2015). O Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2016 aponta a continuação deste crescimento que 2012 a 2015 foi de 19 GW assemelhando-se ao período anterior (EPE, 2016).

Na tabela 1, apresenta-se conforme o último Anuário Estatístico de Energia Elétrica divulgado pela EPE em 2015 e 2016 o crescimento da capacidade instalada de geração de energia elétrica no mundo e no Brasil entre os anos de 2008 e 2012 crescendo posteriormente em proporção análoga entre 2012 e 2016.

Os dados apresentados na tabela 1 e na figura 1 confirmam o investimento mundial na maximização da capacidade de fornecimento de energia elétrica (sendo maior mais acentuado para países desenvolvidos ou em desenvolvimento), entretanto, a ampliação da matriz energética esbarra em questões ambientais para fontes convencionais uma vez que tanto na construção quanto em regime de funcionamento, são gerados muitos impactos ao meio ambiente. Com isso, há alguns anos tem-se buscado investir em fontes de energia alternativas utilizando recursos naturais inesgotáveis como radiação solar, vento, movimento das ondas do mar, entre outros. O uso destes tipos de recursos naturais apresentam-se portanto, como uma excelente opção para complementar a capacidade de geração de energia elétrica de forma sustentável (LEITE, 2007).

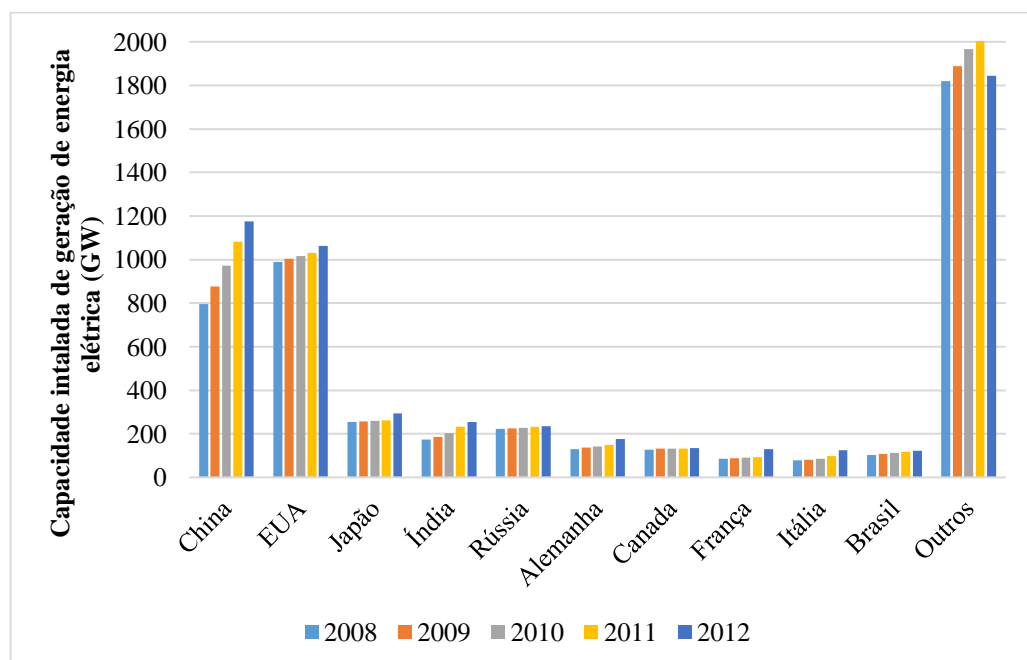
Tabela 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil e no mundo (GW)

	GW (2008)	GW (2009)	GW (2010)	GW (2011)	GW (2012)	Δ% (2012/2011)	Part. % (2012)
Mundo	4.529,5	4.727,7	4.964,5	5.204,7	5.550,5	6,6	100
Brasil	102,9	106,6	113,3	117,1	121,0	3,3	2,2

Fonte: EPE, 2015

A figura 1 apresenta um gráfico demonstrativo com a evolução da capacidade instalada de energia elétrica em alguns países do mundo.

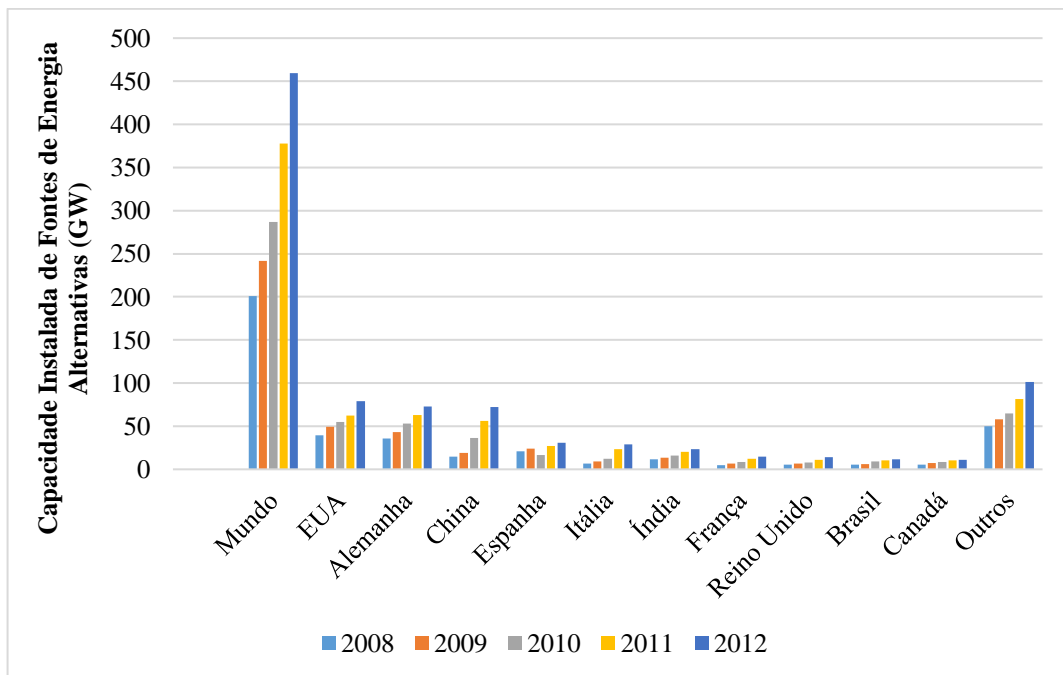
Figura 1 – Gráfico demonstrativo da capacidade instalada de energia elétrica



Fonte: EPE, 2015, 2016

A inserção de fontes alternativas na matriz energética mundial é uma realidade e vem acontecendo de forma gradativa, porém o processo é lento motivado pelo alto custo das tecnologias envolvidas, falta de incentivo e de políticas públicas mais atuantes (LEITE, 2007). De acordo com os dados contidos no Anuário Estatístico de Energia Elétrica apresentado na figura 2, entre os anos de 2008 a 2012, o incremento da capacidade instalada destas fontes de energia foi de 129,2% no mundo passando de 200,6GW para 459,7GW. No Brasil esse valor atingiu 116,7% representando um incremento de aproximadamente 6,4GW na matriz energética nacional o que ainda é uma parcela muito pequena haja vista o potencial existente devido as climáticas favoráveis do país (EPE, 2015, 2016)

Figura 2 – Gráfico demonstrativo da capacidade instalada de fontes alternativas

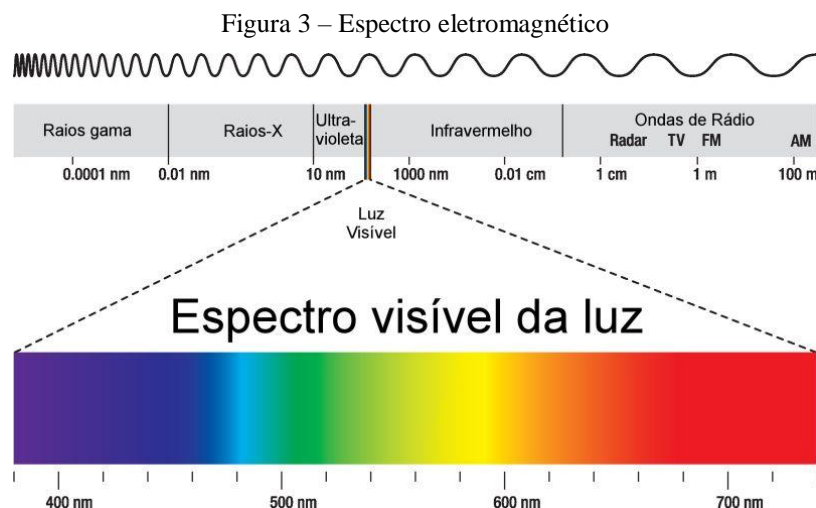


Fonte: EPE, 2015, 2016

Os dados apresentados anteriormente dos anuários estatístico de energia elétrica do Brasil dos anos de 2015 e 2016 demonstram de forma clara a “corrida” mundial na ampliação da oferta de energia para suprir a demanda que cresce exponencialmente junto com a evolução tecnológica. Nota-se ainda uma evolução na implementação das fontes de energias alternativas confirmando a tendência de atenção do mundo aos impactos ambientais. O foco do trabalho acaba seguindo esta tendência ambiental, uma vez que a partir do uso de energias naturais de forma direta, deixa-se de utilizar energia elétrica e por uma reação em cadeia minimiza-se a necessidade de ampliação da matriz.

2.2 PRINCÍPIOS GERAIS DA LUZ

A luz é uma forma de energia radiante, ou seja, que se propaga por meio de radiação eletromagnética (CREDER, 2007; GUERRINI, 2007). O intervalo completo da radiação eletromagnética é chamado de espectro eletromagnético e como pode ser visto na figura 3, é subdividido em faixas delimitadas pelo seu devido comprimento de onda que por sua vez é a distância que uma onda tem em seu ciclo completo, representado pela letra grega (λ) (CAVALIN; CERVELIN, 2009).



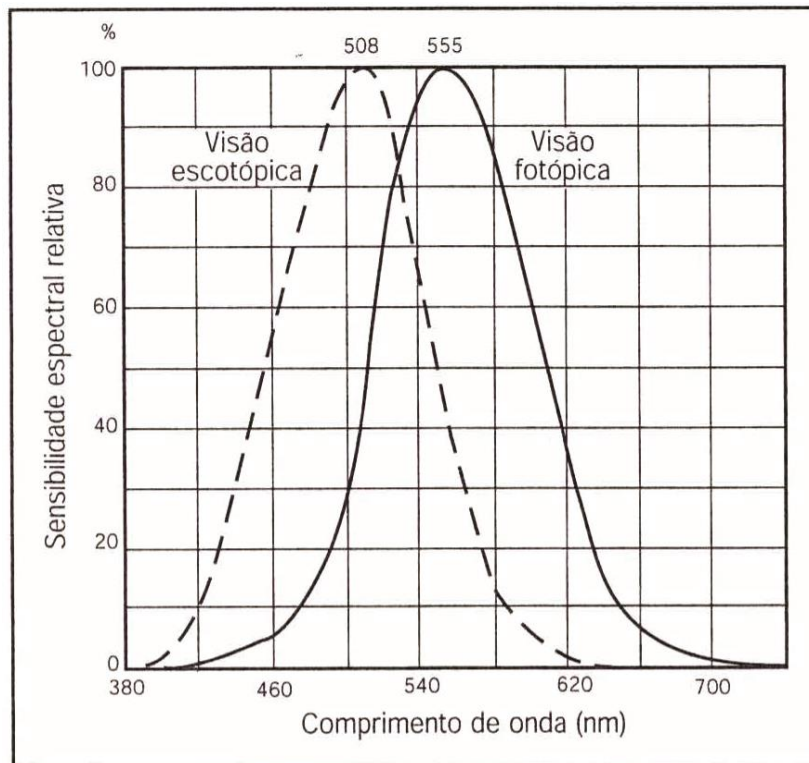
Fonte: CARVALHO, 2015

De todo o espectro eletromagnético, a faixa visível está compreendida entre os comprimentos de onda de 380nm (380×10^{-9} m) a 760nm (760×10^{-9} m) localizada acima da faixa de luz ultravioleta e abaixo da faixa de luz infravermelha (COTRIM, 2008). Dentro do espectro visível, além da impressão luminosa, há também a impressão de cor que tem ligação direta aos comprimentos de ondas das radiações produzindo diferentes sensações de luminosidade ao olho humano. Sabe-se que a visão pode ter variações de indivíduo para indivíduo. No entanto, para fins de estudo existe o que se chama de “olho padrão” definidos pela “*Commission Internationale de l’Eclairage – CIE*”¹, ou seja, valores limites de referência para cores. A sensibilidade à cor causada na visão humana conforme apresentado na figura 4, na visão fotóptica ou visão diurna é maior no comprimento de onda de 555nm

¹ Commission Internationale de l’Eclairage: Entidade internacional independente, sem fins lucrativos, e sediada em Viena, (Áustria). Reconhecida pela ISO (Organização Internacional de Normatização) e pela IEC (Comissão Internacional de Eletrotécnica) como uma organização internacional de caráter normativo, a CIE é a autoridade máxima na área da iluminação.

(555×10^{-9} m) que corresponde a cor amarelo-esverdeado e menor para as cores vermelho e violeta (MOREIRA, 2006).

Figura 4 – Curva internacional de luminosidade espectral relativa (CIE)



Fonte: MOREIRA, 2006

Conforme pode ser constatado na figura 4, devido a características inerentes ao “mecanismo” da visão humana, fica evidente que há um deslocamento em direção aos comprimentos de ondas menores na presença de níveis baixos de iluminação conhecido como visão escotópica ou visão noturna (GUERRINI, 2007; MOREIRA, 2006).

O olho humano sofre o que se chama de fadiga ocular, tendo uma redução reversível de eficiência causada pelo uso normal das atividades visuais, neste caso, a recuperação acontece quando o indivíduo dorme. Em outros casos, a redução da eficiência visual pode ser causada pela depreciação natural associada ao avanço da idade, ou ainda por regime contínuo de trabalho em ambientes com iluminação inadequada, tendo nestes casos, reduções irreversíveis na eficiência visual. Deste modo, fica evidente que uma iluminação adequada é comprovadamente importante para preservação da capacidade visual além de redução da tensão nervosa, insônia e outros efeitos prejudiciais ao sistema nervoso (GUERRINI, 2007). A elevada quantidade de luz não significa necessariamente a iluminação mais adequada, sendo que a qualidade é fator predominantemente importante neste processo, pois considera a

qualidade da luz permitindo o conforto visual proporcionando bem-estar, desempenho visual garantindo a realização das tarefas de forma correta e segurança através da possibilidade de detecção de perigos eminentes no ambiente (ABNT, 2013; GUERRINI, 2007).

2.2.1 Fluxo luminoso

O fluxo luminoso é uma grandeza que representa a potência de radiação emitida por uma fonte de luz capaz de estimular a retina e por consequência ser vista (CAVALIN; CERVELIN, 2009). Trata-se de uma grandeza fotométrica que se deriva da intensidade luminosa, representado pelo símbolo (ψ) e que tem como unidade de medida o lúmen (lm) (COSTA, 2006). Por definição, a quantidade de luz gerada em um segundo de radiação eletromagnética com comprimento de onda de 555nm e fluxo radiante de 1/680W corresponde a um lúmen (lm) (COTRIM, 2008).

2.2.2 Eficácia e eficiência luminosa

A eficácia luminosa é a razão do fluxo luminoso em relação ao fluxo radiante, ou seja, determina a capacidade de produzir uma sensação luminosa. A eficiência por sua vez é a razão entre o fluxo luminoso para a potência elétrica dissipada. A sua representação é feita pelo símbolo (η) e no caso da eficiência luminosa a unidade é o lúmens/watt (lm/W) (COTRIM, 2008).

2.2.3 Intensidade luminosa

Uma vez que uma fonte de luz emite luz em várias direções, a intensidade luminosa representa a radiação de luz emitida por uma fonte em uma determinada direção, ou seja, pressupondo que a fonte luminosa seja puntiforme (CAVALIN; CERVELIN, 2009; COSTA, 2006). A intensidade luminosa representada pelo símbolo (I) tem como unidade a candela (cd)

que é grandeza base do sistema internacional de unidades (SI). Um candela corresponde a intensidade luminosa com emissão uniforme em todas as direções de uma fonte de formato esférico que tem 12,56 lm de fluxo total emitido (COTRIM, 2008).

2.2.4 Iluminância ou iluminamento

É uma grandeza muito importante no projeto e avaliação da iluminação para interiores de ambientes, pois com este parâmetro pode-se embasado por normas, especificar corretamente ou avaliar a iluminação de um dado ambiente. Esta grandeza é na verdade a razão entre o fluxo emitido sobre uma determinada área. Representada por (E) e com a unidade Lux (lx), sabe-se que um lux (1 lx) emitido sobre uma área de um metro quadrado (1 m²) incide um lúmen (1 lm) (COTRIM, 2008).

2.2.5 Ofuscamento

O “*Unified Glare Rating*” (UGR) ou ofuscamento é um parâmetro importante na qualidade da iluminação que determina a sensação visual produzida por áreas brilhante no campo de visão, ou seja, iluminância com intensidade suficiente para gerar desconforto ou redução da performance visual (GARROCHO; AMORIN, 2005). O ofuscamento é dividido em ofuscamento inabilitador que é mais comum na iluminação exterior, entretanto pode ser sentido por fontes pontuais de brilho intenso como uma janela em um ambiente com pouca iluminação, e ofuscamento desconfortável causado por exemplo por luminárias brilhantes e janelas (ABNT, 2013).

2.2.6 Índice de reprodução de cor

Conhecido com IRC (índice de reprodução de cor), corresponde ao índice que determina a correta reprodução da cor do objeto ou superfície quando submetida a uma fonte

de luz artificial. O olho humano deve perceber a cor sob luz artificial, de forma semelhante a percepção sob a luz natural (ABNT, 2013).

2.2.7 Reflexão, transmissão e absorção da luz

Quando a luz incide sobre uma superfície, tem parte do seu fluxo luminoso refletido, outra parte em alguns casos atravessa a superfície e uma terceira parte deste fluxo é absorvido pela superfície convertendo-se em calor. A reflexividade, transmitância e fator de absorção tem proporções distintas e intimamente ligadas as características da superfície incidida (MOREIRA, 2006). Equacionando as parcelas da luz incidente tem-se a equação 1.

$$\varphi = \rho + \tau + \alpha \quad (1)$$

Onde:

φ – Fluxo luminoso incidente;

ρ – Fator de reflexão da luz;

τ – Fator de transmissão da luz;

α – Fator absorção da luz;

2.2.7.1 Reflexão da luz

A reflexão caracteriza-se pela devolução da luz incidida sobre uma superfície sem que haja alteração nos seus componentes monocromáticos (COSTA, 2006). A luz solar que contém radiações de quase todos os comprimentos de ondas (luz branca), quando incide sobre uma superfície tem fluxo refletido com mesma composição espectral do fluxo incidente, ou seja, a luz refletida será branca. A luz refletida será colorida quando a superfície refletir melhor apenas determinados comprimentos de onda. A reflexividade, ou fator de reflexão (ρ) é uma relação direta entre o fluxo luminoso refletido (φ_r) por uma superfície e o fluxo luminoso incidente (φ), conforme apresentado na equação 2 (MOREIRA, 2006).

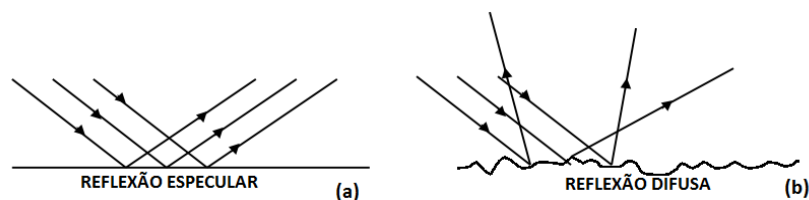
$$\rho = \frac{\varphi r}{\varphi} \quad (2)$$

O resultado do cálculo da reflexividade é adimensional e representa um fator do valor médio do espectro visível. Caso seja necessário determinar a reflexividade de um comprimento de onda específico ($\rho\lambda$), utiliza-se para isto o fluxo luminoso do comprimento de onda refletido ($\varphi\lambda r$) e o fluxo luminoso do comprimento de onda incidente ($\varphi\lambda$) conforme apresentado na equação 3 (MOREIRA, 2006).

$$\rho(\lambda) = \frac{\varphi\lambda r}{\varphi\lambda} \quad (3)$$

Conforme apresentado na figura 5(a), chama-se reflexão especular (dirigida) a reflexão da luz de forma espelhada onde o fluxo luminoso incidido reflete em direção única paralelamente ao ângulo de entrada sem alteração da frequência das componentes da onda que compõe a luz incidente (GRIGOLETTI *et al.*, 2007). A reflexão ocorre em espelhos e materiais de baixa rugosidade como materiais metálicos polidos por exemplo (GRIGOLETTI *et al.*, 2007). A reflexão difusa vista na figura 5(b) por sua vez, caracteriza-se por uma reflexão onde o fluxo luminoso é refletido em várias direções (TIPLER; MOSCA, 2006). Este tipo de reflexão ocorre em superfícies com rugosidade homogênea como o gesso por exemplo utilizado em iluminação indireta (GRIGOLETTI *et al.*, 2007).

Figura 5 – Reflexão especular (a) versus reflexão difusa (b)



Fonte: TIPLER; MOSCA, 2006

2.2.7.2 Transmissão da luz

A transmissão acontece quando o fluxo luminoso atravessa a superfície, ou seja, transmitindo-se para o outro lado. Essa transmissão causa o efeito da refração que é a mudança de direção do fluxo luminoso de saída em relação a entrada, isso é causado pela

alteração da velocidade de propagação devido a característica do material do meio. Assim, a transmitância ou fator de transmissão (τ) apresentado na equação 3, é a relação entre o fluxo luminoso transmitido ($\varphi\tau$) pelo fluxo luminoso incidente (φ) conforme apresentado na equação 4 (TIPLER; MOSCA, 2006).

$$\tau = \frac{\varphi\tau}{\varphi} \quad (4)$$

Da mesma forma, caso seja necessário determinar a transmitância de um comprimento de onda específico ($\tau\lambda$), utiliza-se o fluxo luminoso do comprimento de onda transmitido ($\varphi\lambda\tau$) e o fluxo luminoso do comprimento de onda incidente ($\varphi\lambda$) conforme equação 5.

$$\tau\lambda = \frac{\varphi\lambda\tau}{\varphi\lambda} \quad (5)$$

2.2.7.3 Absorção da luz

Por fim, uma terceira parte da luz é absorvida pela superfície transformando-se em calor. Assim como a reflexão e a transmissão, a quantidade de luz absorvida está diretamente ligada as características do material da superfície. O fator de absorção (α) portanto, é a relação entre o fluxo luminoso absorvido em relação ao fluxo incidente (φ) conforme apresentado na equação 6 (TIPLER; MOSCA, 2006).

$$\alpha = \frac{\varphi\alpha}{\varphi} \quad (6)$$

Já o fator de absorção para um comprimento de onda específico ($\alpha\lambda$), considera o fator de absorção para o comprimento de onda transmitido ($\varphi\lambda\alpha$) em relação ao fator de absorção para o fluxo incidente ($\varphi\lambda$), conforme demonstrando na equação 7.

$$\alpha\lambda = \frac{\varphi\lambda\alpha}{\varphi\lambda} \quad (7)$$

2.3 PROJETOS DE ILUMINAÇÃO DE INTERIORES

Dimensionar adequadamente a iluminação do interior de um ambiente, significa tornar a visualização dos elementos contidos dentro do mesmo eficaz, permitindo que as atividades possam ser realizadas de forma correta e confortável. Para isso o projeto deve satisfazer aspectos quantitativos e qualitativos exigidos pelo ambiente a partir da distribuição uniforme da iluminação, fornecimento do correto iluminamento, controle de ofuscamento e controle adequado da cor da luz e superfícies (ABNT, 2013).

É possível através de cálculos de iluminação determinar a quantidade de luz necessária para iluminar interiores de ambientes. Estes cálculos consideram fatores diversos como por exemplo cores das paredes, altura do ponto de luz, área do recinto, tipo de lâmpada e luminária, dentre outros (FILHO, 2010; GUERRINI, 2007). Na atualidade existem algumas metodologias de cálculos criadas em universidades e na indústria para auxiliar os projetistas e engenheiros no dimensionamento da iluminação, sendo estas baseadas na expressão teórica básica denominada método dos lumens (GUERRINI, 2007). O método dos lumens apresentado na equação 8, baseia-se na determinação do fluxo luminoso total (Ψ_t) necessário para se obter um iluminamento médio desejado (FILHO, 2010).

$$\psi_t = \frac{E \times S}{F_u \times F_{dl}} \quad (8)$$

Onde:

Ψ_t - Fluxo luminoso total necessário (lumens);

E – Iluminamento médio requerido pelo ambiente (lux);

S – Área do recinto (m²)

F_u – Fator de utilização do recinto (adimensional);

F_{dl} – Fator de depreciação do serviço da luminária (adimensional);

Para determinação do fluxo luminoso total (Ψ_t), é necessário primeiramente identificar o iluminamento requerido pelo local a ser iluminado (E). Este parâmetro está diretamente relacionado a atividade desenvolvida no ambiente, sendo que atividades que demandam maior precisão por exemplo terão os valores maiores de iluminamento ou iluminância (FILHO, 2010). Os valores do iluminamento são determinados por norma, que no

Brasil é a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 (Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior) e que traz os valores para ambientes de trabalho (residencial, industrial, comercial, escolares e prédios públicos).

O fator de utilização (F_u) é a relação entre o fluxo luminoso que chega ao plano de trabalho e o fluxo luminoso emitido pela fonte de luz. Este parâmetro é dependente das dimensões do ambiente e da pintura das paredes, uma vez que as cores têm reflexividades diferentes. Assim, o fator de utilização é obtido através de tabela conforme a tabela 2 fornecida pelos fabricantes de lâmpadas e luminárias a partir das informações de um índice de utilização do recinto (K) conforme equação 9 e também pelos dados de reflexividade do teto (ρ_{te}), reflexividade das paredes (ρ_{pa}) e reflexividade do piso (ρ_{pi}) determinadas por suas cores (ABNT, 2013; FILHO, 2010).

$$K = \frac{A \times B}{H_{lp} \times (A + B)} \quad (9)$$

Onde:

A – Comprimento do recinto (m);

B – Largura do recinto (m);

H_{lp} – Altura do ponto de luz ao plano de trabalho (m);

Tabela 2 – Fator de utilização do recinto (tabela parcial)

Teto	70%		50%		70%	50%	30%	
Parede	50%	30%	50%	30%	10%	10%	30%	10%
K	10% (valor de reflexividade percentual do piso)							
0,6	0,32	0,25	0,29	0,22	0,2	0,18	0,2	0,17
0,8	0,39	0,31	0,35	0,29	0,26	0,24	0,26	0,22
1	0,45	0,37	0,4	0,34	0,32	0,29	0,31	0,27
1,25	0,5	0,43	0,45	0,39	0,37	0,34	0,36	0,32
1,5	0,55	0,48	0,49	0,44	0,42	0,39	0,4	0,36
2	0,61	0,55	0,56	0,5	0,5	0,46	0,46	0,42
2,5	0,66	0,6	0,6	0,55	0,55	0,51	0,5	0,47
3	0,69	0,64	0,63	0,58	0,59	0,55	0,53	0,55

Fonte: FILHO, 2010

O fator de depreciação do serviço da luminária (F_{dl}) por sua vez, é na verdade um valor ligado a diminuição do rendimento do fluxo emitido pela luminária e o tempo de

manutenção da mesma e do ambiente. Prevê-se que com o passar do tempo, tanto o ambiente quanto a luminária ficarão sujos perdendo sua capacidade de reflexão atenuando assim seu rendimento, além disso, considera-se o envelhecimento da lâmpada e também a depreciação natural do fluxo luminoso. O produto destes parâmetros resulta em um fator que varia normalmente de 0,5 a 0,8 e pode ser encontrado em norma. (ABNT, 2013).

Uma vez determinado o fluxo luminoso total em lúmens, para se determinar a quantidade de luminárias necessárias de modo a garantir o iluminamento desejado, utiliza-se o fluxo luminoso da fonte de luz fornecido pelo fabricante conforme apresentado na equação 10.

$$Nlu = \frac{\Psi_t}{Nla \times \Psi_l} \quad (10)$$

Onde:

Nlu – Número de luminárias;

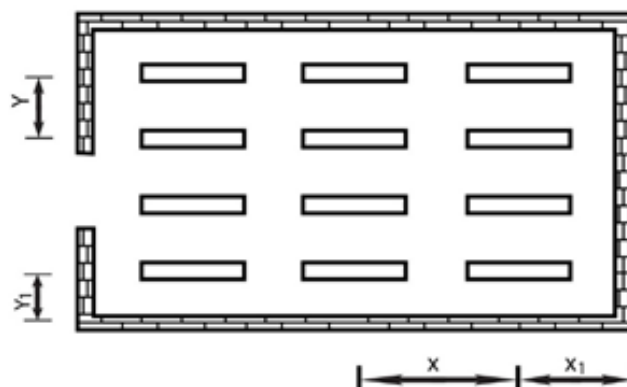
Ψ_t - Fluxo luminoso total necessário (lumens);

Nla – Número de lâmpadas por luminárias;

Ψ_l - Fluxo luminoso da lâmpada (lumens);

Determinado o número de luminárias, é preciso distribuí-las uniformemente dentro do ambiente a ser iluminado permitindo assim uma iluminação adequada em todas as partes do mesmo. A distribuição uniforme conforme apresentado na figura 6 tem seus espaçamentos pautados pelas equações 11 e 12 (FILHO, 2010).

Figura 6 – Distribuição das luminárias no ambiente



Fonte: FILHO, 2010

$$X \leq 1,5 \times Hlp \quad (11)$$

$$Y \leq 1 \dots 1,5 \times Hlp \quad (12)$$

Onde:

X e Y – Distância entre luminárias (m);

X1 – X/2 Distância entre a luminária e a parede (m);

Y1 – Y/2 Distância entre a luminária e a parede (m);

Hlp – Altura do ponto de luz ao plano de trabalho (m);

Além do iluminamento ou iluminância mantida conforme define a norma, outros parâmetros também precisam ser considerados para o projeto de uma iluminação adequada. Um destes parâmetros é o índice limite de ofuscamento unificado (UGRL) que expressa o valor máximo permitido de ofuscamento e que por sua vez é a sensação visual reproduzida por áreas brilhantes dentro do campo de visão. O outro parâmetro a ser considerado chama-se índice de reprodução de cor (Ra) que é o índice que determina a qualidade da reprodução da cor e tem seu valor alterado conforme o tipo de lâmpada (ABNT, 2013).

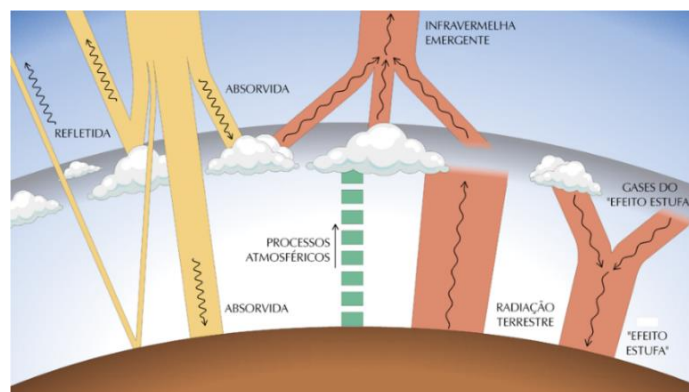
O procedimento de verificação da iluminância deve ser feito com equipamentos de medição específicos, como os luxímetros por exemplo, nos pontos específicos desejados, ou seja, diretamente sobre o plano de trabalho para o qual a iluminação foi projetada. Já para o ofuscamento e para a reprodução de cores, a verificação é pautada nas informações fornecidas pelos fabricantes das luminárias e das lâmpadas, permitindo que em comparação as informações do projeto validem a aplicação (ABNT, 2013).

2.4 ENERGIA SOLAR

Chama-se de energia solar (radiação solar), a energia que está dentro da radiação eletromagnética emitida pelo sol permanentemente (SILVA, 2014). O sol está localizado cerca de 150 milhões de quilômetros da terra e tem dimensões 33 mil vezes maior, chegando a 1,48 milhões de quilômetros. Com temperaturas de cerca de 5600°C na sua superfície, é definido como uma imensa massa em atividade nuclear (LOPEZ, 2012).

A radiação emitida pelo sol tem sua intensidade influenciada por diversos fatores, como por exemplo a atmosfera, que conforme figura 7 demonstra, reduz a energia emitida pelo sol devido a efeitos de reflexão e da absorção, sendo que só por reflexão a radiação solar incidente na atmosfera, tem uma redução de 30 a 40%. Outra parte da energia é absorvida e tem seus valores definidos pela densidade do ar, composição da atmosfera e da distância percorrida pela radiação até atingir a superfície da terra que por sua vez depende da latitude do local, época do ano e hora (SILVA, 2014).

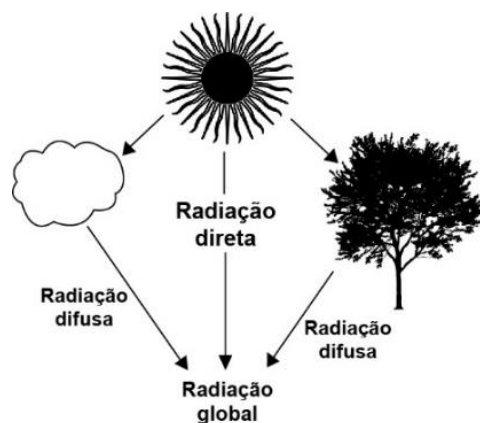
Figura 7 – Interação da energia solar com a atmosfera



Fonte: PEREIRA *et al.*, 2006

A radiação que chega ao solo é chamada de radiação global e é composta pela soma da radiação direta e a radiação difusa. A radiação direta, como o próprio nome sugere corresponde a radiação que atravessa diretamente a atmosfera até chegar a terra e a radiação difusa corresponde a parcela que chega indiretamente ao plano através da difração na atmosfera e reflexão da luz visto na figura 8.

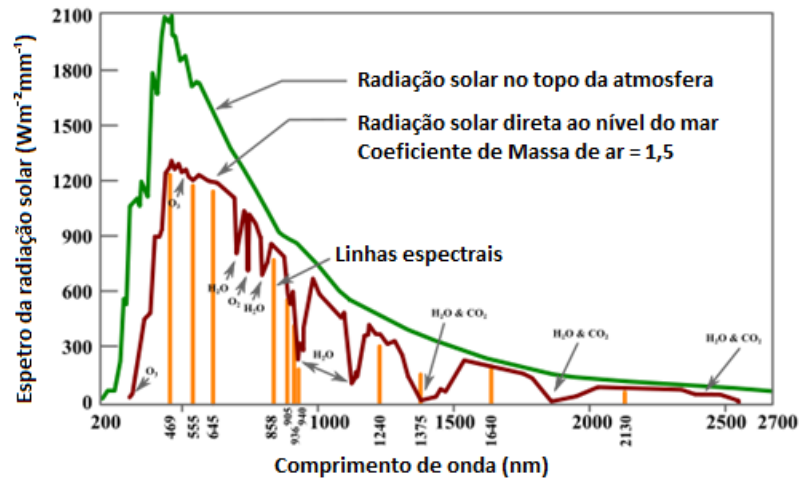
Figura 8 – Radiação global, direta e difusa



Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012

A figura 9 traz um gráfico que apresenta o comportamento da radiação no topo da atmosfera e ao nível do mar demonstrando a atenuação sofrida pela radiação ao atravessar a atmosfera. A figura ainda mostra que a maior intensidade da radiação é justamente na região entre 370 e 750nm, ou seja, na radiação visível do espectro (SILVA, 2014).

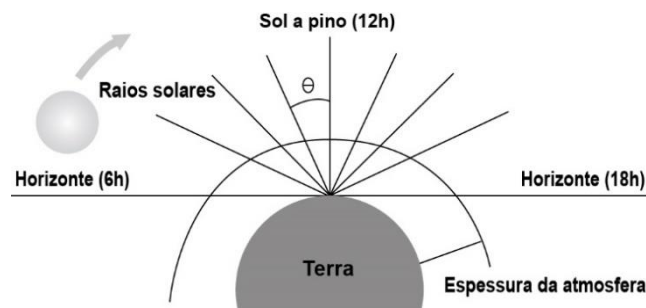
Figura 9 – Espectro da radiação solar incidente na terra



Fonte: SILVA, 2014

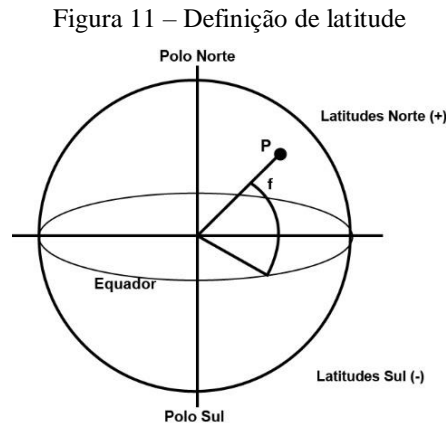
Durante o dia, a radiação solar tem sua intensidade variada pela inclinação do sol em relação a superfície terrestre representado pelo ângulo zenital (θ), isso acontece porque a inclinação do sol define o comprimento da atmosfera (camada de ar) que o mesmo precisa “vencer” até chegar a terra. A menor camada de ar a ser vencida é ao meio dia, justamente quando o sol está perpendicular à terra sendo assim, portanto, o momento do dia onde a energia solar é máxima, conforme pode ser acompanhado na figura 10 (SILVA, 2014; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 10 – Espessura da atmosfera em relação a inclinação do sol



Fonte: SILVA, 2014

A latitude que conforme figura 11, é o ângulo formado entre um ponto do planeta (P) ligado a uma reta que tem origem no centro do planeta, até a linha do equador. Latitudes positivas, são aquelas situadas no hemisfério norte e latitudes negativas localizadas no hemisfério sul (SILVA, 2014).



Fonte: SILVA, 2014

Conforme tabela 3 demonstra, a energia solar diminui na superfície com a diminuição da latitude.

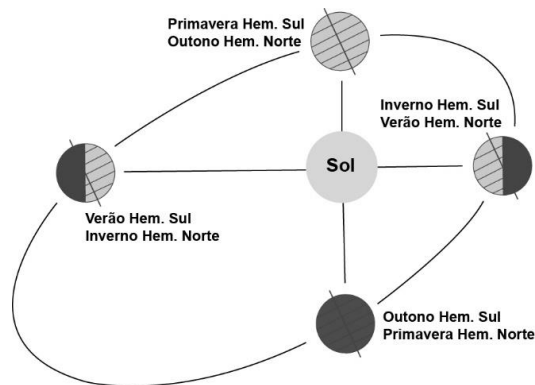
Tabela 3 – Energia solar anual média na superfície da terra em relação a latitude

Latitude	Energia incidente em relação a energia incidente no Equador (%)
0°	100
10°	98,5
20°	94,6
30°	88,1
40°	79,0

Fonte: SILVA, 2014

Além disso, o ângulo formado pela inclinação do equador em relação ao plano de órbita terrestre influencia também na radiação solar. Chamado de declinação solar (δ), este ângulo varia ao longo do passar dos dias, sendo máximo em junho (solstício de junho) que ocorre entre os dias 21 e 22 e mínimo em dezembro (solstício de dezembro) ocorrente entre os dias 22 e 23 deste mês (figura 12). Como o eixo da terra não altera sua posição, a alteração da declinação do sol ocorre pela posição relativa da terra em seu movimento ao entorno do sol. (SILVA, 2014).

Figura 12 – Variação anual da declinação solar



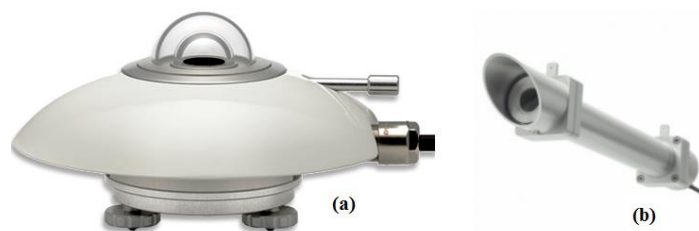
Fonte: SILVA, 2014

2.4.1 Irradiação solar

A constante solar também conhecida como irradiação ou ainda irradiância solar, é uma grandeza que representa a densidade de potência do sol em Watts (W) por metros quadrados (m^2) caracterizando o fluxo de energia que é cerca de $1.360W/m^2$ acima da atmosfera. Esse valor, apesar de ser chamado constante do sol, varia ao longo do ano tendo seu maior valor em janeiro que é quando o sol está mais perto da terra (ROSA, A. V. DA, 2015).

Instrumentos solarimétricos são equipamentos capazes de medir a potência incidente na superfície sobre diversos comprimentos de onda, sendo que, os mais utilizados na atualidade são os piranômetros e os piroheliômetros (TIBA, 2000). Os piranômetros medem a radiação solar total através de um sensor localizado no plano horizontal que recebe a radiação em todas as direções, já os piroheliômetros medem a radiação direta através de um dispositivo de acompanhamento solar e um filtro da radiação emitida (LOPEZ, 2012). A figura 13 traz a imagem destes dois instrumentos solarimétricos.

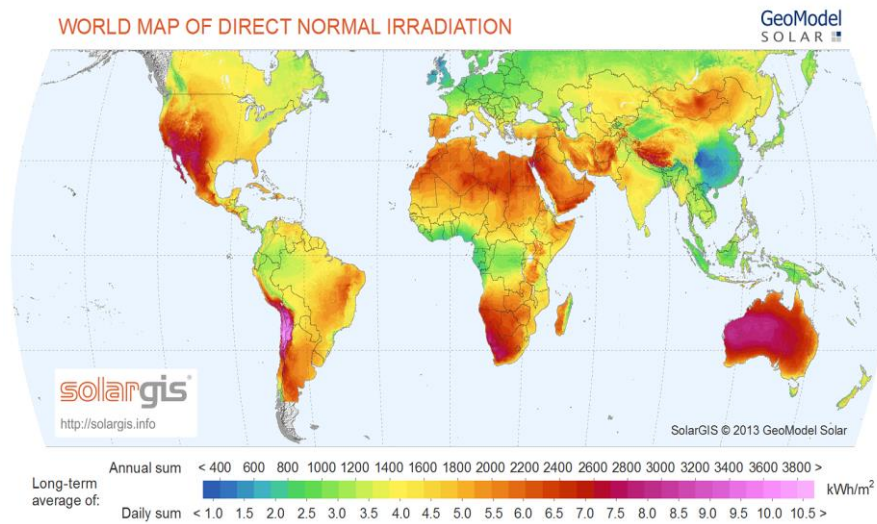
Figura 13 – Instrumentos solarimétricos – (a) piranômetros (b) piroheliômetro



Fonte: HUKSEFLUX BRASIL, 2015

Outra forma de determinar os níveis de radiação solar é a partir de modelos matemáticos com entrada de informações originadas de satélites meteorológicos e dados atmosféricos. A figura 14 traz a informação da irradiação direta no mundo obtida a partir do modelo criado chamado de solargis® com dados de 4 satélites geoestacionários (SOLARGIS, 2013).

Figura 14 – Mapa da irradiação solar direta no mundo

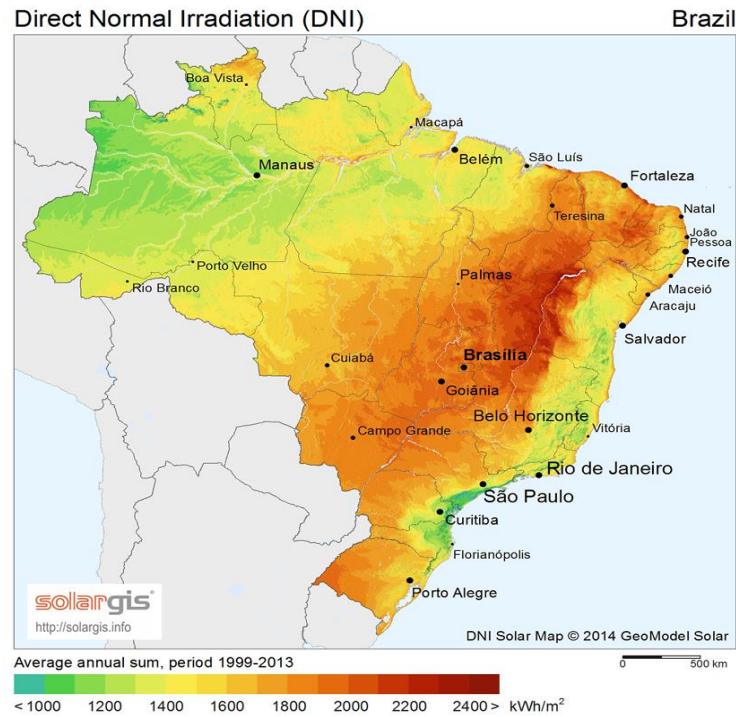


Fonte: SOLARGIS, 2013

O uso de modelos baseado em satélites geoestacionários torna a informação bastante precisa, uma vez que os sensores dos mesmos são precisamente calibrados e mantidos durante todo o ciclo de vida, podendo chegar a uma confiabilidade de 99%. Além disso, é possível resgatar dados históricos de satélites permitindo a análise mais precisa da irradiação solar (SOLARGIS, 2013).

A figura 14 demonstra através de uma escala colorida, a radiação direta média a nível mundial, nela pode ser constatado que o Brasil apresenta radiação que conforme já mencionado neste trabalho assemelha-se a regiões com elevada radiação. Mesmo assim, a falta de investimento e incentivo faz com que o quadro nacional no aproveitamento da luz solar tanto para aquecimento, iluminação ou geração de energia elétrica seja muito pequeno quando comparado a países que aproveitam muito melhor este tipo de energia mesmo com uma radiação inferior (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013). Como pode ser visualizado na figura 15 a maior parte do território nacional tem incidência solar com valores elevados de irradiação solar.

Figura 15 – Mapa da irradiação solar direta no Brasil



Fonte: SOLARGIS, 2013

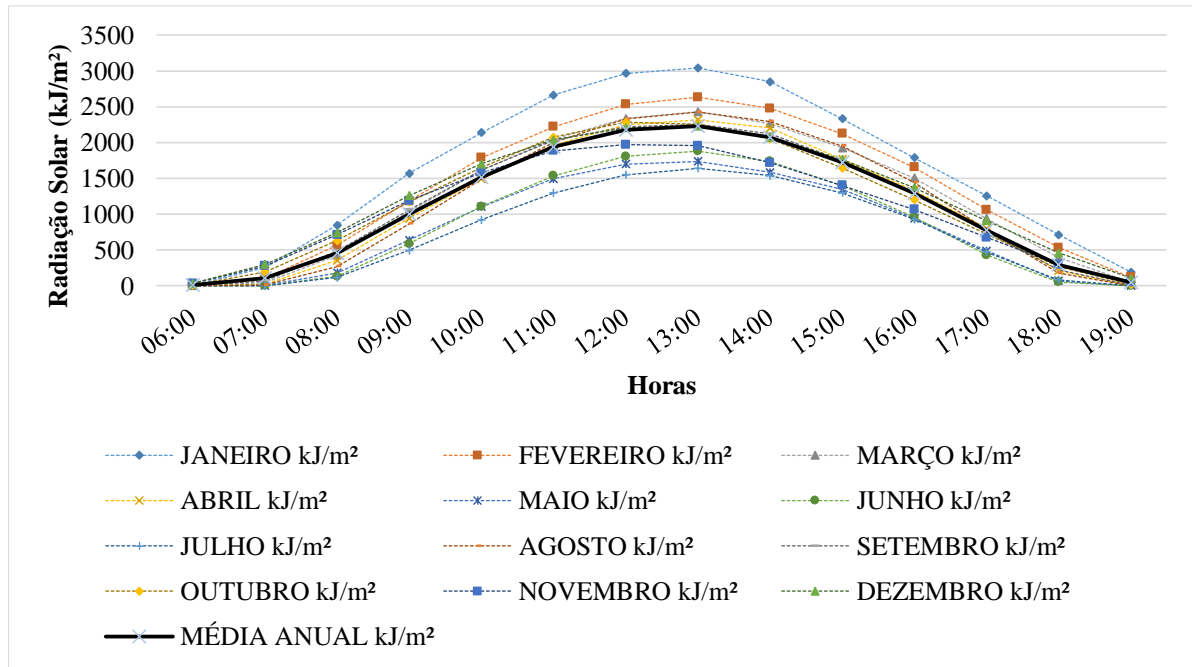
Buscando ainda evidenciar o potencial solar do Brasil, recorre-se neste ponto a dados reais de estações meteorológicas instaladas no território brasileiro gerenciado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) chegando ao número de 400 estações em todo o território. Tomando como base de avaliação, apenas a região sul conforme figura 16 que tem os piores níveis de radiação solar do Brasil, sendo monitorada por 82 das 400 estações no INMET é possível confirmar nas figuras 17, 18 e 19 o elevado potencial de radiação do país.

Figura 16 – Região Sul do Brasil e quantidade de estações meteorológicas do INMET



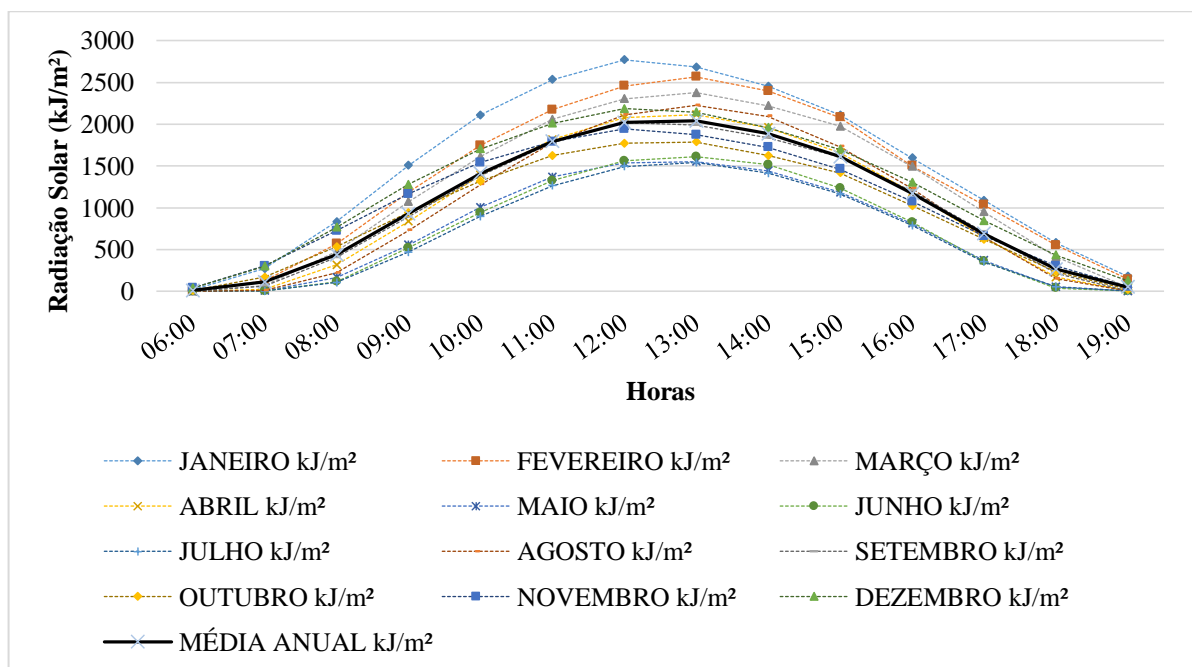
Os dados foram obtidos diretamente do site do INMET e representam a radiação global média nos três estados da região sul, durante o ano de 2015 chegando a índices de 15,6MJ/m².dia no Paraná, 14,4MJ/m².dia em Santa Catarina e 15,4MJ/m².dia para o Rio Grande do Sul.

Figura 17 – Radiação solar média anual – Paraná (ano de 2015)



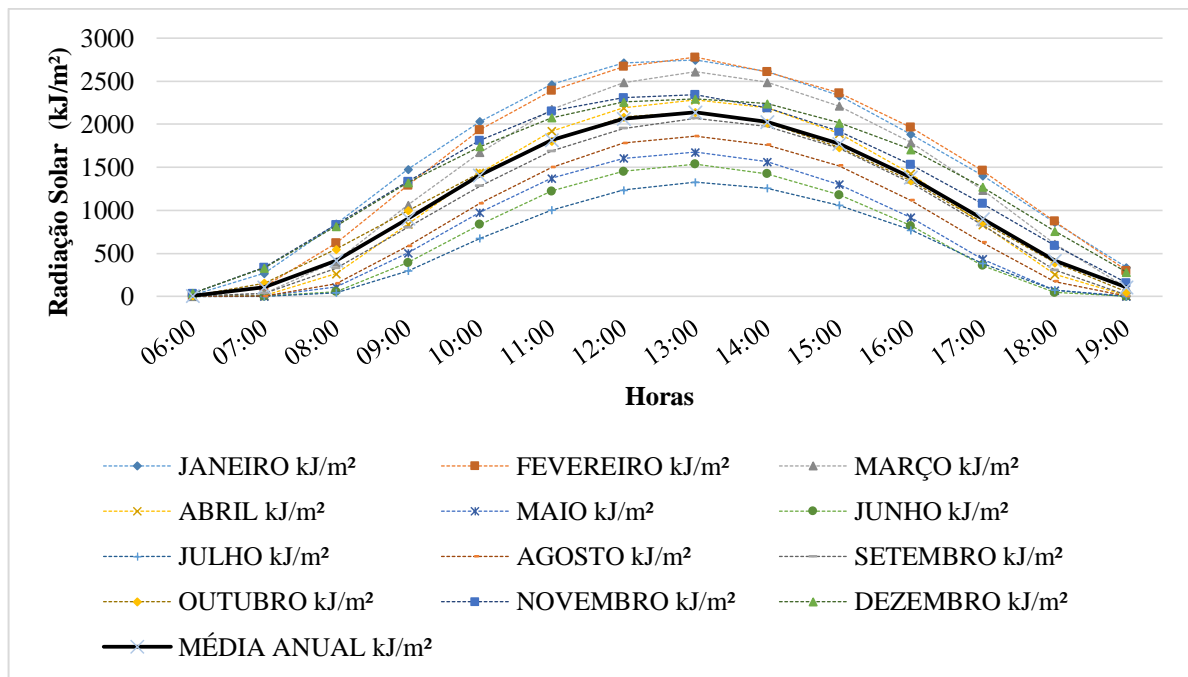
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Figura 18 – Radiação solar média anual – Santa Catarina (ano de 2015)



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Figura 19 – Radiação solar média anual – Rio Grande do Sul (ano de 2015)

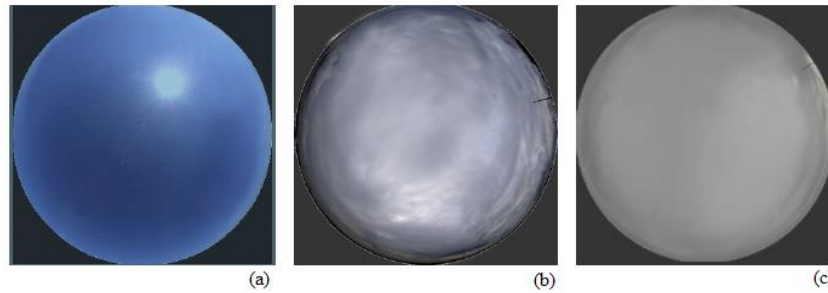


Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

2.4.2 Luz natural

A luz do sol corresponde a apenas uma pequena parte do espectro de frequência emitido pelo sol que chega a superfície da terra. Assim como já visto, sua inconstância e falta de uniformidade se dá pela posição do sol e a presença de nuvens. Seguindo o mesmo comportamento da radiação solar, a luz natural pode ser classificada em dois tipos, a luz do sol emitida diretamente na superfície com incidência de 6.000 lux a 100.000 lux e a luz do céu com intensidades bem menores que variam de 5.000 a 20.000 lux resultado da refração e reflexão da luz direta ao passar pela atmosfera (GARROCHO; AMORIN, 2005). A luz do céu tem subclassificações originadas da condição atmosférica podendo ser céu claro, parcialmente encoberto ou encoberto. A norma ABNT NBR 15215:2005 apresenta a definição de céu claro, conforme figura 20(a), como aquele que apresenta uma nebulosidade de 0 a 35%, já para céu parcialmente encoberto, conforme figura 20(b), a definição estabelece que a nebulosidade esteja entre 35 a 75% e para céu encoberto conforme figura 20(c), para nebulosidade de 75 a 100%.

Figura 20 – Modelos de céu



Fonte: GARROCHO; AMORIN, 2005

Para se expressar a intensidade da luz natural dentro de um ambiente, utiliza-se um método simplificado que se chama de fator de luz do dia (FLD), ou *daylight fator* (DF). Este fator relaciona a intensidade de luz recebida sob um plano de trabalho afastado do piso (geralmente na altura de uma mesa), em relação a intensidade de luz do ambiente externo. Conforme a equação 13, este fator é dado em porcentagem e permite identificar qual a porcentagem da luz externa está sendo aproveitada dentro do local iluminado (GARROCHO; AMORIN, 2005).

$$FLD = \frac{E_i}{E_0} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

FLD – Fator de luz do dia (%);

E_i – Iluminância no interior em um determinado ponto (lux);

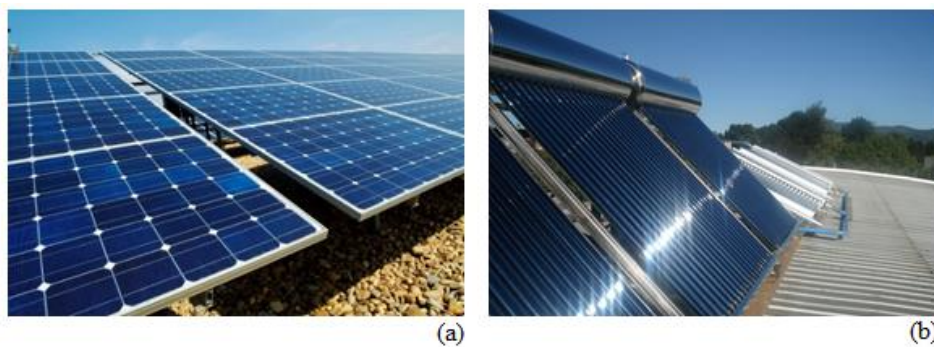
E_0 – Iluminância exterior (lux);

2.4.3 Aplicações da energia solar

O sol é uma importante fonte de energia limpa e inesgotável com alto potencial de aplicabilidade, porém este potencial ainda é muito subutilizado. A principal aplicação para energia solar atualmente explorada, é na conversão direta em energia elétrica, ou seja, nos sistemas fotovoltaicos onde, através do efeito fotoelétrico característico de alguns materiais semicondutores iluminados por fótons tem por consequência a conversão em energia elétrica (SILVA, 2014). A figura 21(a) apresenta a imagem de painéis fotovoltaicos aplicados para geração de energia elétrica.

A outra forma significativa explorada da energia solar, é no uso como fonte térmica sendo que neste caso, existem diversas formas possíveis que são subclassificadas em energia térmica de baixa temperatura na faixa inferior a 200°C (aquecimento de fluídos, destilação, refrigeração, bombas mecânicas e bombas de calor) e de alta temperatura (fontes térmicas, forno solar e produção de eletricidade através do vapor) para temperatura superiores a 200°C (SILVA, 2014). Na figura 21(b) pode ser visto a imagem de coletores solares para aquecimento de água.

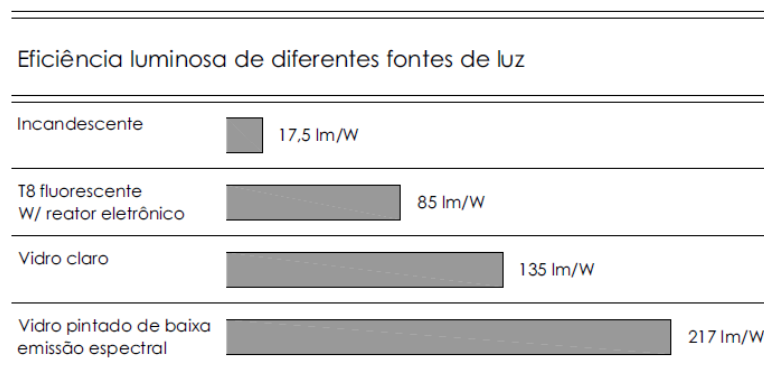
Figura 21 – Energia solar fotovoltaica (a) e energia solar fototérmica (b)



Fonte: ENERGIA ECO, 2012; ENERGÍA ESTRATÉGIA, 2015

Além das aplicações da luz solar mencionadas anteriormente, uma forma de aproveitar o potencial do sol está na luz visível para iluminação de interiores de ambientes. Apesar de pouco explorada, este tipo de energia é de grande relevância uma vez que cerca de 20 a 35% da energia consumida nas construções é para iluminação (YU; SU, 2015). O potencial solar para iluminação fica ainda mais evidente na figura 22 que demonstra a eficiência luminosa de fontes de luz artificiais comparadas com a fonte de luz natural.

Figura 22 – Eficiência luminosa de fontes de luz natural e artificial



Fonte: TOLEDO; CLAUDIA NAVES D. AMORIM, 2008

As formas mais comuns de aproveitamento da luz solar para iluminação de ambientes estão na concepção planejada da arquitetura do ambiente, ou seja, projetando janelas, portas, paredes e telhados que através da utilização de materiais translúcidos permitam o maior aproveitamento da luz natural conforme figura 23.

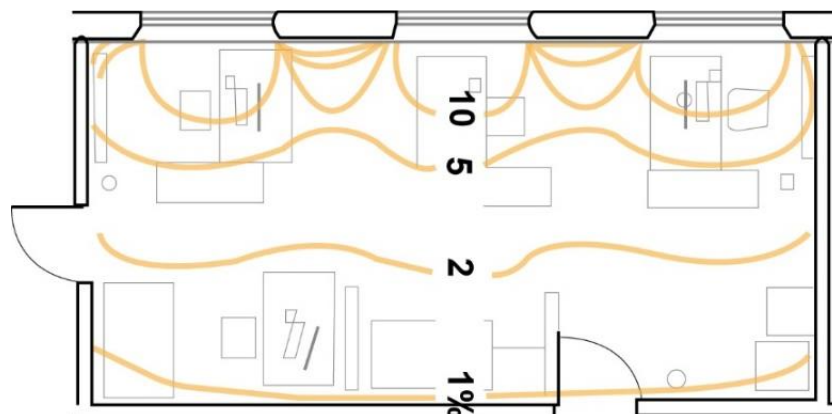
Figura 23 – Iluminação natural



Fonte: MAISARQUITETURA, 2013

Nestes casos, a iluminação natural do interior apresenta algumas questões importantes a serem consideradas antes da implementação. Primeiramente, deve-se considerar que a luz incidente diminui à medida que se analisa em direção ao centro do cômodo como pode ser visto na figura 24 que apresenta o FLD do ambiente em função da distância das janelas, problema este que é agravado em dias nublados (TREGENZA; LOE, 2015).

Figura 24 – Redução da luz em função da distância das janelas



Fonte: TREGENZA; LOE, 2015

Outro detalhe importante trata da questão da intensidade de luz sobre uma superfície que é de 6.000 a 100.000 lux, sendo um valor muito intenso para utilização no plano de trabalho. Para solucionar este problema são necessários aplicação de métodos de controle da luminosidade como por exemplo uso de brises em janelas tornando o projeto oneroso e, portanto, descartado por muitos projetistas que optam apenas pelo uso da luz artificial para iluminar o ambiente (GARROCHO; AMORIN, 2005).

Aplicações mais recentes para aproveitamento da luz natural têm surgido objetivando iluminação natural mais eficaz, com melhor conforto visual aos ocupantes e um controle solar mais eficiente (SANTOS, A. J., 2013). Uma destas tecnologias são pautadas pelo uso dos chamados tubos de luz, que são tubos capazes de conduzir a luz solar do exterior do ambiente para dentro do mesmo a partir do princípio da reflexão conforme figura 25. Nestes, a luz captada por um coletor externo geralmente localizado no telhado do ambiente, é conduzida para dentro de um tubo reflexivo que por sua leva a luz para dentro do ambiente até um difusor responsável pela distribuição uniforme da luz no espaço desejado. (JUNIOR, O. H. A. *et al.*, 2014a).

Figura 25 – Sistema de captação solar baseado em tubos de luz



Fonte: SOLATUBE, 2015

Neste tipo de sistema encontram-se excelentes vantagens como por exemplo a possibilidade de uso do melhor aproveitamento da luz durante todo o dia, e não apenas em um determinado período como nos casos da iluminação lateral. Outros fatores importantes são a possibilidade de difusão mais uniforme da luz dentro do ambiente, redução do ofuscamento quando comparado a iluminação lateral, além do excelente índice de reprodução de cor. Em relação a implementação da tecnologia ainda se tem vantagem no que tange o aspecto da

facilidade de instalação em ambientes já construídos, bastando para isso apenas algumas pequenas alterações na infraestrutura. Tomando como referência o Brasil, dentre as diversas vantagens desta tecnologia, há pelo menos uma desvantagem que causa um grande entrave na sua popularização, e esta desvantagem está no custo do produto que é aproximadamente cerca de \$515,00 para um único ponto de luz do modelo mais simples possível capaz de iluminar áreas de no máximo 19m², isso sem contar a mão de obra para instalação (JUNIOR, O. H. A. *et al.*, 2014a). Apesar do retorno rápido do investimento motivado pela alta eficiência do produto, o preço está fora da realidade de uma grande parte da população brasileira haja vista seu baixo poder econômico, onde a renda *per capita* média em 2014 conforme dados do IBGE foi de R\$1.052,00, tendo municípios que este valor atinge a marca de apenas R\$461,00 (IBGE, 2014).

2.5 ESTADO DA ARTE DE ILUMINAÇÃO NATURAL TUBULAR

O uso de iluminação de ambientes com luz natural é importante para redução do consumo de energia elétrica trazendo benefício econômico e ambiental. Além disso, a iluminação natural transforma o ambiente visualmente e termicamente mais confortável além de proporcionar benefícios a saúde motivada pelas características da radiação solar (TIWARI; AL-HELAL, 2015). Dentre as metodologias de uso da luz natural em construções, encontram-se os sistemas de guias solares utilizando tubos de luz que a partir da reflexão da luz captada por uma cúpula no telhado, direcionam a mesma para o interior do ambiente.

O uso de tubos reflexivos para fins de iluminação teve seu início nos anos 80, mais precisamente em 1986, quando um inventor australiano inovou na maneira de iluminar o interior de ambientes. A invenção foi patenteada e a empresa SOLATUBE passou a atuar na comercialização do produto desde então, evoluindo com o passar dos anos a tecnologia afim de atingir o máximo de rendimento possível (SOLATUBE, 2015).

Com o passar do tempo novas empresas surgiram e começaram a produzir e comercializar os sistemas solares para iluminação direta baseados na concepção original, porém com pequenas alterações geométricas e nos materiais utilizados. Os sistemas de tubos solares são compostos por diversas partes constituintes, e analisando apenas o tubo reflexivo que é o objeto deste estudo, nota-se que a composição material do mesmo é igual para todas as empresas como pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4 – Composição dos tubos solares comercializados atualmente

Fabricante	Composição do tubo reflexivo	Reflexão nominal (Média da faixa visível: informado pelo fabricante)	Site do fabricante
Espacio Solar (Espanha)	Alumínio com camada de prata	98%	www.espaciosolar.cpm
Velux (Portugal)	Alumínio altamente reflexivo	99%	www.velux.com
Fakro (Portugal)	Alumínio com camada de prata	98%	www.fakro.com
Natural light tubular skylights (EUA)	Alumínio com camada de prata	98%	www.nltubular.com
SOLATUBE (Austrália)	Alumínio com camada de prata	99,7%	www.solatube.com
Chatron (Portugal)	Alumínio com camada de prata	99,7%	www.chatron.pt
Solarspot (Itália)	Alumínio altamente reflexivo	99,7%	www.syneco.com.uk

A partir destas informações percebe-se que a tecnologia concebida pelo australiano em 1986, hoje já está bastante difundida e consolidada a nível internacional, sendo que entre as empresas fornecedoras deste produto não há inovações, ou seja, todas utilizam os mesmos materiais e geometrias obtendo resultados muito parecidos. Percebe-se ainda que não são citadas empresas brasileiras que produzam este tipo de tecnologia, mesmo com o elevado potencial de luz solar no país e grande necessidade de reduzir o consumo de energia elétrica.

2.5.1 Sistema de iluminação tubular comercial

A primeira patente de um sistema tubular de luz natural foi depositada em 1986 na Austrália tendo o primeiro protótipo instalado em 1987, tornando-se um produto comercial em 1991 distribuído pela empresa australiana SOLATUBE (SOLATUBE, 2015). Até os dias de hoje o produto desenvolvido passou por avanços tecnológicos buscando principalmente maximização da sua eficiência chegando na atualidade a transferir, segundo dados de catálogo, até 99,7% da luz captada. Desde o início da comercialização de produtos, a SOLATUBE expandiu seus negócios além das fronteiras Australianas tendo distribuidores de seus produtos no mundo todo, sendo que no Brasil passou a ser representada pela empresa Efilux em 2009.

A medida que a SOLATUBE ganhou mercados e a tecnologia passou a ser utilizada em todo o mundo, outros fabricantes surgiram e utilizando tecnologias semelhantes conceberam produtos análogos que hoje concorrem diretamente no mercado, impulsionados pela maior conscientização da população em relação a necessidade de economizar energia elétrica e minimizar impactos ambientais.

Sabendo que existem diferentes fabricantes dos tubos reflexivos para iluminação de ambientes, mas no entendimento de que a SOLATUBE tem a tecnologia mais consolidada pelos 25 anos de experiência, este trabalho a utilizará como referência de comparação em busca da concepção de um produto de uso final análogo, porém propondo diferentes materiais e adequando a tecnologia a esta proposição.

Conforme já mencionado, o sistema tubular de iluminação natural é composto basicamente por três partes distintas, como pode ser visto na figura 26, que juntas permitem que a luz possa ser direcionada com elevada eficiência para dentro do ambiente.

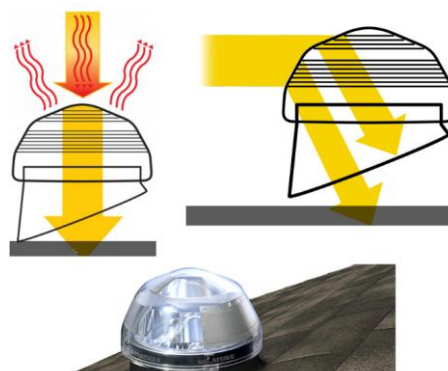
Figura 26 – Sistema de iluminação natural tubular



Fonte: SOLATUBE, 2015

O domo ou cúpula demonstrado na figura 27, responsável pela captação da luz solar, é confeccionado em acrílico com espessura de 0,125” com elevada transparência para a transmissão dos raios (92%), força mecânica para proteção de impactos e intempéries e ainda proporciona ao sistema características de isolamento acústico e baixa transmissão térmica. A tecnologia utilizada na construção desta parte integrante do sistema é chamada de *Raybender®3000* e além das características já citadas apresenta capacidade de direcionamento dos raios solares até menor ângulo de incidência garantindo assim o melhor aproveitamento diário da luz natural.

Figura 27 – Domo SOLATUBE

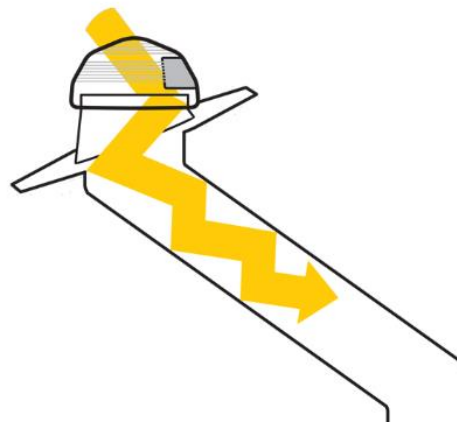


Fonte: SOLATUBE, 2015

Os tubos reflexivos (fig.28), são desenvolvidos em alumínio de 0,015” com uma camada (laminado) de prata de alta pureza aderida que lhe confere alta reflexividade

garantindo que a luz captada pela cúpula chegue até o difusor através do princípio de reflexão interna. A tecnologia *Spectralight® Infinity Tubing* da SOLATUBE chega a atingir, segundo o fabricante, índice de reflexão especular de 99,7% garantindo alto rendimento do produto.

Figura 28 – Tubo reflexivo SOLATUBE



Fonte: SOLATUBE, 2015

Por fim, os difusores (fig.29) são os elementos prismáticos responsáveis por gerar uma distribuição uniforme da luz dentro do ambiente, além de contribuir para isolamento térmica e acústica. Construídos em acrílico com espessura de 0,087”, além das funções já mencionadas, estes elementos são construídos de modo a harmonizar esteticamente com o ambiente.

Figura 29 – Difusor SOLATUBE



Fonte: SOLATUBE, 2015

2.5.2 Pesquisas Recentes

Buscando a nível acadêmico, não são encontrados também muitos trabalhos que propõe o uso de outros materiais em substituição ao alumínio prateado utilizado comercialmente. A grande maioria das pesquisas ao entorno deste assunto estão direcionadas a avaliação dos sistemas tubulares existentes, simulações, modelagens matemáticas e alterações da geometria, porém sempre mantendo o uso do alumínio com tratamento superficial em prata.

Dentre as abordagens encontradas, pode-se citar a que foi realizada no trabalho "Análise experimental do modelo em escala 1:2 de um tubo duplo de luz, como um dispositivo tecnológico inovador para transmissão de luz natural (BARONCINI *et al.*, 2010)" que propõe o desenvolvimento de um tubo duplo, ou seja, um tubo capaz de iluminar áreas subterrâneas e ao mesmo tempo zonas de passagem pelo fato de possuir um tubo transparente envolvendo o tubo interior que apresenta tecnologia análoga aos tubos comuns. Conforme a figura 30 demonstra, o tubo interior é composto por uma folha de alumínio revestida por um filme reflexivo (*3M Radiant Mirror Filme*), enquanto o tubo exterior é composto por policarbonato transparente (BARONCINI *et al.*, 2010).

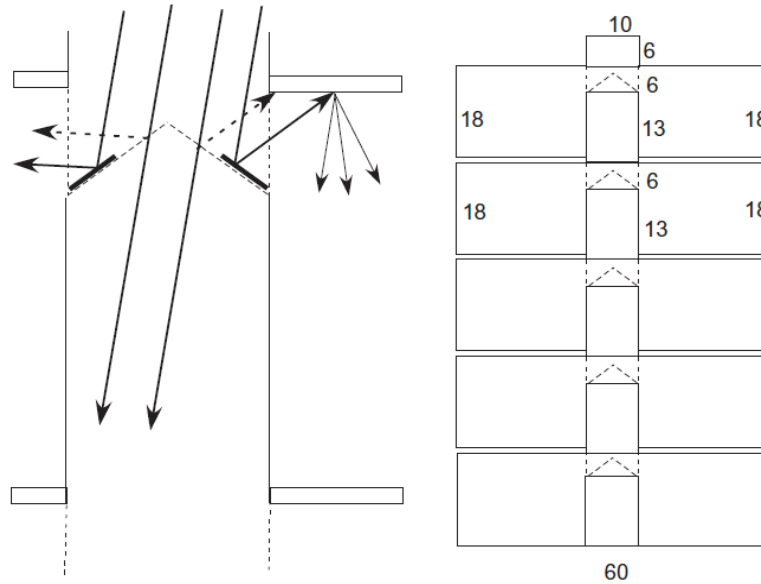
Figura 30 – Sistema proposto de iluminação por tubo duplo



Fonte: BARONCINI *et al.*, 2010

Em outra publicação (figura 31), intitulada "Métodos para iluminação de edifícios multiníveis com tubos de luz verticais", os autores propõem a análise da possibilidade de iluminação de construções em diversos níveis utilizando tubos solares mantendo a mesma quantidade de luz para cada nível. O trabalho é apenas analítico e os materiais utilizados para o tubo não entram em debate (GARCIA-HANSEN; EDMONDS, 2015).

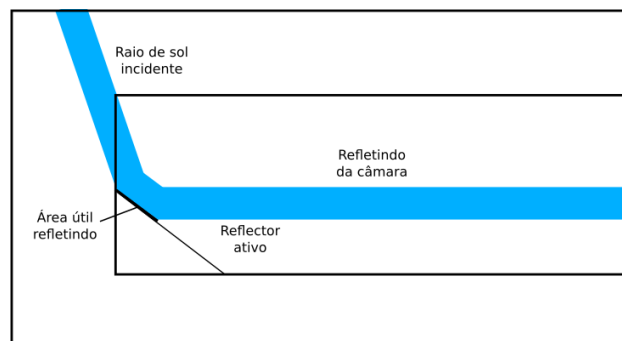
Figura 31 – Sistema proposto de iluminação multinível



Fonte: GARCIA-HANSEN; EDMONDS, 2015

Na proposta, "Funcionalidades da luz do dia e energia em um novo tipo de tubo de luz", se avalia um sistema de captação solar retangular de modo a permitir uma melhor adequação a arquitetura dos prédios. O sistema proposto conforme figura 32 neste caso tem geometria retangular diferentemente das concepções tubulares já consolidadas, porém é composto por alumínio com metalização em prata, ou seja, mesmo material utilizado (CANZIANI; PERON; ROSSI, 2004).

Figura 32 – Sistema proposto de iluminação retangular

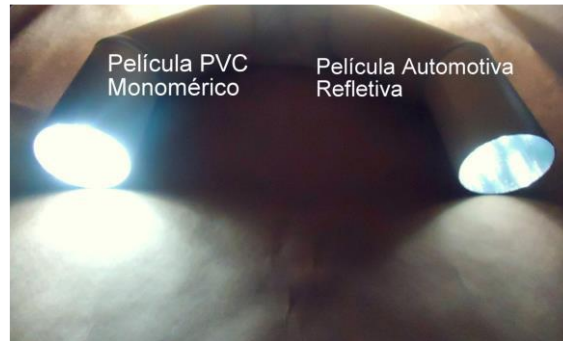


Fonte: CANZIANI; PERON; ROSSI, 2004

Por fim, apresentado na figura 33, a proposta intitulada "Proposta de um sistema alternativo para captação da luz solar de baixo custo para inserção no mercado Brasileiro" propõe o desenvolvimento de um sistema de captação solar de baixo custo utilizando o PVC como material estrutural do tubo e película refletiva alocada no interior do mesmo

objetivando garantir a reflexão. Os testes realizados utilizaram películas automotivas refletivas e películas de PVC monomérico refletivas para avaliação do rendimento (JUNIOR, O. H. A. *et al.*, 2014b).

Figura 33 – Sistema proposto de iluminação retangular



Fonte: ANDO JUNIOR *et al.*, 2014b

Outras abordagens sobre iluminação natural utilizando tubos solares são encontradas em publicações conforme apresentado nas tabelas 5.

Tabela 5 – Trabalhos publicados sobre iluminação natural tubular

Autores	Título (Periódico)	Proposta do trabalho
(SWIFT, P. D. D.; SMITH, 1995)	<i>Cylindrical mirror light pipes (Elsevier – Solar Energy Materials and Solar Cells)</i>	Avaliação da refletividade em tubos solares a partir de análise por esfera integradora
(AL-MARWAEI; CARTER, 2006)	<i>Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances (Elsevier – Applied Energy)</i>	Revisão crítica dos métodos de iluminação zenital existentes
(ÖNGÜÇ ÖZGÜN, 2007)	<i>Tubular light guidance systems as advanced daylighting strategy (Istambul Technical University)</i>	Avaliação de sistemas de iluminação tubulares utilizando software SkyVision e outros software com mesma função
(SWIFT, P. D. <i>et al.</i> , 2008)	<i>Rectangular-section mirror light pipes (Elsevier – Solar Energy Materials and Solar Cells)</i>	Modelagem de sistemas reflexivos retangulares com esfera integradora
(KOCIFAJ, 2009)	<i>Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing (Elsevier – Solar Energy Materials and Solar Cells)</i>	Modelagem da transmissão da luz em tubos solares
(SWIFT, P. D., 2010)	<i>Splayed mirror light pipes (Elsevier – Solar Energy Materials and Solar Cells)</i>	Modelagem de sistemas reflexivos retangulares

Tabela 5 – Continuação

Autores	Título (Periódico)	Proposta do trabalho
(EDMONDS, 2010)	<i>Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section (Elsevier – Solar Energy Materials and Solar Cells)</i>	Definição de expressões para cálculo da transmissão de luz em sistemas reflexivos, triangulares, retangulares romboédricas e hexagonais
(KIM, J. T.; KIM, G., 2010)	<i>Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment (Elsevier – Building and Environment)</i>	Visão geral dos dois sistemas de iluminação natural ópticas (tubo de luz sistemas e sistemas de espelhos)
(VERSO, LO; PELLEGRINO; SERRA, 2011)	<i>Light transmission efficiency of daylight guidance systems: An assessment approach based on simulations and measurements in a sun/sky simulator (Elsevier – Solar Energy Materials and Solar Cells)</i>	Caracterização do desempenho fotométrico de sistemas de orientação luz tubulares em termos de luz
(MALET-DAMOUR, B. et al., 2014)	<i>Light Pipes Performance Prediction: inter model and experimental confrontation on vertical circular light-guides (Elsevier – Energy Procedia)</i>	Modelagem e análise experimental de tubos solares verticais
(GIL-MARTÍN et al., 2014)	<i>Study of light-pipes for the use of sunlight in road tunnels: From a scale model to real tunnels (Elsevier – Tunnelling and Underground Space Technology)</i>	Avaliação da aplicação de tubos de luz em iluminação de túneis
(ŠIKULA; MOHELNÍKOVÁ; PLÁŠEK, 2014)	<i>Thermal analysis of light pipes for insulated flat roofs (Elsevier – Renewable and Sustainable Energy Reviews)</i>	Análise térmica de tubos solares utilizados em telhados
(MAYHOUB, 2014)	<i>Innovative daylighting systems challenges: A critical study (Elsevier – Energy and Buildings)</i>	Análise sobre as tecnologias de utilização da luz natural existentes
(SHUXIAO; JIANPING; LIXIONG, 2015)	<i>Research on energy saving analysis of tubular daylight devices (Elsevier – Energy Procedia)</i>	Apresentação de um modelo para avaliação de eficiência dos sistemas tubulares
(PIRASACI, 2015)	<i>Investigation of laminar natural convection heat transfer within tubular daylighting devices for winter conditions (Journal of Building Engineering)</i>	Estudo experimental e numérica sobre a convecção natural laminar em TDD para condições de Inverno.
(CIUGUDEANU; BEU, 2016)	<i>Passive Tubular Daylight Guidance System Survey (Elsevier – Procedia Technology)</i>	Estudo de caso da instalação de um TDGS em Cluj-Napoca (Roménia)

Tabela 5 – Continuação

(MALET-DAMOUR, Bruno <i>et al.</i> , 2016)	<i>Study of tubular daylight guide systems in buildings: Experimentation, modelling and validation (Elsevier – Energy and Buildings)</i>	Proposição de um novo modelo de análise mais preciso para validar os TDGS em edifícios
(SAPIA, 2013)	<i>Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber (Elsevier – Solar Energy Materials and Solar Cells)</i>	Proposição de um sistema híbrido de iluminação natural utilizando fibra óptica e concentrador solar

As abordagens desta seção, permitem afirmar, que a busca por novas oportunidades de aumento da eficiência da energia elétrica é cada vez mais bem-vinda em um cenário mundial onde este insumo é vital para a população. Aliado a essa certeza também é inquestionável a necessidade de desenvolvimento de tecnologias de menor custo para garantir o acesso a maior parte da população permitindo o consumo deste produto em escala. Estas duas premissas centrais, por si só já são motivadoras para o desenvolvimento da proposta apresentada que respaldada pela pesquisa de anterioridade demonstram que nenhuma abordagem aprofunda-se na linha de utilização de polímeros para iluminação de ambientes utilizando luz natural.

Como foi mostrado na tabela 5 não há produtos ou estudos que seguem a mesma linha abordada neste trabalho, ou seja, na concepção de tubos reflexivos para sistemas de iluminação natural, utilizando polímeros com revestimentos metálicos. Enquanto os fabricantes utilizam de forma geral os mesmos materiais (alumínio metalizado com prata ou alumínio de alta reflexividade), os estudos científicos neste tema avaliam outras geometrias, questões relacionadas a metodologias de cálculo de desempenho, modelagens experimentais, análise térmica, dentre outros.

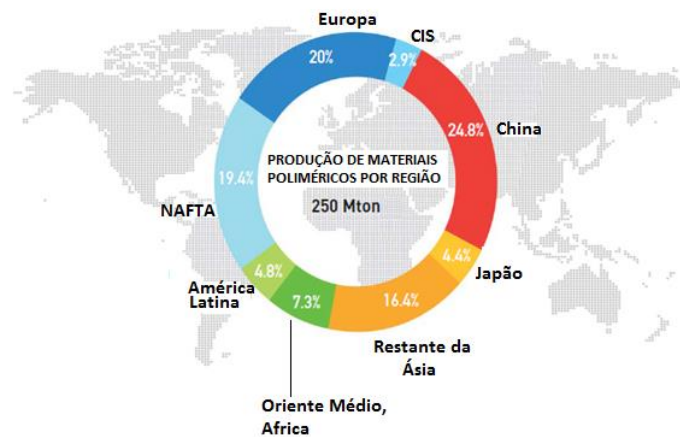
No presente estudo será avaliada uma nova arquitetura para o tubo solar constituído por um substrato polimérico metalizado a vácuo.

2.6 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Derivado da palavra grega, *plástikos* que significa algo que possa ser moldado, os polímeros podem ser de origem sintética como os derivados do petróleo, ou de origem natural como os derivados da cana de açúcar por exemplo. Os polímeros tem uma importante

participação no mercado mundial (figura 34) , são classificados em termoplásticos quando permitem ser moldados várias vezes através do processo de aquecimento e moldagem, e termofixos que quando moldados a primeira vez sofrem reações químicas alterando sua estrutura impedindo-os de serem moldados novamente e portanto não podem ser reciclados (PIATTI; RODRIGUES, R. A. F., 2005).

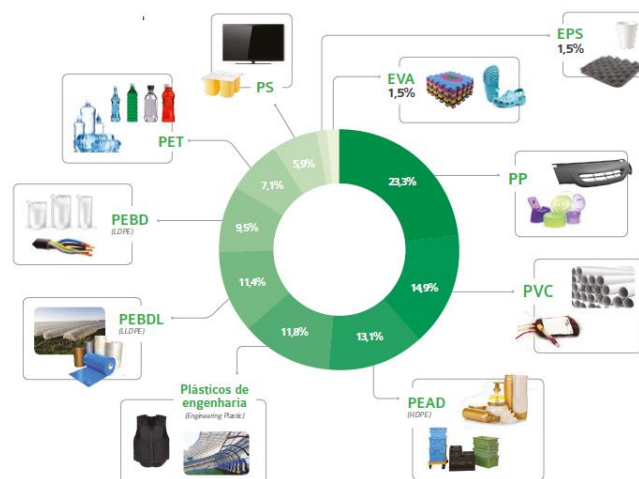
Figura 34 – Ranking mundial de produção de polímeros em 2013



Fonte: PLASTICSEUROPE, 2015

Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), em 2013, o Brasil teve uma produção de 6,42 milhões de toneladas de polímeros e teve um consumo de 6,42 milhões de toneladas. As aplicações dos polímeros estão nos mais diversos produtos da cadeia produtiva conforme apresentado na figura 35 (ABIPLAST, 2014).

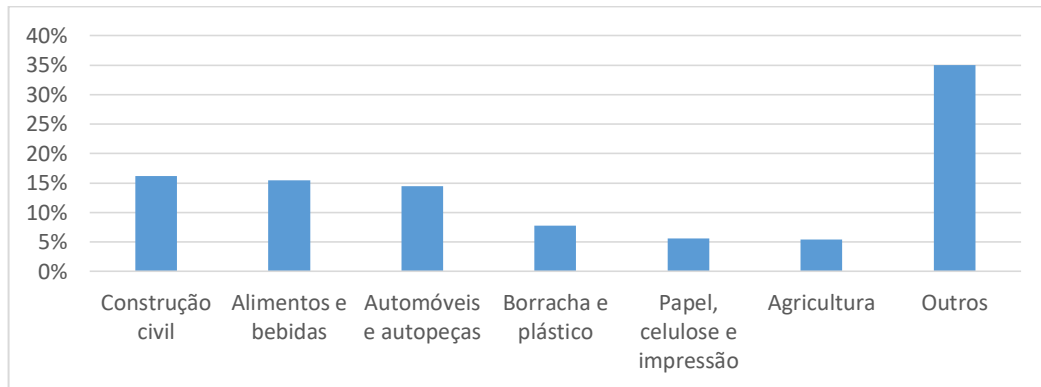
Figura 35 – Aplicações dos polímeros por tipo em 2012



Fonte: ABIPLAST, 2014

A figura 36 apresenta um ranking dos setores da economia que apresentam maior consumo de polímeros, bem como seu consumo.

Figura 36 – Principais setores da economia consumidores de polímeros



Fonte: FRAGA, 2014

Conforme estrutura química obtida pelo processo de polimerização, o polímero tem características e aplicabilidades específicas, sendo classificados conforme a tabela 6.

Tabela 6 – Materiais poliméricos, suas características e aplicações

Nome	Sigla	Características	Aplicações
Policloreto de vinila	PVC	Maior rigidez, tenacidade, excelentes propriedades elétricas, boa resistência a exposição ao tempo, a umidade e a agentes químicos. Baixa resistência ao calor e custo reduzido.	Embalagens para água mineral, óleos comestíveis, maioneses, sucos. Perfis para janelas, tubulações de água e esgotos, mangueiras, embalagens para remédios, brinquedos, bolsas de sangue, material hospitalar, etc.
Poliétileno de baixa densidade	PEBD	Maior flexibilidade e tenacidade. Excelente resistência química e propriedades elétricas (condutividade).	Sacolas para supermercados e lojas, filmes para embalar leite e outros alimentos, sacaria industrial, filmes para fraldas descartáveis, bolsa para soro medicinal, sacos de lixo, etc.
Polipropileno	PP	Equilíbrio das propriedades térmicas, químicas e elétricas (condutividade), acompanhadas de resistência moderada.	Filmes para embalagens e alimentos, embalagens industriais, cordas, tubos para água quente, fios e cabos, frascos, caixas de bebidas, autopeças, fibras para tapetes e utilidades domésticas, potes, fraldas e seringas descartáveis, etc.

Fonte: ALBUQUERQUE, 2000; PIATTI; RODRIGUES, R. A. F., 2005

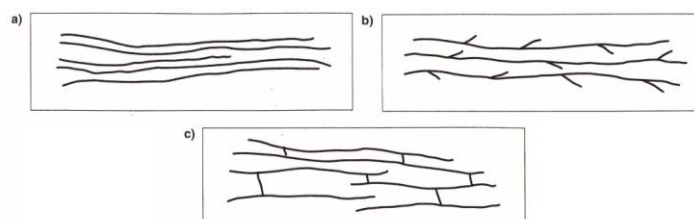
Tabela 6 – Continuação

Nome	Sigla	Características	Aplicações
Poliestireno	PS	Baixo custo, fácil processamento, transparência cristalina, baixa absorção de umidade, baixa resistência ao calor.	Potes para iogurtes, sorvetes, doces, frascos, bandejas de supermercados, geladeiras (parte interna da porta), pratos, tampas, aparelhos de barbear descartáveis, brinquedos, etc.
Poliétileno tereftalato	PET	Excelente estabilidade dimensional, tenacidade e resistência química (exceto por fortes ácidos e bases), sensibilidade a fendilhamentos.	Frascos e garrafas para uso alimentício/hospitalar, cosméticos, bandejas para micro-ondas, filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis, etc.
Poliétileno de alta densidade	PEAD	Excelente resistência e maior rigidez, leve, de fácil processamento e baixo custo. Excelente resistência química e propriedades elétricas (condutividade).	Embalagens para detergentes e óleos automotivos, sacolas de supermercados, garrafeiras, tampas, tambores para tintas, potes, utilidades domésticas, etc.
Acrilonitrila Butadieno Estireno	ABS	Excelentes resistência mecânica, resistência ao impacto e dureza. Bom aspecto visual e facilidade de moldagem	Carcaças de eletrodomésticos, peças automotivas, capacetes, etc.

Fonte: ALBUQUERQUE, 2000; PIATTI; RODRIGUES, R. A. F., 2005

Durante o processo de polimerização que dá origem aos polímeros, formam-se as chamadas cadeias poliméricas (figura 37) que são as ligações moleculares que constituem os diversos tipos de polímeros e que após serem formadas não podem ser alteradas (CANEVAROLO JR., 2006; MANO; MENDES, 1999). Conforme o tipo de cadeia polimérica formada há diferença nas características físicas dos polímeros, principalmente no que tange a fusibilidade e a solubilidade (PIVA; WIEBECK, 2004).

Figura 37 – (a) Cadeia sem ramificação (b) Cadeia com ramificações (c) Cadeia reticulada



Fonte: MANO; MENDES, 1999

A temperatura de fusão (T_f) determina de forma teórica, a maior temperatura suportada pelo polímero antes que ele entre na mudança de estado físico. A temperatura de transição vítrea (T_v) por sua vez, determina a temperatura mínima suportada pelo polímero antes do bloqueio do movimento da cadeia polimérica, tornando o material “quebradiço”. Assim, a cadeia polimérica, a temperatura de fusão e a temperatura vítrea são fundamentais para definição acerca do processo de conformação a ser utilizado (PIVA; WIEBECK, 2004). Na tabela 7 são apresentadas as temperaturas de fusão e vítrea dos principais polímeros.

Tabela 7 – Valores da temperatura de fusão e vítrea dos principais polímeros

Polímero	T_f (°C)	T_v (°C)
PEAD	137	-120
PEBD	11	-120
PP	165 a 175	-10
PS	220	100
ABS	175	-73

Fonte: PIVA; WIEBECK, 2004

2.7 METALIZAÇÃO DE POLÍMEROS

A metalização de materiais poliméricos consiste na deposição de filmes metálicos sobre substratos de polímeros e tem objetivos decorativos e/ou funcionais. A deposição destes filmes metálicos permite conferir aos polímeros características que não lhes são “nativas”, como reflexividade, condutividade elétrica, resistência à abrasão dentre outras (KÜCHLER, 2006).

O setor automotivo utiliza a metalização de polímeros como alternativa para redução do peso dos veículos através do uso do polímeros em substituição aos materiais metálicos (DEYNA, 2015). A metalização dá ao polímero estética que permite visualizá-lo como um metal, além disso, garante proteção mecânica em alguns casos, reduz atrito com particulados externos e em outros casos utiliza-se de suas características reflexivas como justificativa para seu uso, como é o caso dos refletores dos faróis (DEYNA, 2015). Dentre os métodos utilizados na metalização de polímeros encontram-se a metalização indireta, pintura metálica,

eletrodeposição, metalização a vácuo, cada qual com suas características (BADOTTI, 2003; DEYNA, 2015; KÜCHLER, 2006).

A metalização indireta, como o próprio nome sugere ocorre indiretamente, ou seja, a superfície metálica não é diretamente aderida a superfície do material e sim em uma película metalizada que posteriormente é aderida no mesmo (KÜCHLER, 2006). Este tipo de método é utilizado pela SOLATUBE onde a folha de alumínio que serve de base de sustentação recebe a película metalizada com prata de alta pureza.

A eletrodeposição ou galvanoplastia é o processo de deposição metálica através de banhos químicos ou eletroquímicos permitindo metalizar superfícies metálicas ou poliméricas com elementos como cádmio, cobre, níquel, estanho, ouro, prata, cromo ou zinco (RIANI, 2008). Quando comparada com processos utilizando vácuo, a galvanoplastia é uma técnica de menor custo, porém gera como subprodutos, efluentes nocivos ao meio ambiente e à saúde das pessoas por conter metais tóxicos em quantidades maiores que as permitidas pela legislação (GOETTEN; SANTOS, G. T. Dos; GÜNDEL4, 2015; PALÁCIO *et al.*, 2013).

A pintura em alguns casos apresenta-se também como uma solução para metalização de peças consistindo na aplicação direta da solução (tinta) contendo partículas metálicas na superfície da peça que se deseja metalizar. Neste processo, é importante que a solução e a superfície tenham afinidade química, garantindo assim a aderência e uniformidade (DEYNA, 2015).

A metalização a vácuo por sua vez é obtida pelo processo de deposição física de vapor ou PVD (*Physical Vapour Deposition*) é um processo que consiste na transformação do material a ser depositado em vapor dentro de uma câmara de vácuo e transporte até o material da peça a ser depositada (substrato) ativado por um plasma (MARTINHO, 2009). O PVD dentre suas vantagens, tem capacidade de depositar revestimentos de vários tipos em substratos de qualquer material, permitem a metalização de peças com geometrias simples ou complexas, além de apresentarem baixo grau de agressividade ao meio ambiente (KÜCHLER, 2006). Os processos de metalização a vácuo diferem pelo tipo de energia que utilizam, podendo ser por evaporação no vácuo ou deposição iônica (*ion plating*) sendo neste caso o calor que promove a evaporação do material, ou pela projeção catódica chamado de *sputtering* que trata-se do bombardeamento entre íons de gás (geralmente argônio) e os átomos que constituem o substrato alvo (MARTINHO, 2009).

O método de evaporação no vácuo consiste na aplicação de uma camada muito fina de metal, por meio da evaporação do metal em baixa pressão, numa câmara de vácuo, que

evita o acúmulo de impurezas na aplicação. O material é aquecido através do efeito joule em um eletrodo, gerando vapores que condensam sobre a superfície que deseja-se cobrir.

Já no método de sputtering convencional, dois eletrodos são ligados a uma diferença de potencial elétrica com uma corrente contínua, câmara de baixa pressão e gás argônio, onde o cátodo está atrás do material a ser transmitido, e o ânodo está atrás do objeto a ser aplicado o material. Com o movimento de elétrons entre o cátodo e o ânodo, átomos do material são conduzidos através da energia cinética até a superfície de aplicação. A desvantagem deste método é a perda de energia cinética e desvios pelo choque com o gás argônio, como consequência gerando um baixo rendimento comparado com outros métodos de sputtering e uma alta temperatura. O método magnetron sputtering tem o mesmo sistema do método de sputtering convencional, com o adicional de conter ímãs próximos ao cátodo que geram um campo magnético que direcionam a movimentação dos elétrons, gerando um melhor rendimento da aplicação de material na superfície.

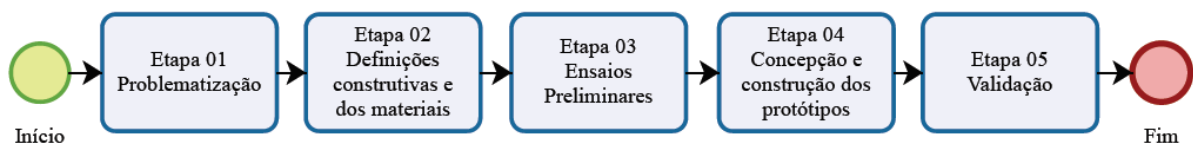
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de desenvolvimento do projeto através da abordagem detalhada de cada etapa.

3.1 METODOLOGIA APLICADA

A presente pesquisa aplicada será conduzida através de desenvolvimento experimental e validação comparativa com um produto comercial para comprovação das hipóteses inicialmente levantadas. O detalhamento da proposta acontece através da execução de etapas com objetivos parciais que convergem para a consolidação da tese formulada. A figura 38 apresenta um fluxograma com as etapas em ordem cronológica de desenvolvimento da proposta.

Figura 38 – Fluxograma do processo de execução do trabalho



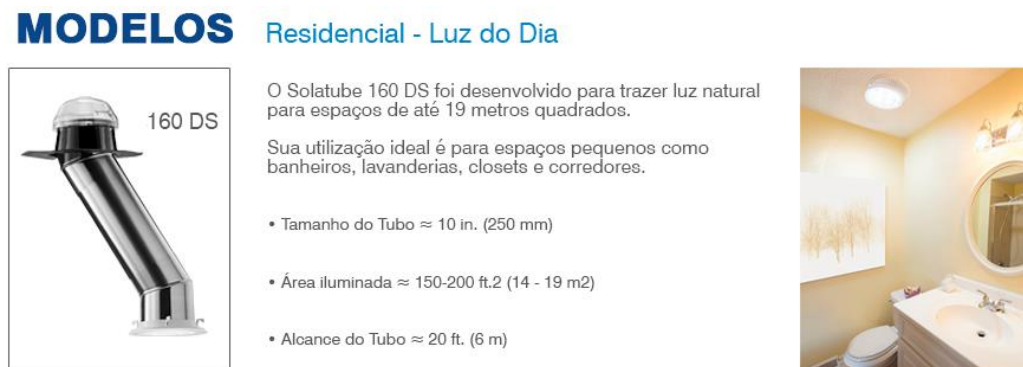
3.2 ETAPA 01 – PROBLEMATIZAÇÃO

Tendo em vista o excelente potencial solar no território brasileiro em virtude de sua posição geográfica, e da crescente necessidade de melhoria da eficiência energética e uso racional da energia elétrica, o presente trabalho propõe o desenvolvimento do protótipo de um tubo reflexivo para uma luminária de luz solar direta de baixo custo utilizando materiais poliméricos. Busca-se com a construção de protótipos do tubo reflexivos e através de ensaios específicos, identificar a viabilidade técnica da construção do sistema proposto produto com vistas a sua disseminação motivada pelo menor custo quando comparado ao produto referência.

De forma geral, os sistemas de iluminação tubular são compostos por três elementos principais (domo, tubo reflexivo e difusor) com funções de captar a luz solar, minimizando a transferência acústica e térmica para o ambiente, conduzindo a luz com máxima eficiência distribuindo-a de forma mais homogênea possível. Estas características funcionais são resultantes de diferentes tecnologias aplicadas em cada um dos elementos do conjunto, o que evidencia o extenso estudo embarcado neste tipo de luminária. Buscando delimitar o estudo, a presente proposta tem enfoque voltado para concepção apenas do tubo reflexivo vislumbrando a concepção de um produto de menor custo, com características análogas ao produto comercial de referência, porém construído com polímeros, culminando na construção de protótipos para testes de validação e avaliação de viabilidade técnica.

O produto de referência utilizado neste estudo será o sistema de iluminação natural da SOLATUBE conforme justificado anteriormente, representado pelo modelo 160DS (fig.39).

Figura 39 – SOLATUBE modelo 160DS (Referência)



Fonte: EFILUX, 2016

Algumas características técnicas do tubo reflexivo de referência, que servirão de balizadores da proposta, são apresentadas na tabela 8 com dados retirados de catálogo disponibilizados no site do fabricante.

Tabela 8 – Especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante (tubo reflexivo)

Parâmetro	Especificação
Diâmetro do tubo	250mm
Espessura do tubo	0,4mm
Material da estrutural	Alumínio
Material reflexivo	Prata
Reflexão nominal	99,70%

3.3 ETAPA 02 – DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS E DOS MATERIAIS

Conhecido, portanto o sistema comercial com suas características básicas, segue-se propondo uma solução com características semelhantes, porém utilizando materiais poliméricos que permitam a produção de tubos reflexivos de menor custo com benefícios desejáveis, e ainda que tenha rendimentos menores em relação à referência, atendam minimamente ao que se propõe.

3.3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

O tubo reflexivo proposto será construído basicamente com a utilização de dois materiais distintos, um deles sendo utilizado na construção estrutural do tubo e o outro material será o da camada que cobrirá o interior do tubo para garantir a reflexão.

3.3.1.1 Materiais: Parte estrutural

Para a concepção de um produto de menor custo, busca-se nos polímeros a solução para substituição do alumínio. A utilização de polímeros deve garantir o atendimento mínimo dos parâmetros (reflexividade, adesão e resistência mecânica) que possa assegurar a aplicabilidade da proposta.

Os materiais inicialmente selecionados para o estudo, serão alguns dos principais polímeros comercializados, ou seja, o Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Seguindo a linha da utilização de materiais de baixo custo, foram realizados testes também nos materiais acima descritos na versão reciclada.

Foram usados portando no presente trabalho materiais poliméricos virgem e reciclados de PP, PS, PEAD, PEBD e ABS. A figura 40 apresenta uma amostra dos polímeros adquiridos para execução do projeto, onde nota-se que os mesmos são comercializados em grânulos.

Figura 40 – Matérias primas (virgens e recicladas)



Os materiais reciclados foram adquiridos de uma empresa que coleta materiais derivados de lixo urbano, fazendo-o passar pelo processo limpeza, moagem, extrusão e granulação. É importante ressaltar que o uso de materiais reciclados derivados de resíduos urbanos, traz consigo a dúvida quanto a repetibilidade do produto no caso de uma produção em larga escala, pois dependendo do lote material reciclado haverá uma mudança em algumas características do mesmo.

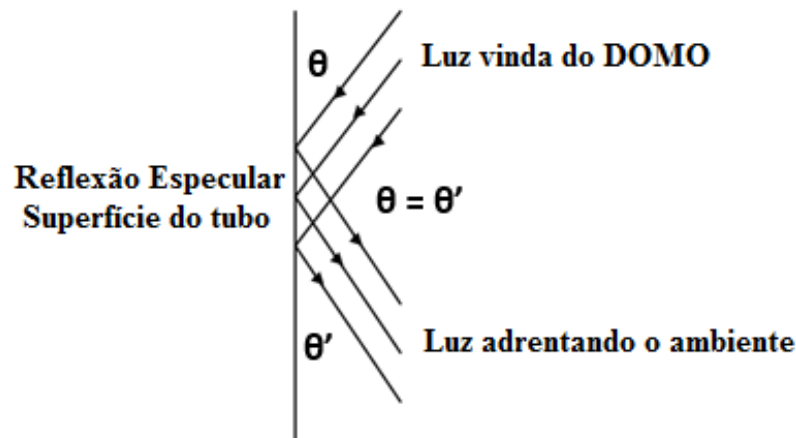
3.3.1.2 Materiais: Parte reflexiva

O tubo reflexivo do produto referência (SOLATUBE 160DS), é formado por uma folha de alumínio de 0,4mm de espessura que serve como base de sustentação para uma película muito fina de prata de alta pureza (tecnologia *Spectralight® Infinity Tubing* protegida por patente) fixada no interior do tubo, que para este caso tem um diâmetro de 250mm. Esta película tecnológica de prata garante a alta capacidade de reflexão chegando a 99,7% segundo o fabricante, e tornando o produto um dos melhores do mercado (SOLATUBE, 2015).

Com a definição do polímero como base de sustentação do tubo proposto, é necessário idealizar uma solução para garantir que o mesmo tenha características de reflexão interna de modo a realizar a função esperada. Antes de mais nada é importante lembrar que para garantir que a luz seja conduzida para dentro do ambiente através da reflexão, a superfície deve ter elevada reflexão especular, pois conceitualmente neste tipo de reflexão o

ângulo de saída do raio incidente é igual ao ângulo de entrada (TIPLER; MOSCA, 2006). Desta forma, quando um raio de luz solar que ultrapassa o domo, bate na superfície interior do tubo com determinado ângulo e reflete para baixo direcionando-se para dentro do ambiente (fig.41).

Figura 41 – Princípio da reflexão aplicada a proposta



Fonte: adaptado de TIPLER; MOSCA, 2006

Há que se considerar que os raios refletidos não se resumem apenas a reflexão especular sendo que há também uma parcela relativa a reflexão difusa que em parte se soma com a reflexão especular adentrando o ambiente. Porém, de forma a garantir o maior rendimento do sistema, é importante que a superfície tenha máxima reflexão especular possível.

Uma maior reflexão especular é conseguida com a menor rugosidade da superfície, uma vez que este parâmetro influencia na capacidade de reflexão da mesma em função do ângulo de entrada da luz, assim, quanto menor a rugosidade maior será a sua capacidade de reflexão independente do ângulo de entrada (SUTTER *et al.*, 2016). Para se conseguir, portanto uma baixa rugosidade da superfície, recorre-se ao setor automotivo que utiliza de diferentes métodos para agregar superfícies reflexivas para as peças poliméricas. O principal processo para obtenção destas características é a metalização que consiste no revestimento de superfícies através de deposição de metais fundidos (RODRIGUES, L. *et al.*, 2014).

Para a aplicação proposta, foram testados os processos de metalização à vácuo por evaporação no vácuo e por projeção catódica, que apresentam efetividade maior na ionização dos gases garantindo maior densidade do filme depositado e boa aderência (WENGINOWICZ, 2007). Conforme já mencionado, nos processos de metalização por PVD

há a uma grande gama de revestimentos possíveis (ouro, prata, cobre, alumínio, cromo, etc.). No presente trabalho, visando obter um produto de baixo custo e elevada reflexão, foram testados revestimentos de alumínio e cromo.

Algumas amostras ensaiadas neste trabalho bem como o protótipo do tubo reflexivo, passaram pelo processo de metalização na empresa Nanoplas Precision Machine localizada em Taquaras – RS utilizando o equipamento apresentado na figura 42 para metalização a vácuo com alumínio pelo processo de projeção catódica.

Figura 42 – Equipamento para metalização a vácuo (projeção catódica)



Neste processo, antes de depositar-se o filme metálico, as amostras passam por um processo de limpeza com ultrassom pelo período de cinco minutos para eliminar impurezas. Após a limpeza, as peças foram submetidas a deposição atingindo uma camada de aproximadamente 67nm (informado pelo prestador do serviço). Os parâmetros de deposição são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros da metalização (projeção catódica)

Parâmetros	Valores
Pressão da câmara	2,0 E-5Torr
Pressão de trabalho	1,2 E-3Torr
Fluxo argônio	125 cm ³ /m
Tensão elétrica	520V
Corrente elétrica	2,2A
Distância da amostra ao alvo	20 cm

Sendo o trabalho comparativo, amostras de mesmas dimensões foram metalizadas também por projeção iônica na empresa Metalclean localizada em São Paulo – SP. Por questões de segredo industrial a empresa não forneceu maiores informações sobre o equipamento utilizado para a realização do serviço.

Neste processo, antes de depositar-se o filme metálico, as amostras passam por um processo de limpeza eliminando as impurezas da superfície, aplicação de verniz primer e posterior deposição na câmara. Após preparação, dentro da câmara, os substratos receberam um filme fino de aproximadamente 10 a 15 μ m (informado pelo prestador do serviço). Os parâmetros de deposição são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros da metalização por de posição iônica (evaporação no vácuo)

Parâmetros	Valores
Pressão da câmara	8,0 E-5Torr
Pressão de trabalho	1,2 E-3Torr
Tensão elétrica	12V
Corrente elétrica	1900A
Distância da amostra ao alvo	26 cm

3.3.2 DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS

Para permitir uma análise comparativa, o tubo proposto tem formato circular com diâmetro de 250 mm, igual ao produto de referência. Porém, é importante lembrar que as metalizações internas dos tubos utilizam o processo de PVD, e devido a limitações do processo não é possível metalizar o interior de um tubo, exceto através do desenvolvimento de ferramentas específicas para tal onerando bastante o custo do protótipo. Desta forma a solução encontrada é a confecção dos tubos em partes que permitam a metalização individual de cada uma delas e posterior montagem formando o tubo idealizado.

O processo de fabricação de tubos poliméricos é chamado de extrusão que é um processo contínuo capaz de produzir além de tubos, também placas, filmes até perfis de geometrias mais complexas (MICHAELI *et al.*, 1995). Entretanto, para a proposta, como o tubo é construído de forma fracionada, ou seja, por peças individuais, o método de construção escolhido foi o processo de injeção, por ser um processo utilizado principalmente quando se deseja a construção de peças, seja ela de geometria simples ou complexa, em etapa única

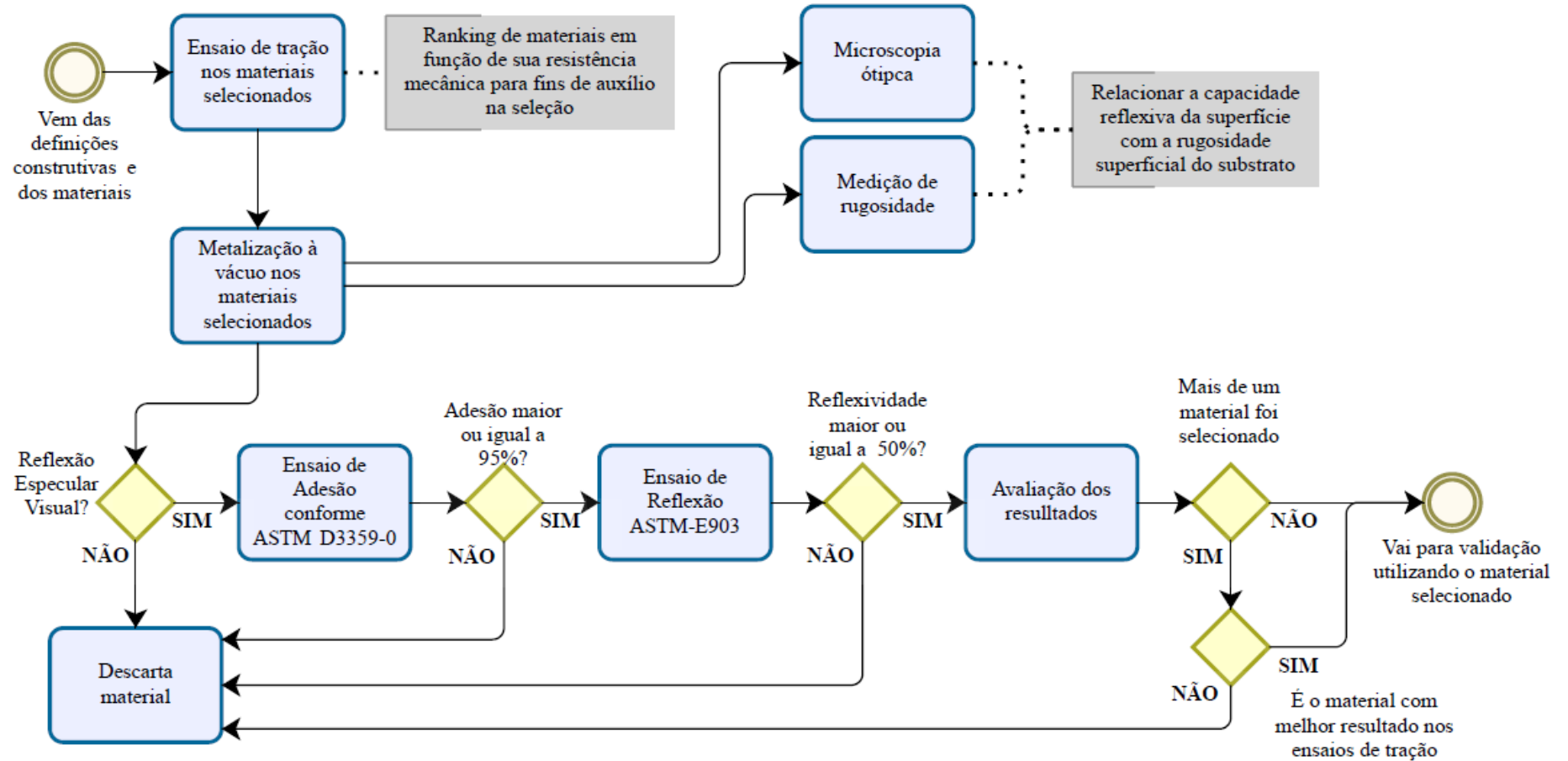
(MICHAELI *et al.*, 1995). As dimensões das peças concebidas por sua vez observaram outro limitante, que neste caso é o da capacidade de injeção da máquina injetora utilizada neste projeto.

3.4 ETAPA 03 – ENSAIOS PRELIMINARES

Definido, portanto, que o material do tubo utilizado é um polímero (PS, PP, PEBD, PEAD ou ABS) virgem ou reciclado, e que a parte interna do tubo é metalizada a vácuo com cromo ou alumínio, foram realizados ensaios preliminares (conforme figura 43) com o objetivo de identificar dentre o range de materiais pré-selecionados, qual (is) tem as características que mais se adequam ao objetivo final para em etapa posterior serem utilizados na construção de protótipos para validação.

Os testes apresentados no fluxograma foram executados para diferentes materiais poliméricos metalizados primeiramente por evaporação no vácuo e posteriormente por projeção catódica. Assim foram construídos dois protótipos para validação, sendo um para cada tipo de PVD utilizado. Verifica-se também no fluxograma que os principais ensaios realizados para seleção dos materiais, foram norteados por padrões normativos de modo a garantir resultados confiáveis e que possam ser validados. Os ensaios de resistência mecânica realizados através de máquina de tração foram realizados seguindo os preceitos da norma ASTM D638 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*). Os ensaios de adesão para verificar a aderência do filme metálico no substrato seguiram os padrões determinados pela norma ASTM D3359-09 (*Crosshatch and Tape Pull Test*). Por fim os ensaios de reflexão, que permitiram verificar a efetiva capacidade de reflexão da luz pelos materiais ensaiados, seguiram as orientações da norma ASTM E903 (*Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*).

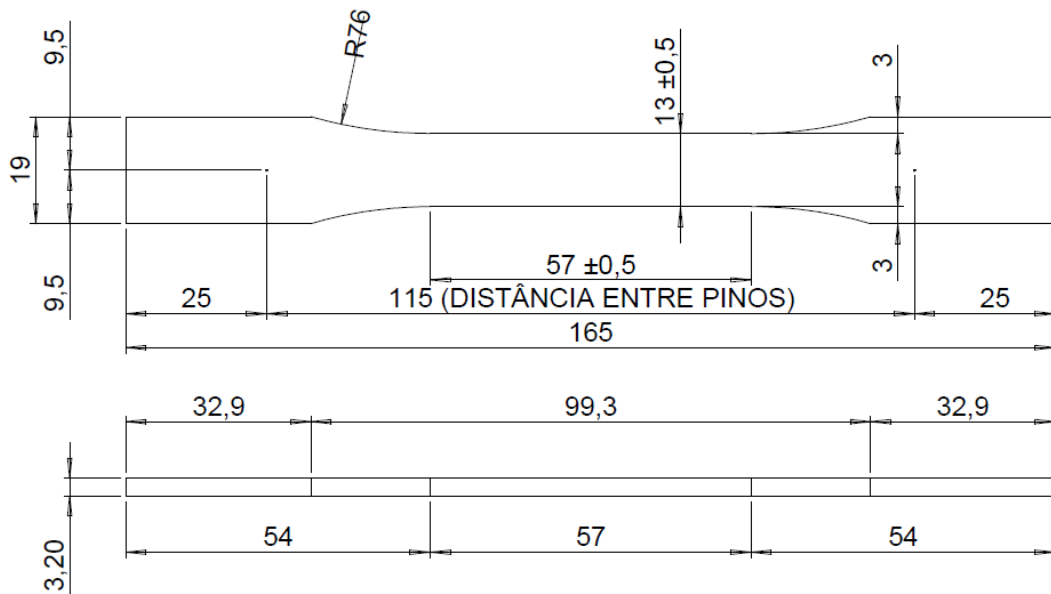
Figura 43 – Fluxograma de execução dos ensaios preliminares



3.4.1 Ensaios de tração

Para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais poliméricos selecionados, realizaram-se ensaios de tração segundo a norma ASTM D638 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*). Com este ensaio foi possível conhecer propriedades mecânicas permitindo a comparação com os mesmos parâmetros do material do produto de referência. O primeiro passo para realização do ensaio é a confecção dos corpos de prova com dimensões especificadas pela norma de forma a padronizar os ensaios conforme ilustrado na figura 44.

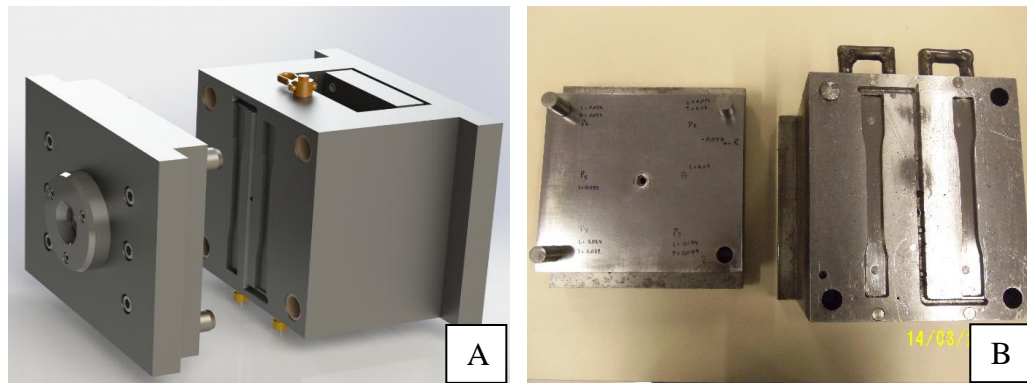
Figura 44 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração (ASTM D638)



Uma vez definido na seção 3.3.2 que o protótipo do tubo seria manufacturado em partes pelo processo de injeção, os corpos de prova confeccionados precisaram ser produzidos pelo mesmo processo pois para diferentes processos produtivos há variação das características gerando assim resultados que não representam a realidade do produto produzido.

Conforme pode ser visto na figura 45(A), com as medidas especificadas pela norma e com auxílio de um software de desenho e modelagem 3D, foi modelada a matriz para injetora que permitiu a produção dos corpos de prova para os ensaios. Posteriormente a modelagem, a matriz foi usinada gerando a ferramenta apresentada na figura 45(B) para a produção dos corpos de provas necessários.

Figura 45 – (A) Modelagem da matriz (B) Matriz usinada



A matriz projetada e desenvolvida na Faculdade SATC com dimensões de 250mm x 200mm x 200mm (comprimento x largura x altura) foi construída em aço AISI P20 por apresentar características de boa usinabilidade possibilitando a obtenção de superfícies lisas conferindo bom acabamento do material injetado. Respeitando as capacidades de injeção e dimensionais da máquina, a matriz foi confeccionada para a injeção de dois corpos de prova por batelada.

Assim, utilizando a injetora plástica da PAVAN ZANETTI modelo NFN 150P equipada com a matriz produzida (figura 46), foram produzidos os corpos de prova com os principais materiais poliméricos selecionados anteriormente (PP, PS, PEAD, PEBD e ABS) virgens e reciclados, sendo excluído o PVC e o PET por serem polímeros de alta temperatura vítrea e alta viscosidade exigindo equipamentos especiais que permitam a aplicação de pressões superiores aos demais tipos de polímeros.

Figura 46 – Injetora PAVAN ZANETTI modelo NFN 150P com a matriz produzida



Os ensaios de tração dos corpos de prova de PS reciclado, PP reciclado, PEAD reciclado, PEBD reciclado conforme a norma ASTM D638 foram realizados utilizando a Máquina Universal de ensaios EMIC 100kN do laboratório NEMAF (Núcleo de ensaios de

Materiais e Análise de Falha) do departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Com os ensaios foram determinados os limites de resistência à tração dos materiais ensaiados, bem como alongamento e curva de tensão x deformação. A fim de se obter precisão dos resultados, foram ensaiados três corpos de prova de cada um dos materiais sugeridos na avaliação inicial, produzidos pelo mesmo processo, com os mesmos parâmetros e é claro, utilizando mesmo material. Já, os ensaios nos corpos de prova de PS virgem, PP virgem, PEAD virgem, PEBD virgem ABS virgem e ABS reciclado foram realizados também em triplicata utilizando a Máquina Universal de ensaios EMIC 100kN do laboratório de ensaios mecânicos do IDT (Instituto de Engenharia e Tecnologia) do I.parque (Parque Científico e Tecnológico) da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) também orientado pela norma ASTM D638 e gerando os mesmos resultados.

3.4.2 Medição de rugosidade

Para avaliação da superfície das amostras em comparação com a referência, a fim de traçar uma correlação entre os resultados da metalização (reflexão especular), foram realizadas medições de rugosidade, com o rugosímetro Mitutoyo SJ-310 do laboratório de caracterização de materiais (LACAMI) da Faculdade SATC, demonstrado na figura 47. As medições de rugosidade seguiram parâmetros das normas ABNT NBR ISO4287:2002 e ABNT NBR ISO 4288:2008.

Figura 47 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-310



3.4.3 Microscopia ótica

Após a metalização, os corpos de prova foram analisados superficialmente para, de forma comparativa com a referência, analisar a qualidade da deposição frente ao parâmetro buscado, que é a reflexão especular. Tal análise foi realizada utilizando o microscópio ótico Olympus modelo BX5M (figura 48), também do laboratório de caracterização de materiais (LACAMI) da faculdade SATC, foram retiradas imagens ampliadas da superfície de cada amostra.

Figura 48 – Microscópio eletrônico Olympus modelo BX5M



3.4.4 Ensaio de adesão

Embora o filme metálico depositado sobre o substrato polimérico na metalização não seja submetido na aplicação proposta, esforço de “arrancamento”, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de adesão objetivando detectar fragilidades na adesão do filme ao substrato que possa ocasionar o desprendimento da camada com o passar do tempo. Assim, os ensaios de adesão tiveram caráter de exclusão, eliminando da proposta os materiais que não atingiram a adesão máxima, 5B ou 4B conforme classificação da norma.

Os ensaios de adesão aplicados, utilizaram a metodologia *Crosshatch and Tape Pull Test* segundo a norma ASTM D3359-09. Neste tipo de ensaio, o revestimento é riscado por

um estilete formando seis riscos verticais e seis horizontais formando quadrados de 2 x 2 mm sendo posteriormente aplicada uma fita adesiva especial sobre esta superfície. Após a aplicação da fita, aguarda-se um tempo de três minutos removendo-a paralelamente ao substrato. Classifica-se a qualidade da adesão a partir da quantidade de material desprendido do substrato que ficou aderido a fita.

3.4.5 Ensaios de reflexão

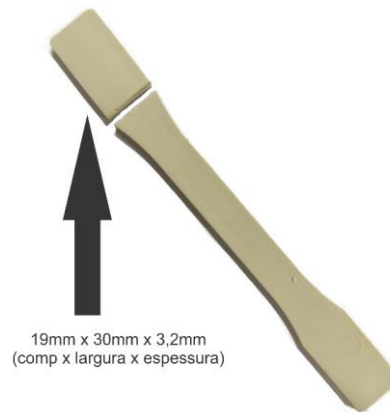
A capacidade de reflexão do tubo é o ponto crítico do produto e o mais importante da proposta uma vez que define o rendimento na condução da luz de fora para dentro do ambiente e por isso tem caráter de exclusão, ou seja, caso a amostra do material ensaiado não apresenta-se reflexão especular adequada, neste caso definido de forma empírica como maior ou igual a 50% (baseado nos em testes anteriores que apresentaram superfície minimamente reflexiva a partir deste valor), excluía-se das próximas etapas do estudo. Para isso, os ensaios foram realizados com o espectrofotômetro Agilent Cary 5000 do laboratório de espectroscopia laser e óticas de filmes da universidade federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A metodologia dos ensaios realizados neste equipamento seguiram as recomendações da norma ASTM E903 (*Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*). O equipamento durante o ensaio incide pontualmente luz na sua superfície do alvo com comprimento de onda variando de 200nm até 2000nm e resolução de 1nm gerando, portanto, um total de 1800 registros de reflexão. Atinge-se nesta medição, parte da faixa ultravioleta, toda a faixa visível e parte da faixa infravermelha dos raios solares.

O primeiro passo para realização dos ensaios de reflexão, foi a preparação das amostras, que neste caso foram dos materiais selecionados inicialmente (PP reciclado, PP virgem, PS reciclado, PS virgem, PEAD reciclado, PEAD virgem, PEBD reciclado, PEBD virgem, ABS reciclado e ABS virgem) metalizados a vácuo com alumínio e cromo pelos processos de projeção catódica e deposição iônica.

Segundo a Norma ASTM E903 (*Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*) utilizada no ensaio de reflexão, as dimensões das amostras a serem ensaiadas devem ser determinadas pelo tamanho da esfera integradora, ou seja, baseia-se na limitação do equipamento de medição.

Sabendo que o equipamento de medição utilizado neste ensaio é o espectrofotômetro Agilent Cary 5000 e baseado em suas limitações, definiu-se que as amostras “alvo” seriam retiradas dos corpos de prova confeccionados para o ensaio de tração (figura 49) evitando assim a necessidade da produção de uma nova matriz.

Figura 49 – Amostras para ensaio de reflexão



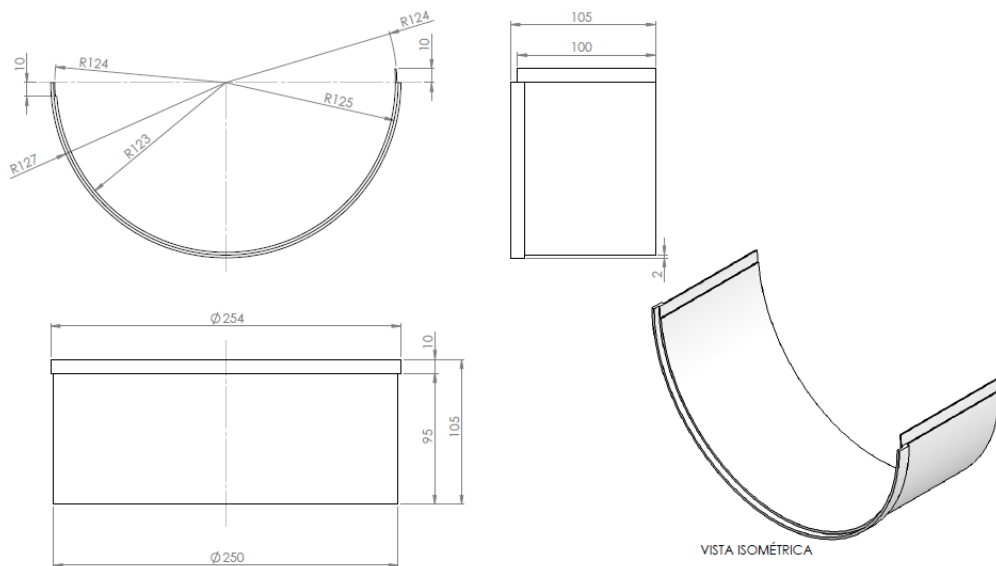
3.5 ETAPA 04 – CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Após a definição dos materiais da estrutura e da superfície interna reflexiva do protótipo, que apresentaram características de reflexibilidade, adesão e resistência mecânica adequadas a proposta, o próximo passo seguiu na confecção dos protótipos dos tubos reflexivos utilizando estes materiais. Nesta seção, portanto, aborda-se a concepção e confecção dos protótipos dos tubos reflexivos para posterior validação.

Os processos convencionais de PVD, por limitações das máquinas, não permitem a metalização de áreas internas como no caso do tubo em questão, sendo que para que isso seja possível, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas específicas. Tratando-se apenas de protótipos, não se justifica o custo para realização desta mudança, apenas no caso de produção em larga escala.

Desta forma, a solução encontrada foi a concepção dos tubos de forma fracionada (figura 50) que permitam a metalização interna de cada parte e possibilite a montagem posterior formando o tubo desejado.

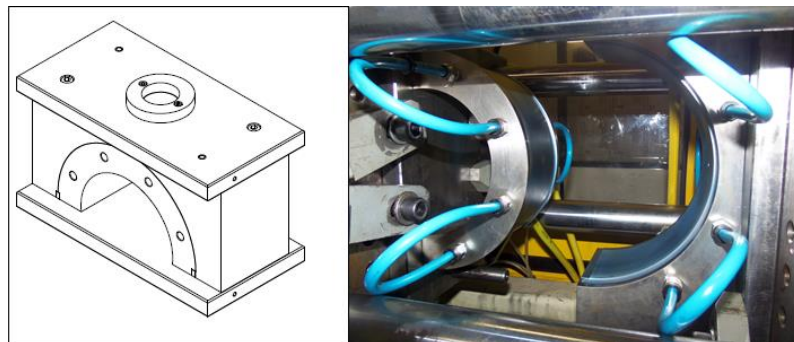
Figura 50 – Desenho das peças (partes) do tubo do protótipo



O modelo de peça concebido é único, ou seja, com apenas a confecção de uma matriz de injeção é possível construir peças para o tubo em comprimento desejado, bastando apenas para isso montar tantas peças quanto forem necessárias. Este formato foi idealizado considerando questões de facilidade na montagem e redução de custos do produto.

Utilizando os mesmos parâmetros de boa usinabilidade utilizados na matriz dos corpos de prova, a matriz para injeção das peças foi construída em aço AISI P20. Estas características objetivam exatamente o melhor acabamento superficial possível nas peças para posterior metalização. A figura 51 demonstra a matriz construída para injeção das peças em questão.

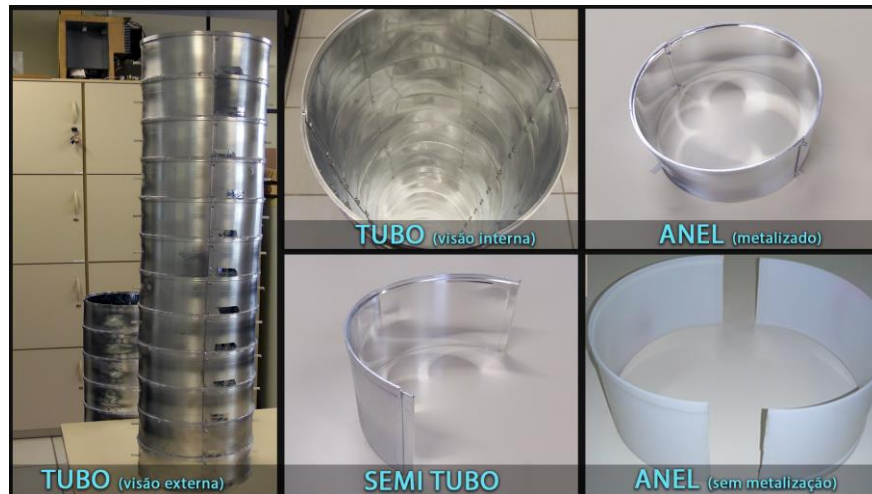
Figura 51 – Matriz para injeção das peças do tubo



As injeções das peças foram realizadas no mesmo equipamento da injeção dos corpos de prova, ou seja, a injetora PAVAN ZENETTI modelo NFN 150P apresentada na figura 46 deste trabalho. Após injetadas, as peças foram posteriormente metalizadas pelos

processos de projeção catódica e evaporação no vácuo como os mesmos parâmetros utilizados nos corpos de prova, finalizando-se com junção dos semi-tubos e anéis, obtendo-se assim os protótipos dos tubos reflexivos idealizados inicialmente, chegando assim em sua fase final de construção como demonstrado na figura 52.

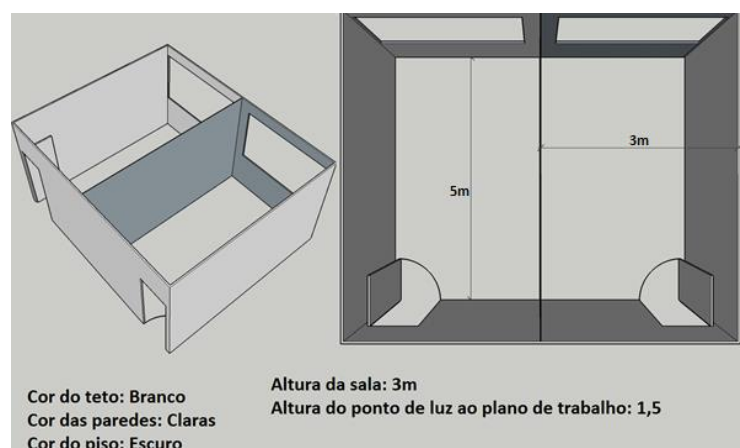
Figura 52 – Tubos reflexivos finalizados



3.6 ETAPA 05 – VALIDAÇÃO

Objetivando a validação dos protótipos em escala real, designaram-se duas salas de iguais características dimensionais e arquitetônicas localizadas no prédio do LAEC (Laboratórios de Ensaio de Carvão) na Faculdade SATC em Criciúma – SC. A figura 53 traz de forma detalhada as informações sobre os ambientes utilizados.

Figura 53 – Ambiente de validação e suas características



Em um dos ambientes foi instalado o modelo comercial (referência) completo e no outro ambiente foram instalados os protótipos do tubo a serem testados, porém ainda utilizando o domo e o difusor do modelo comercial. Isso garantiu a avaliação de forma comparativa, especificamente sobre o rendimento do protótipo do tubo frente à referência. A distância entre o forro das salas de validação e o telhado do prédio é de 2 m o que significa a necessidade da montagem de 20 anéis para formar um tubo reflexivo completo, uma vez que cada anel tem uma altura de 100mm. Haja vista a característica inerente de retração dos polímeros no processo de injeção abordado posteriormente, a quantidade de anéis necessários apresentou variação de uma unidade entre os protótipos haja vista a diferença entre os materiais. Na figura 54 verifica-se os tubos (referência e protótipo) devidamente instalados para validação.

Figura 54 – Ambiente de validação com os protótipos instalados

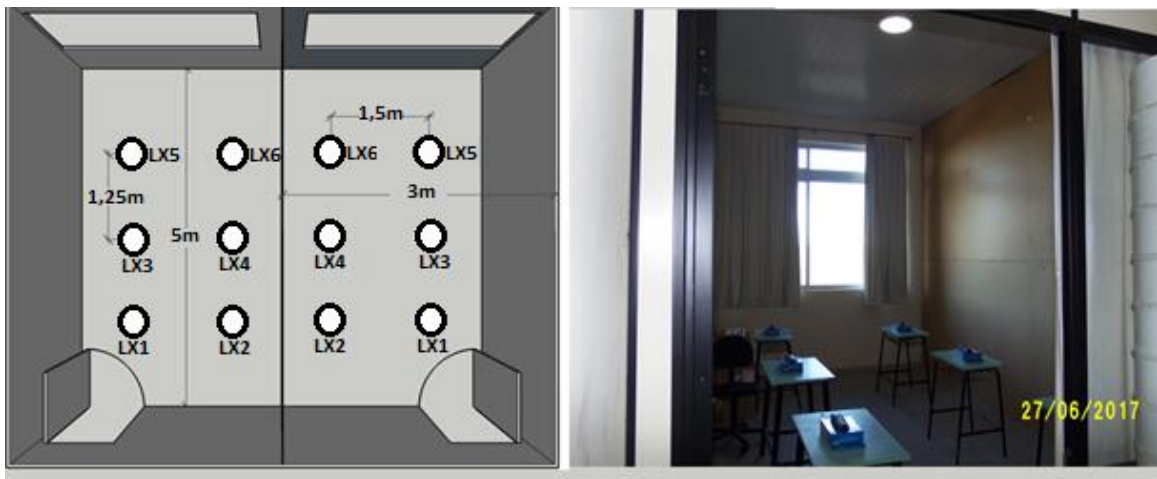


3.6.1 Metodologia de validação

O método de validação utilizado é empírico-analítico, ou seja, comparar-se-á os dados obtidos no ambiente onde está instalado o tubo de referência e no ambiente onde os

protótipos foram instalados. Para mensurar a quantidade de luz dentro do ambiente foram utilizados luxímetros (MLM-1020 da Minipa) que são instrumentos para medição de iluminamento ou iluminância, grandezas estas abordadas na seção 2.2 e regulada pela norma ABNT ISO/CIE 8995:2013. Para obtenção de parâmetros distribuição da luz no ambiente e também para determinação de iluminamento médio, foram dispostos seis luxímetros cada sala conforme demonstra a figura 55.

Figura 55 – Disposição dos luxímetros nas salas de validação



Para garantir que os resultados medidos pelos luxímetros fossem efetivamente da luz vinda das luminárias, em ambas as salas foram fechadas todas as entradas de luz durante o dia e realizada uma medição com os luxímetros que apresentaram ausência total da luz verificada pelos resultados 0.00 lux obtidos nos luxímetros.

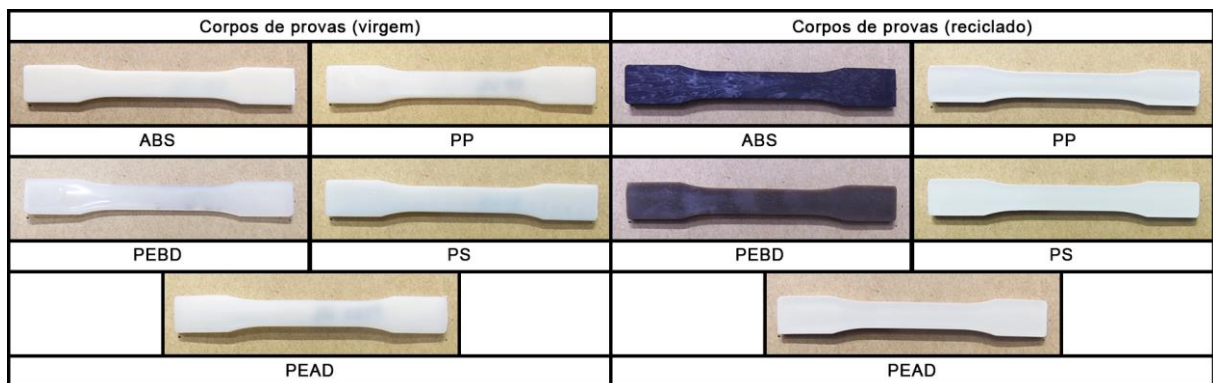
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das metodologias descritas no capítulo 3.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Na figura 56 apresentam-se as amostras dos corpos de prova injetados conforme descrito na seção 3.4.1 para cada um dos materiais, seguindo as dimensões orientadas pela norma utilizada na realização dos ensaios de tração.

Figura 56 – Corpos de prova injetados (materiais virgens e reciclados)



Observando as amostras, mesmo a olho nu, é possível identificar uma pequena diferença dimensional entre as amostras, mesmo sendo elas injetadas na mesma matriz. Isso ocorre pois durante o processo de solidificação, o material sofre uma contração volumétrica que é diferente para cada tipo de material empregado. A contração volumétrica é uma propriedade característica do processo de injeção que ocorre pela diferença da densidade do polímero em função da temperatura e pressão, ou seja, após injetado no molde, à medida que o material resfria e começa a se solidificar ocorre este fenômeno (THOMPSON, 2009). Realizando sucessivas medições nos corpos de prova com um paquímetro digital DIGIMESS (150MM/6'') foi possível identificar as retrações sofridas pelos materiais conforme apresenta-se na tabela 11.

Para garantir a confiabilidade nos resultados, o procedimento para obtenção das medidas M1, M2, M3 e M4 foram realizados da mesma forma, com o mesmo instrumento (Paquímetro digital Digimess 150mm/6") e para cada material foram realizadas medições em três amostras diferentes gerando ao término uma média aritmética destas medições.

Tabela 11 – Contrações sofridas pelos corpos de provas produzidos

Material	Amostra 01 (mm)		Amostra 02 (mm)		Amostra 03 (mm)		Média (mm)		Contração (%)
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	
CAVIDADE DA MATRIZ	M1	19	M1	19	M1	19	M1	19	
	M2	19	M2	19	M2	19	M2	19	
	M3	12	M3	12	M3	12	M3	13	
	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	
PP Reciclado	M1	18,7	M1	18,7	M1	18,7	M1	18,7	1,6
	M2	18,7	M2	18,7	M2	18,7	M2	18,7	1,6
	M3	12,8	M3	12,8	M3	12,8	M3	12,8	1,5
	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	0,0
PS Reciclado	M1	18,8	M1	18,8	M1	18,8	M1	18,8	1,1
	M2	18,8	M2	18,8	M2	18,8	M2	18,8	1,1
	M3	13	M3	13	M3	13	M3	13	0,0
	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	0,0
PEBD Reciclado	M1	18,9	M1	18,9	M1	18,9	M1	18,9	0,5
	M2	18,9	M2	18,9	M2	18,9	M2	18,9	0,5
	M3	12,9	M3	12,9	M3	12,9	M3	12,9	0,8
	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	0,0
PEAD Reciclado	M1	18,6	M1	18,6	M1	18,6	M1	18,6	2,1
	M2	18,6	M2	18,6	M2	18,6	M2	18,6	2,1
	M3	12,9	M3	12,9	M3	12,9	M3	12,9	0,8
	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	0,0

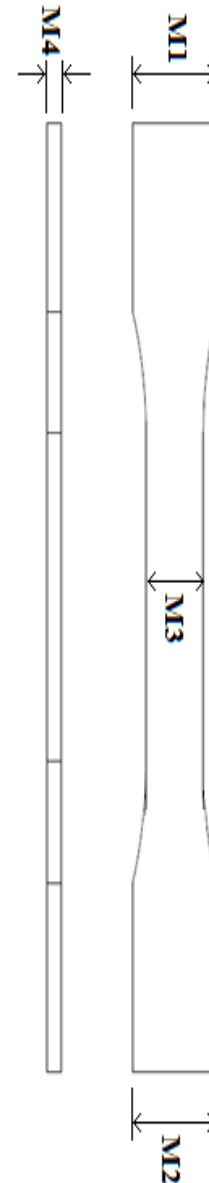
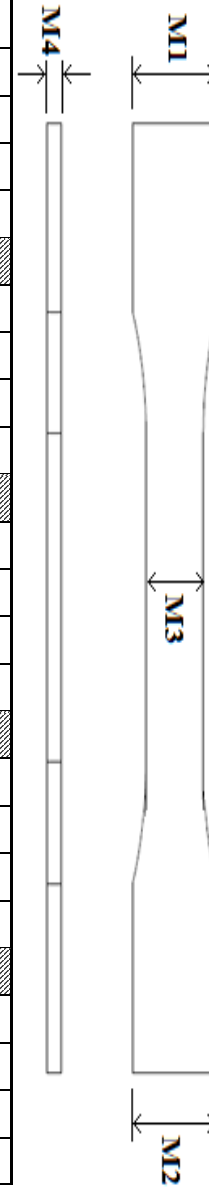


Tabela 11 – Continuação

Material	Amostra 01 (mm)		Amostra 02 (mm)		Amostra 03 (mm)		Média (mm)		Contração (%)
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	
ABS Reciclado	M1	18,9	M1	18,9	M1	18,9	M1	18,9	0,5
	M2	18,9	M2	18,9	M2	18,9	M2	18,9	0,5
	M3	13,0	M3	13,0	M3	13,0	M3	13,0	0
	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	M4	3,2	0
PP Virgem	M1	18,8	M1	18,8	M1	18,8	M1	18,8	1,1
	M2	18,8	M2	18,8	M2	18,8	M2	18,8	1,1
	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	0
	M4	13	M4	13	M4	13	M4	13	0
PS Virgem	M1	19	M1	19	M1	19	M1	19	0
	M2	19	M2	19	M2	19	M2	19	0
	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	0
	M4	13	M4	13	M4	13	M4	13	0
PEBD Virgem	M1	18,7	M1	18,7	M1	18,7	M1	18,7	1,6
	M2	18,7	M2	18,7	M2	18,7	M2	18,7	1,6
	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	0
	M4	13	M4	13	M4	13	M4	13	0
PEAD Virgem	M1	18,7	M1	18,7	M1	18,7	M1	18,7	1,6
	M2	18,7	M2	18,7	M2	18,7	M2	18,7	1,6
	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	0
	M4	12,8	M4	12,8	M4	12,8	M4	12,8	1,5
ABS Virgem	M1	18,9	M1	18,9	M1	18,9	M1	18,9	0,5
	M2	18,9	M2	18,9	M2	18,9	M2	18,9	0,5
	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	M3	3,2	0
	M4	13	M4	13	M4	13	M4	13	0



As contrações volumétricas ou taxas de contração do material apresentadas nas tabelas 13 foram calculadas conforme equação 11 (PINTO, 2012).

$$\text{Taxa de contração}(\%) = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

L_0 – Comprimento da cavidade do molde (mm)

L – Comprimento da amostra (mm)

Além da contração volumétrica, existe também a contração linear que pode ser ainda, na direção do fluxo quando sua orientação se dá no sentido da injeção do material que entra no molde, ou transversal a direção do fluxo, quando é transversal a este sentido. Isso ocorre pela orientação das macromoléculas do material (PINTO, 2012). As ramificações que surgem nos materiais dificultam a cristalização dos polímeros, sendo que quanto menor a quantidade de ramificações mais cristalino fica o material e por consequência maior a densidade do material e maior sua rigidez (PINTO, 2012). Os materiais amorfos contraem menos que os materiais cristalinos ou semicristalinos pelo fato de que quando resfriados tem uma menor cristalização uma vez que suas moléculas tem menor capacidade de se organizarem (PINTO, 2012). Condições anormais de temperatura de injeção, pressão de injeção, tempo de resfriamento e tempo de recalque também são fatores que influenciam na cristalização do polímero e por sua vez nas suas propriedades mecânicas e na contração (PINTO, 2012).

Seguindo com os resultados dos ensaios de tração, a tabela 12 traz resultados dos ensaios nos corpos de prova.

Tabela 12 – Resultados ensaios em todos os corpos de prova (média)

Material	Limite de Resistência à Tração (MPA)	Material	Limite de Resistência à Tração (MPA)
ABS virgem	40,62	ABS reciclado	42,54
PP virgem	26	PP reciclado	32,6
PS virgem	25,59	PS reciclado	28,95
PEBD virgem	21	PEAD reciclado	25,9
PEAD virgem	9	PEBD reciclado	12,4

Verifica-se, portanto nos resultados dos ensaios, que o material que apresenta maior resistência mecânica é o ABS tanto na versão virgem quanto na versão reciclada. A resistência mecânica a princípio não é uma característica que exclua o material das próximas etapas, uma vez que após instalado, o tubo reflexivo não sofre grandes esforços. No entanto, é necessário que o material resista aos esforços da construção, transporte e montagem sem deformar-se preservando assim a camada de metal depositada. Assim, a resistência à tração conforme apresenta-se na figura 43 da seção 3.4 é utilizada apenas como critério de seleção

final, caso haja mais de um material selecionado após aplicação dos critérios de reflexão e adesão.

4.2 RESULTADOS DAS METALIZAÇÕES

Para facilitar o entendimento, os resultados quanto à metalização das amostras são apresentados na sequência iniciando primeiramente pela metalização das amostras por projeção catódica e posteriormente por evaporação no vácuo.

4.2.1 Metalizações por projeção catódica

Primeiramente as amostras foram metalizadas pelo processo de projeção catódica com a deposição de cromo sobre os substratos. As figuras 57 e 58 apresentam os resultados visuais desta metalização nos substratos de materiais virgens e reciclados.

Figura 57 – Amostras metalizadas com cromo (materiais virgens)



Figura 58 – Amostras metalizadas com cromo (materiais reciclados)



Nota-se que as amostras apresentam imperfeições na superfície metalizada, sendo que é válido lembrar que todas as amostras foram produzidas pela mesma matriz e, portanto, estas imperfeições ocorrem por características específicas dos materiais que ao solidificar-se formam materiais sólidos de diferente acabamento conforme suas cadeias poliméricas. As imperfeições na superfície causam a difusão da luz sendo este efeito prejudicial ao objetivo desta tese. Seguindo com os testes, cada amostra apresentada nas figuras 59 e 60 foi metalizada com alumínio.

Figura 59 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais virgens)



Figura 60 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais reciclados)



Ao analisar os resultados apresentados nas figuras 59 e 60 percebe-se que com o alumínio as superfícies metalizadas possuem acabamento superficial semelhante ao cromo. De forma apenas visual (sem medições) verifica-se que as amostras não apresentam superfície suficientemente reflexiva indicando que todas elas são bastante difusas fugindo ao que se propõe.

As figuras 61 e 62 apresentam as imagens microscópicas das superfícies das amostras metalizadas com cromo comparando com a referência.

Figura 61 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo (materiais virgens)

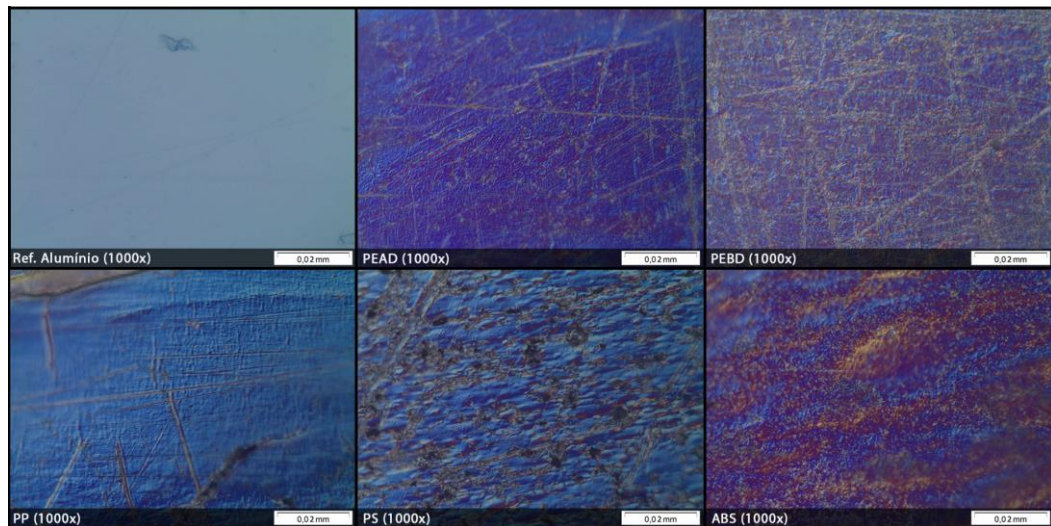
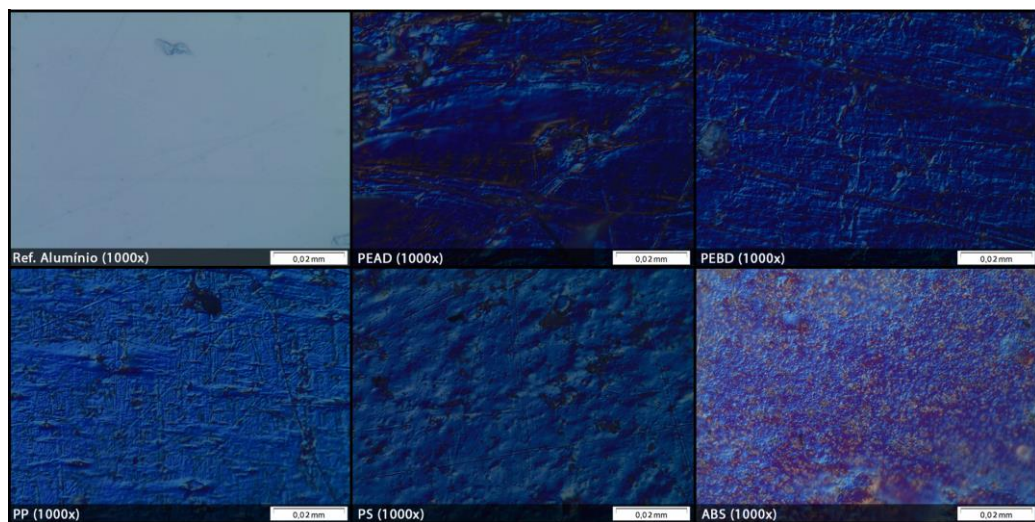


Figura 62 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo (materiais reciclados)



Nas figuras 61 e 62, assim como nas outras, as superfícies das amostras apresentam acabamentos diferentes. Por fim, realizando uma comparação entre os materiais virgens e reciclados, verifica-se que o acabamento superficial dos materiais reciclados tem qualidade muito abaixo dos materiais virgens, o que se justifica pela possível contaminação dos materiais reciclados durante o processo da reciclagem.

As figuras 63 e 64 apresentam as imagens ampliadas obtidas por microscopia, das superfícies das amostras metalizadas com o alumínio nas matérias virgens e reciclados.

Figura 63 – Superfície das amostras metalizadas: Alumínio (materiais virgens)

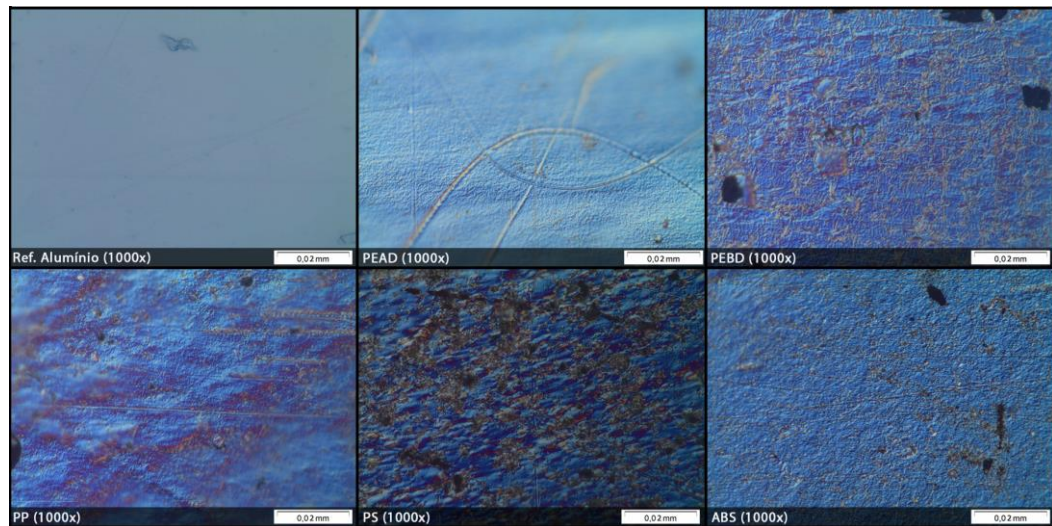
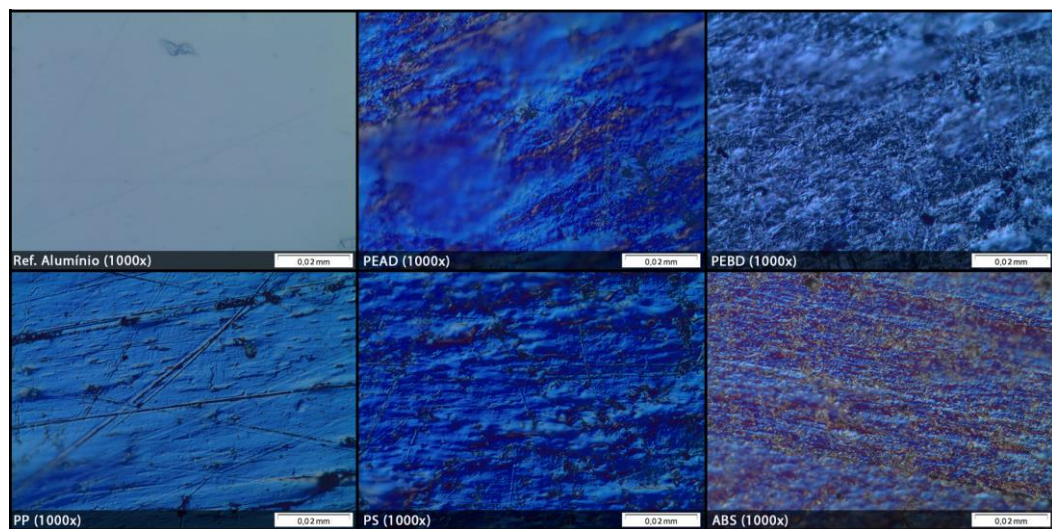


Figura 64 – Superfície das amostras metalizadas: Alumínio (materiais reciclados)



Seguindo o padrão de comportamento do cromo as superfícies metalizadas com alumínio apresentaram acabamento superficial bastante irregular os materiais reciclados e um pouco mais regular para os materiais virgens. Comparando os resultados visuais das amostras com as imagens do microscópio, verifica-se que as amostras com melhor acabamento superficial tenderam a apresentar superfícies mais reflexivas. Assim, confirma-se que o acabamento superficial ruim ocasiona baixa reflexividade especular das superfícies metalizadas, o que se justifica, uma vez que a luz tende a refletir em diferentes ângulos, ou seja, de forma difusa.

Para maximizar a reflexibilidade faz-se necessário, portanto, conferir a superfície maior uniformidade tornando-a mais regular através de uma preparação antes da metalização.

Passa por essa melhor preparação, a aplicação de um verniz chamado de *base coat* que serve de “interface” de ligação entre o substrato do polímero e a camada de metal. Este verniz garante que o substrato tenha uma superfície lisa e brilhante de forma que o metal tenha aderência de forma correta e homogênea (BEST; JUNIOR, M. L., 1972).

Os vernizes *base coat* utilizados nesta aplicação foram o GMETAL.000.058 (METALTON VERNIZ BASE COATING METALIZACAO PP) específico para PP e o verniz GMETAL.000.036 (METALTON VERNIZ BASE) para os demais tipos de polímeros. Assim, novas amostras foram confeccionadas e metalizadas com estes vernizes recobrimo a superfície seguindo recomendações dos boletins técnicos fornecidos pelo fabricante.

Após aplicação dos vernizes na superfície das amostras as mesmas foram submetidas a metalização a vácuo primeiramente com cromo conforme figuras 65 e 66.

Figura 65 – Amostras metalizadas com cromo (materiais virgens)



Figura 66 – Amostras metalizadas com cromo (materiais reciclados)



Analisando as figuras 65 e 66, nota-se que a aplicação do verniz não representou melhoras significativas no aspecto reflexivo das amostras na metalização com cromo, inclusive de uma forma geral as amostras tiveram, de forma visual pelo menos, uma redução da reflexividade de superfície. As amostras com verniz também foram metalizadas com o alumínio conforme pode ser visto nas figuras 67 e 68.

Figura 67 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais virgens)

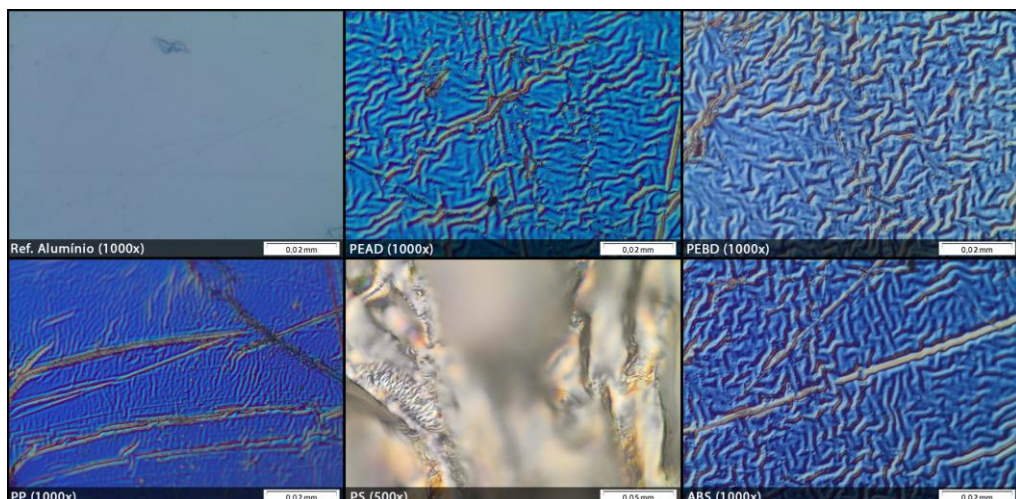


Figura 68 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais reciclados)



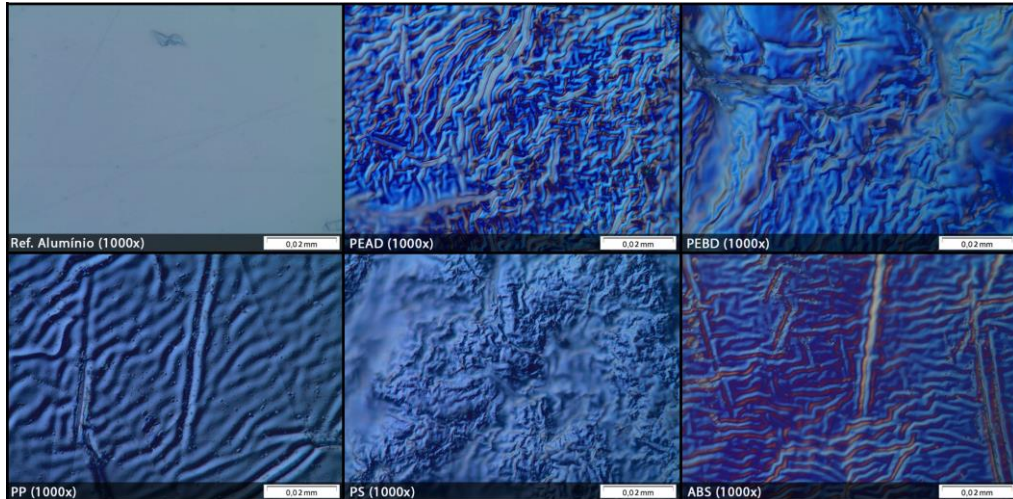
Neste último caso, utilizando o alumínio verificou-se que algumas amostras ainda apresentaram baixa reflexão especular, no entanto o PP reciclado, o ABS virgem, o ABS reciclado e PP virgem, apresentaram resultados minimamente reflexivos. Buscando o entendimento dos resultados visuais da metalização apresentados nas figuras 67 e 68, as amostras foram submetidas a análise no microscópio a exemplo das amostras anteriores. As figuras 69 e 70 apresentam os resultados da microscopia nas superfícies das amostras metalizadas com cromo após aplicação do verniz.

Figura 69 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo com verniz (materiais virgens)



Na figura 69 verifica-se que a imagem referente ao PS é diferente muito das outras imagens, sendo que isso ocorreu pela elevada não uniformidade da metalização, impedindo inclusive foco do microscópio.

Figura 70 – Superfície das amostras metalizadas: Cromo com verniz (materiais reciclados)



Os resultados demonstram que após a metalização com o cromo, mesmo com o verniz *base coat* aplicado, as amostras continuaram tendo superfícies irregulares tornando-as difusas no aspecto da reflexão, com exceção do PP novamente.

As figuras 71 e 72 apresentam os resultados da metalização com alumínio após cobertura da superfície com verniz *base coat*.

Figura 71 – Superfície das amostras metalizadas: Alumínio com verniz (materiais virgens)

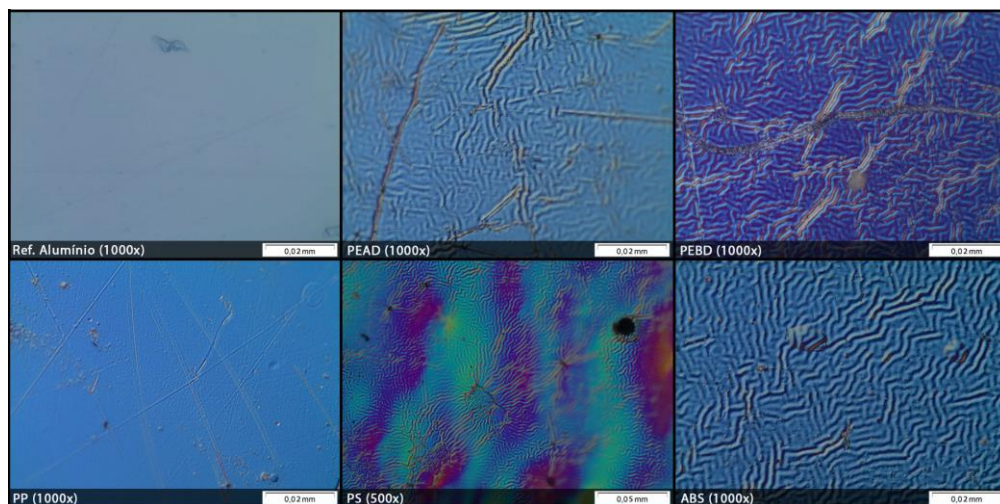
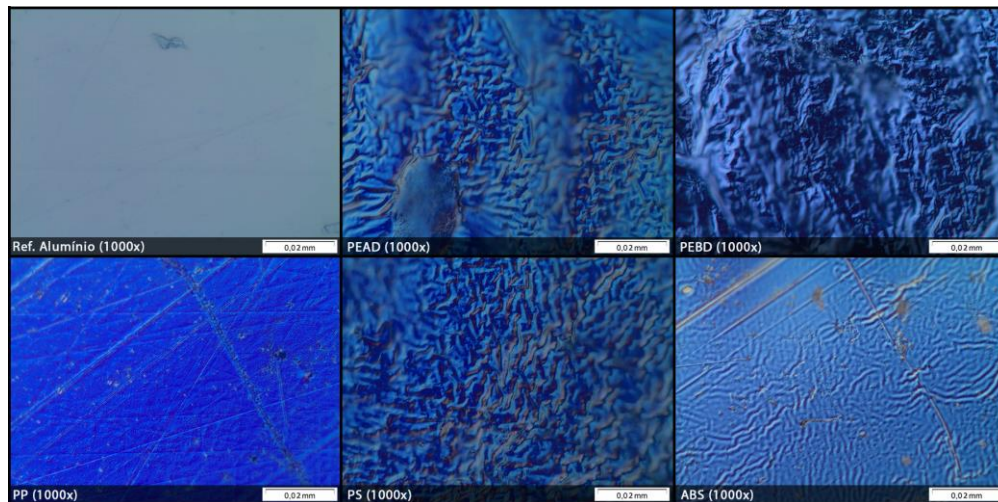


Figura 72 – Superfície amostras metalizadas: Alumínio com verniz (materiais reciclados)



Confirmando, portanto, o que se constata visualmente, a combinação do PP virgem, com o verniz *base coat* e o alumínio como camada reflexiva foi o que apresentou melhor resultado visual seguido pelo PP reciclado, ABS virgem, ABS reciclado, sendo possível identificar potencial reflexão especular. Desta forma, o trabalho irá avançar utilizando estes materiais que apresentaram melhor resultado visual (conforme estabelecido no fluxograma da figura 43) para os próximos testes do estudo, uma vez que os demais materiais não apresentaram potencial visível de reflexão especular. Observando as imagens microscópicas das amostras selecionadas, evidencia-se o motivo pelo qual as mesmas apresentaram maior reflexão especular, ou seja, são as combinações que apresentaram superfícies mais regulares, corroborando com a constatação anterior da influência da uniformidade superficial na reflexão especular.

A metalização dos corpos de prova apresentou resultados diferentes nos cenários testados, ou seja, com e sem verniz e também para materiais virgens e reciclados. O que fica claro com os testes é que a aplicação do verniz é imprescindível para garantir a deposição uniforme do filme de metal sobre a superfície. As experiências apontaram que o processo de aplicação do verniz deve seguir rigorosamente o procedimento determinado pelo boletim técnico do fabricante, e no caso de variações em condições ambientais ou de aplicação, haverá implicações no resultado da deposição do filme metálico.

4.2.2 Metalizações por evaporação no vácuo

A metalização pelo processo de evaporação no vácuo foi realizada nos testes a fim de buscar possibilidades que melhor se adequem a proposta. Utilizando-se das experiências anteriores, não serão realizados os testes sem a aplicação de verniz e também descartar-se-á o cromo como material para o filme metálico por não apresentar resultados satisfatórios em nenhum dos testes realizados, e também pelo alumínio ser o material mais utilizado nos processos de metalização da indústria automotiva indicando sua melhor eficiência ao que se propõe. As figuras 73 e 74 demonstram as amostras após a metalização pelo processo citado.

Figura 73 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais virgens)



Verifica-se na figura 73 que nas amostras metalizadas em alumínio pelo processo abordado nesta seção, todas as superfícies dos diferentes materiais virgens apresentaram visualmente, elevada capacidade reflexiva assim como a amostra referência.

Figura 74 – Amostras metalizadas com alumínio (materiais reciclados)



Para os materiais reciclados repetiram-se os resultados, ou seja, todas as amostras apresentaram superfícies reflexivas. A figura 75 e 76 demonstra os resultados dos ensaios de microscopia nas amostras das figuras 73 e 74.

Figura 75 – Superfície amostras metalizadas: Alumínio (materiais virgens)

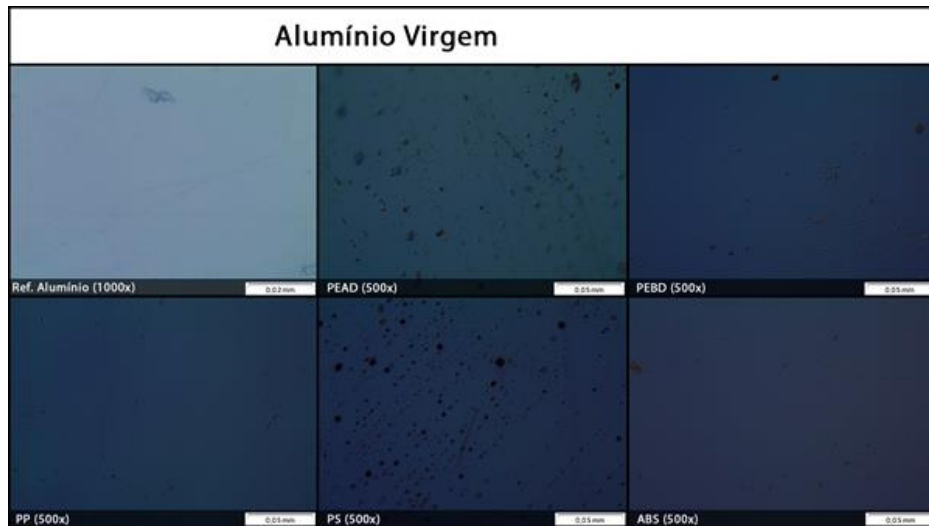
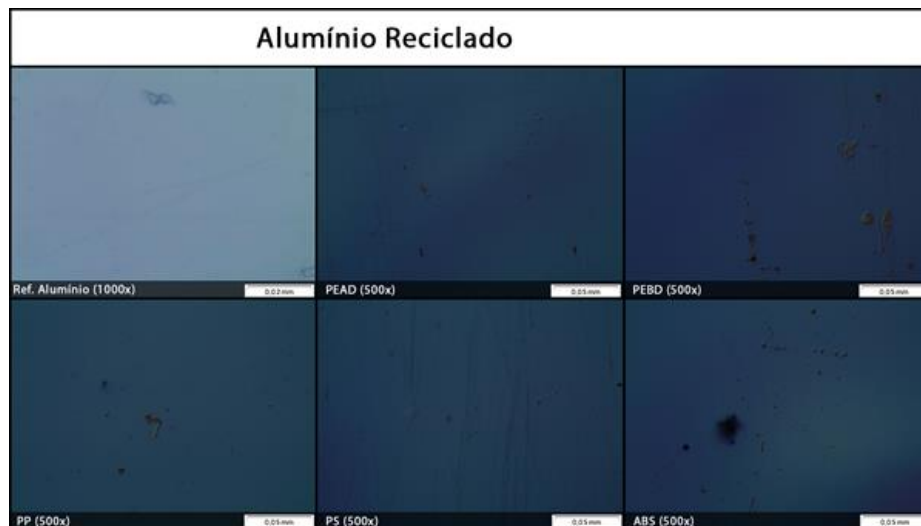


Figura 76 – Superfície amostras metalizadas: Alumínio (materiais reciclados)



Claramente percebe-se a diferença das superfícies das amostras metalizadas pelo processo de evaporação no vácuo em comparação ao processo de projeção catódica. Esta diferença ocorre principalmente pela característica de cada processo. No método de evaporação no vácuo, o alumínio é evaporado em baixa pressão por alto vácuo e os átomos de vapor se condensam com a peça que se deseja recobrir sem que a mesma sofra aquecimento que gere sua degradação. Já no processo de projeção catódica o alumínio é o cátodo do sistema e o substrato o ânodo onde por meio de um plasma gerado através de uma tensão

entre eletrodos em gás inerte, os íons positivos são acelerados contra o alvo de alumínio arrancando átomos que serão depositados no substrato. A limitação desta técnica está principalmente no material do substrato que para materiais com maior condutibilidade elétrica obtém melhores resultados, além do aquecimento que pode acabar degradando o mesmo (DEYNA, 2015). Isso explica os resultados obtidos pelas amostras submetidas ao processo de projeção catódica, pois por serem materiais poliméricos, necessitam de uma elevada tensão para gerar as condições elétricas necessárias, o que por sua vez ocasiona um elevado aquecimento degradando a peça, além da deposição ineficiente no substrato. Obedecendo, portanto, o fluxograma de execução dos ensaios preliminares (figura 43), onde as amostras que seguem para os próximos testes são as que obtiverem superfícies visualmente reflexiva, todas as amostras metalizadas por esse processo avançam na proposta.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADESÃO

Após a metalização, as amostras que atenderam o critério de superfícies visualmente reflexivas (fluxograma da figura 43) passaram a ser avaliadas através de ensaios de adesão. A tabela 13 traz a relação dos materiais selecionados para estes ensaios.

Tabela 13 – Amostras selecionadas para ensaios de adesão

Material do Substrato	Origem	Processo	Filme Metálico	Material do Substrato	Origem	Processo	Filme Metálico
PP	Virgem	Evaporação no vácuo	Alumínio (com verniz base coat)	PP	Virgem	Projeção catódica	Alumínio (com verniz base coat)
	Reciclado				Reciclado		
PS	Virgem						
	Reciclado						
PEAD	Virgem			ABS	Virgem		
	Reciclado				Reciclado		
PEBD	Virgem						
	Reciclado						
ABS	Virgem						
	Reciclado						

4.3.1 Ensaios de adesão: Amostras metalizadas por projeção catódica

Como descrito na seção 3.4.4, os ensaios de adesão realizados em triplicata serviram para identificar se o filme depositado sobre o polímero teve de fato aderência. Iniciando pelos corpos de prova metalizados por projeção catódica, apresenta-se na figura 77 as imagens pós-ensaios de adesão em um dos corpos de prova de cada material, e a tabela 14 traz os resultados conforme norma.

Figura 77 – Ensaio de adesão (materiais metalizados por projeção catódica)

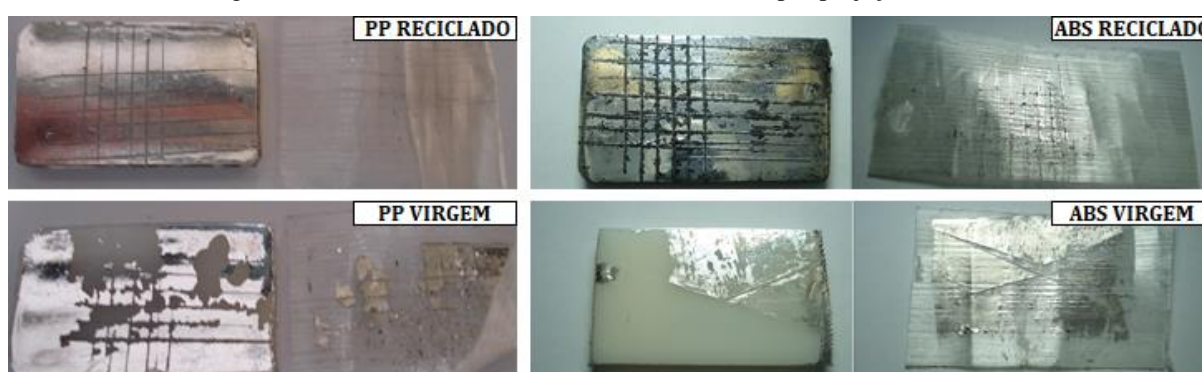


Tabela 14 – Resultados dos ensaios de adesão (projeção catódica)

Material	Área removida			Classificação conforme ASTM D3359-09		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
PP reciclado (verniz + alumínio)	0%	< 5%	<5%	5B	4B	4B
PP virgem (verniz + alumínio)	35 - 65%	>65%	>65%	1B	0B	0B
ABS reciclado (verniz + alumínio)	15 - 35%	15 - 35%	15 - 35%	2B	2B	2B
ABS virgem (verniz + alumínio)	>65%	>65%	>65%	0B	0B	0B

Sendo a classificação 5B a mais aderente e 0B a menos aderente pode-se notar que o PP virgem e o ABS virgem obtiveram os piores resultados no teste, ou seja, ofereceram pouca adesão da camada de metal sobre o substrato. O PP reciclado por sua vez ofereceu mais aderência que o PP virgem e que o ABS virgem, com o mínimo de desprendimento de parte do filme depositado. Portanto, o único material classificado (dentre os metalizados por projeção catódica) após os testes realizados foi o PP reciclado com camada reflexiva em alumínio.

4.3.2 Ensaios de adesão: Amostras metalizadas evaporação no vácuo

Para os materiais metalizados pelo processo de evaporação no vácuo, apresenta-se na figura 78 as imagens dos ensaios de adesão e um corpo de prova de cada material pós-validação, e a tabela 15 traz os resultados conforme norma.

Figura 78 – Ensaio de adesão (materiais metalização por evaporação no vácuo)

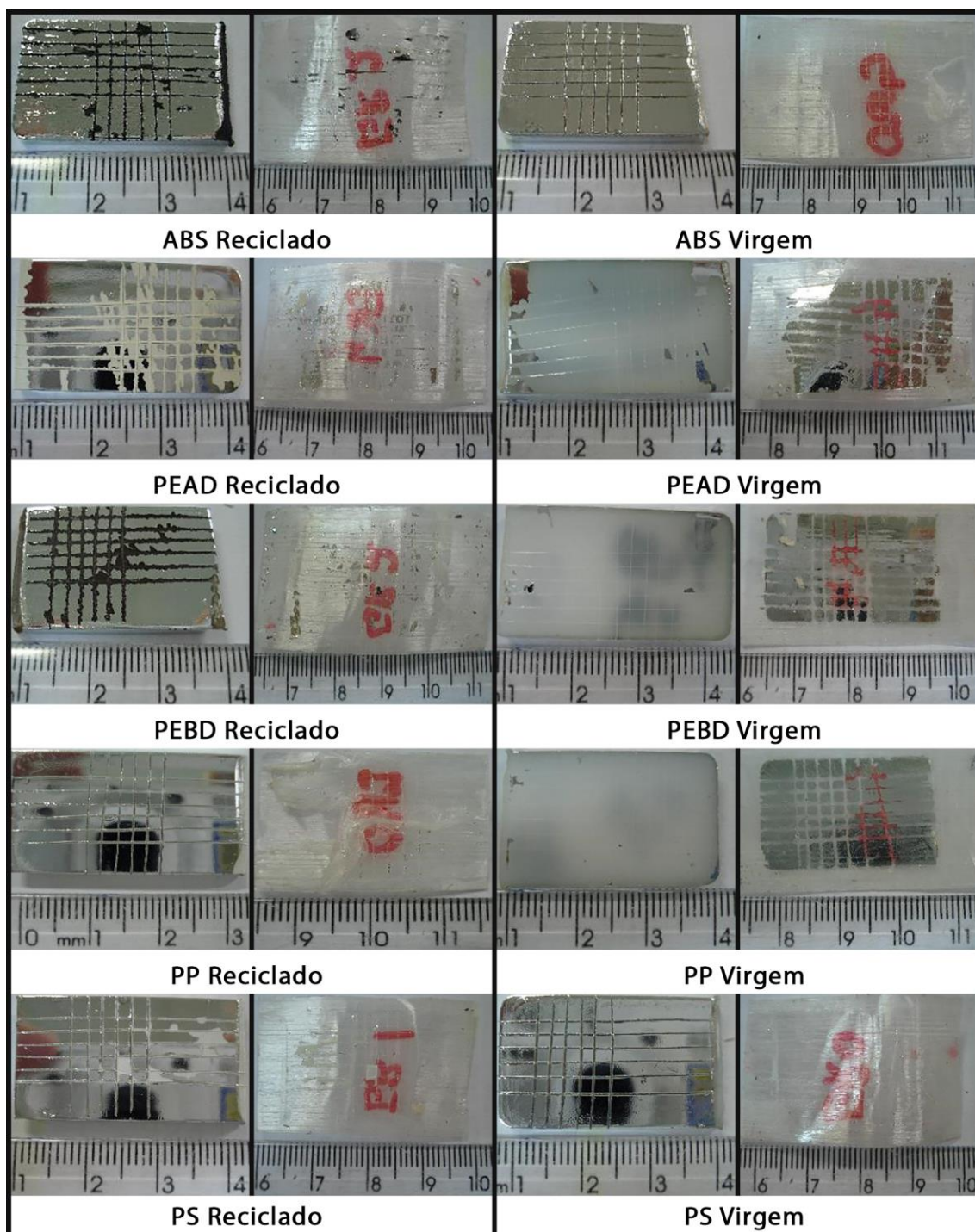


Tabela 15 – Resultados dos ensaios de adesão (evaporação no vácuo)

Material	Área removida			Classificação conforme ASTM D3359-09		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
ABS virgem	0%	0%	0%	5B	5B	5B
ABS reciclado	15-35%	15-35%	15-35%	2B	2B	2B
PP virgem	>65%	>65%	>65%	0B	0B	0B
PP reciclado	0%	0%	0%	5B	5B	5B
PEAD virgem	>65%	>65%	>65%	0B	0B	0B
PEAD reciclado	>65%	35-65%	35-65%	0B	1B	1B
PEBD virgem	35-65%	35-65%	35-65%	1B	1B	1B
PEBD reciclado	15-35%	15-35%	15-35%	2B	2B	2B
PS virgem	0%	0%	0%	5B	5B	5B
PS reciclado	35-65%	15-35%	15-35%	1B	2B	1B

Os resultados de adesão demonstraram que as amostras de ABS virgem, PP reciclado e PS virgem foram as únicas que atingiram adesão maior que 95%, ou seja, com remoção de 5% ou menos do filme aderido, conforme definição do fluxograma da figura 43. Assim, estas são as amostras que seguem ao ensaio de reflexão.

4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE REFLEXÃO

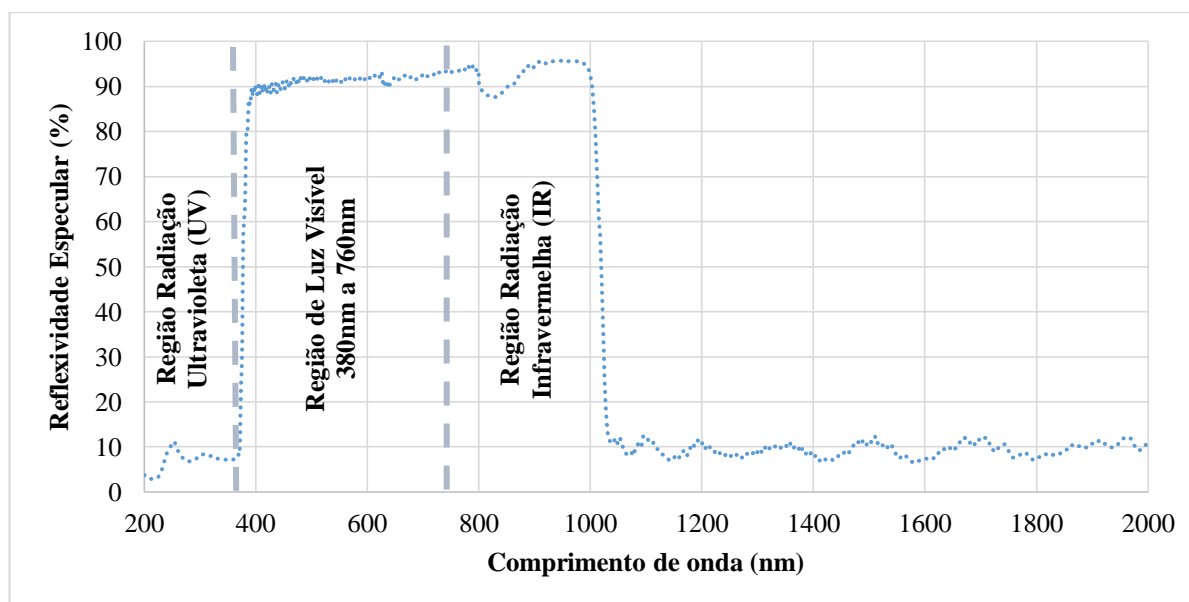
Após os ensaios de adesão, as amostras que atenderam o critério de aderência do filme ao substrato passaram a ser avaliadas através de ensaios de reflexão. A tabela 16 traz a relação dos materiais selecionados para estes ensaios.

Tabela 16 – Amostras selecionadas para ensaios de reflexão

Material do Substrato	Origem	Processo	Filme Metálico	Material do Substrato	Origem	Processo	Filme Metálico
ABS	Virgem	Evaporação no vácuo	Alumínio (com verniz base coat)	PP	Reciclado	Projeção catódica	Alumínio (com verniz base coat)
PP	Reciclado						
PS	Virgem						

Para fins de comparação, primeiramente realizou-se um ensaio na amostra referência que segundo o fabricante tem capacidade reflexiva de até 99,7%, porém não informa a origem deste valor. A figura 79, portanto, apresenta o gráfico do comportamento reflexivo da amostra referência.

Figura 79 – Ensaio de reflexão (Amostra referência)



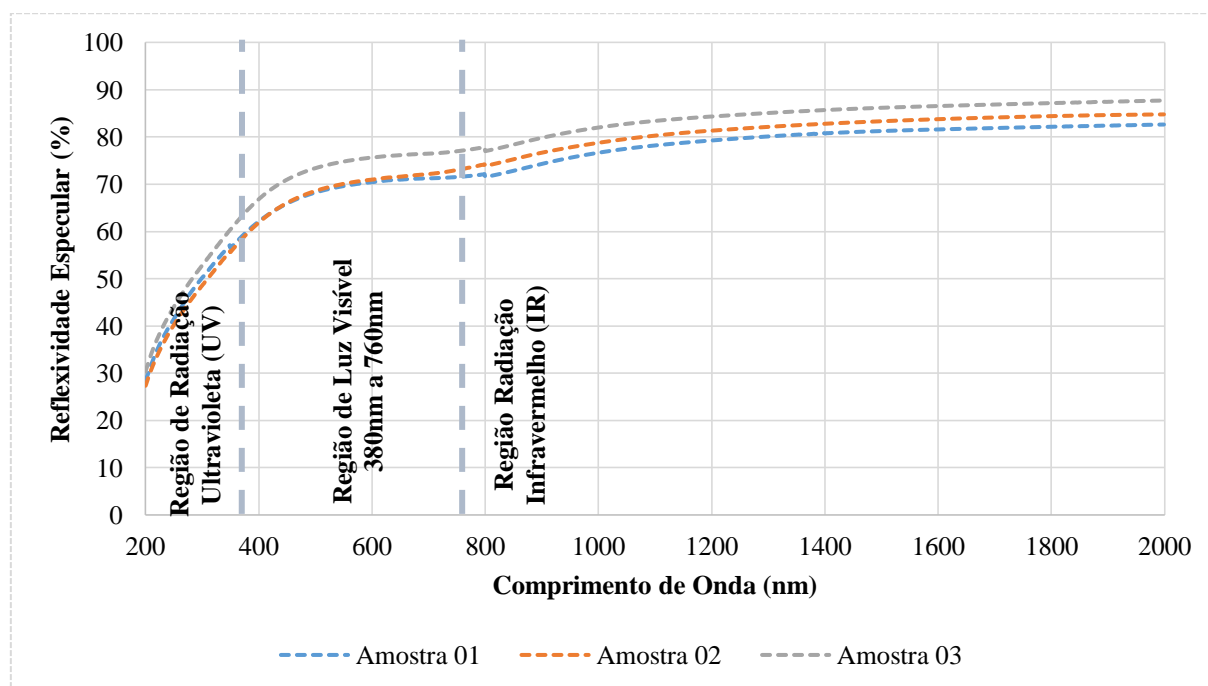
Analisando os dados, verificou-se que o menor pico de reflexão da região visível desta amostra foi de 62,44% no comprimento de onda 380nm, o maior pico foi de 93,76% no comprimento de onda 744nm e a média aritmética da reflexão nesta região foi de 91,15%. Nota-se ainda que nas regiões de luz ultravioleta e infravermelha há uma queda drástica na capacidade de reflexão o que se caracteriza pelo uso do alumínio na estrutura do tubo dissipando parte do calor no mesmo e evitando a condução para o ambiente (NILSSON; JONSSON; ROOS, 2014). Assim, a tecnologia tem foco na reflexão ótima apenas na faixa de luz visível minimizando a condução nas outras faixas reduzindo assim a condução de calor para dentro do ambiente. Esta característica segundo os fabricantes das tecnologias

comercializadas melhoram o desempenho do produto indicando quanto o mesmo é capaz de bloquear o calor do sol, tendo inclusive um índice chamado de *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) que define a qualidade do produto em relação a este quesito. O SHGC varia de 0 a 1 sendo que para a maior quantidade de calor transferida para o ambiente esse valor é 1 e para a menos este valor é 0 (SOLATUBE, 2015). Seguindo a mesma ideia de organização, os resultados dos ensaios de reflexão das amostras, são apresentadas separadamente por processo.

4.4.1 Ensaios de reflexão: Amostras metalizadas por projeção catódica

Iniciando pelo processo de projeção catódica, os ensaios de reflexão foram realizados nos corpos de prova PP reciclado e são apresentados no gráfico da figura 80 que expressa o comportamento destas amostras durante o ensaio de reflexão norteados pela norma ASTM E903.

Figura 80 – Ensaios de reflexão (PP reciclado – projeção catódica)



A região visível das amostras ensaiadas, obtiveram resultados de picos máximos, mínimos e médio de refletividade conforme apresentado na tabela 17.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de reflexão (PP reciclado – projeção catódica)

Parâmetro / comprimento de onda	Reflexividade especular (%) (Amostra 01)	Reflexividade especular (%) (Amostra 02)	Reflexividade especular (%) (Amostra 03)	Médias das amostras (%)
Mínimo	60,10	59,63	64,54	61,42
Máximo	71,61	73,23	77,13	73,99
Média da região visível (380nm a 760nm)	68,73	69,23	73,87	70,61

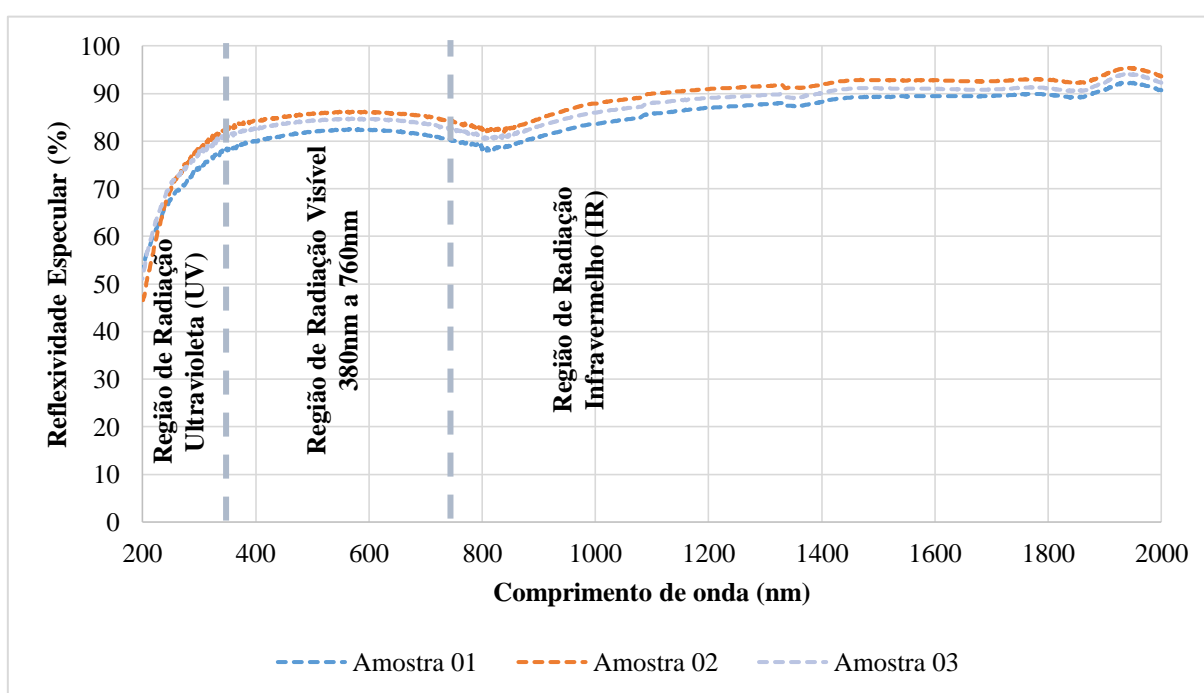
Os resultados de reflexividade das amostras diferem como se observa na tabela 30, sendo melhores na Amostra 03 e piores na Amostra 01. Isso ocorre pela não padronização do processo de preparação da amostra com verniz uma vez que a pintura é realizada de forma manual não havendo controle de espessura de camada. Para a confecção do tubo reflexivo de forma comercial, este processo precisa ser corrigido, garantindo assim que a metalização tenha máxima capacidade reflexiva e o produto tenha repetibilidade na qualidade. Verifica-se, portanto, com os resultados que o arranjo dos materiais selecionados (PP reciclado metalizado a vácuo com alumínio) tem de fato considerável potencial reflexivo com amplitude de 70,61% (média das três amostras) contra os 91,15% do produto de referência.

Observa-se também com muita evidência a diferença de comportamento do material de referência demonstrado na figura 103 e os materiais propostos apresentados na figura 104. Enquanto a reflexão da radiação solar ocorre a partir de 380nm até 1000nm no material de referência, nos materiais propostos a reflexão ocorre em toda a faixa da radiação, ou seja, também na faixa infravermelha e ultravioleta. Isso ocorre, pois, todo o comprimento de onda da luz incidida na superfície é refletido de forma especular e difusa uma vez que o material polimérico tem capacidade de dissipação do calor praticamente nula. Entretanto este fato não inviabiliza o estudo, pois os produtos comerciais têm o filtro de UV e IR também no elemento anterior (domo) filtrando o calor e, portanto, o filtro no tubo reflexivo é redundante e o SHGC é gerado em todo o produto (domo, tubo reflexivo e difusor) e não apenas no tubo. Além disso, partindo-se da premissa que o produto proposto em desenvolvimento tem foco no baixo custo sabe-se que não atingirá características ótimas, porém buscar-se-á atingir características mínimas de conforto e rendimento do produto.

4.4.2 Ensaios de reflexão: Amostras metalizadas por evaporação no vácuo

Pelo processo de evaporação no vácuo, foram submetidas aos ensaios de reflexão, as amostras dos materiais selecionados (ABS virgem, PP reciclado e PS virgem). A figura 81 apresenta primeiramente os resultados dos ensaios de reflexão da superfície das amostras de ABS virgem.

Figura 81 – Ensaio de reflexão (ABS virgem – evaporação no vácuo)



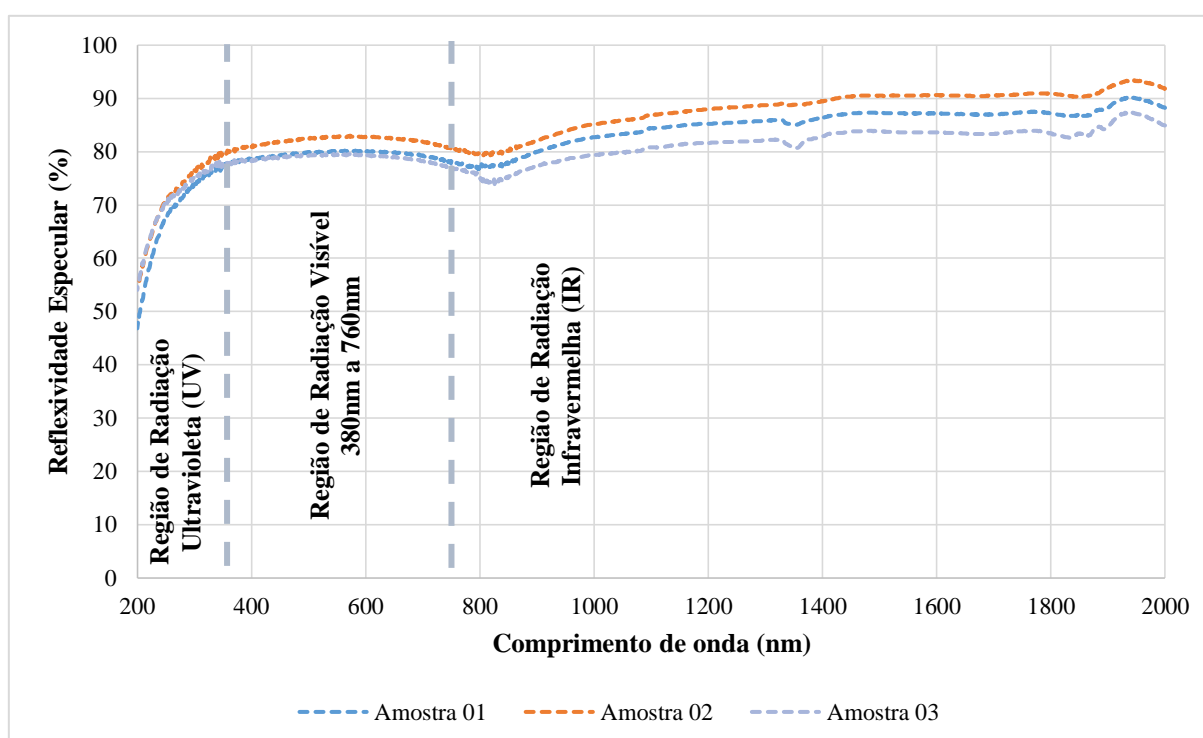
A região visível das amostras ensaiadas, obtiveram resultados de pico máximo, mínimo e média de reflexividade conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de reflexão (ABS virgem – evaporação no vácuo)

Parâmetro / comprimento de onda	Reflexividade especular (%) (Amostra 01)	Reflexividade especular (%) (Amostra 02)	Reflexividade especular (%) (Amostra 03)	Médias das amostras (%)
Mínimo	78,46	82,72	81,20	80,79
Máximo	82,51	86,18	84,82	84,50
Média da região visível (380nm a 760nm)	81,27	85,16	83,66	83,34

A figura 80 e a tabela 18 demonstram gráfica e numericamente o que era apenas visível, ou seja, comprova que os resultados de reflexão especular nos materiais metalizados por evaporação no vácuo, têm amplitudes maiores que os materiais metalizados por projeção catódica. Seguindo com os testes, a figura 82 e a tabela 19 trazem os resultados dos ensaios de reflexão nas amostras de PS virgem.

Figura 82 – Ensaio de reflexão (PS virgem – evaporação no vácuo)



A tabela 19 por sua vez traz os resultados da reflexão na superfície da amostra do PS virgem.

Tabela 19 – Resultados do ensaio de reflexão (PS virgem – evaporação no vácuo)

Parâmetro / comprimento de onda	Reflexividade especular (%) (Amostra 01)	Reflexividade especular (%) (Amostra 02)	Reflexividade especular (%) (Amostra 03)	Médias das amostras (%)
Mínimo (380nm)	77,16	79,77	76,04	77,65
Máximo (760nm)	80,25	82,97	79,58	80,93
Média da região visível (380nm a 760nm)	79,28	81,88	78,63	80,03

Por fim, a figura 83 e tabela 20 trazem as informações dos resultados de reflexão na amostra de PP reciclado.

Figura 83 – Ensaio de reflexão (PP reciclado – evaporação no vácuo)

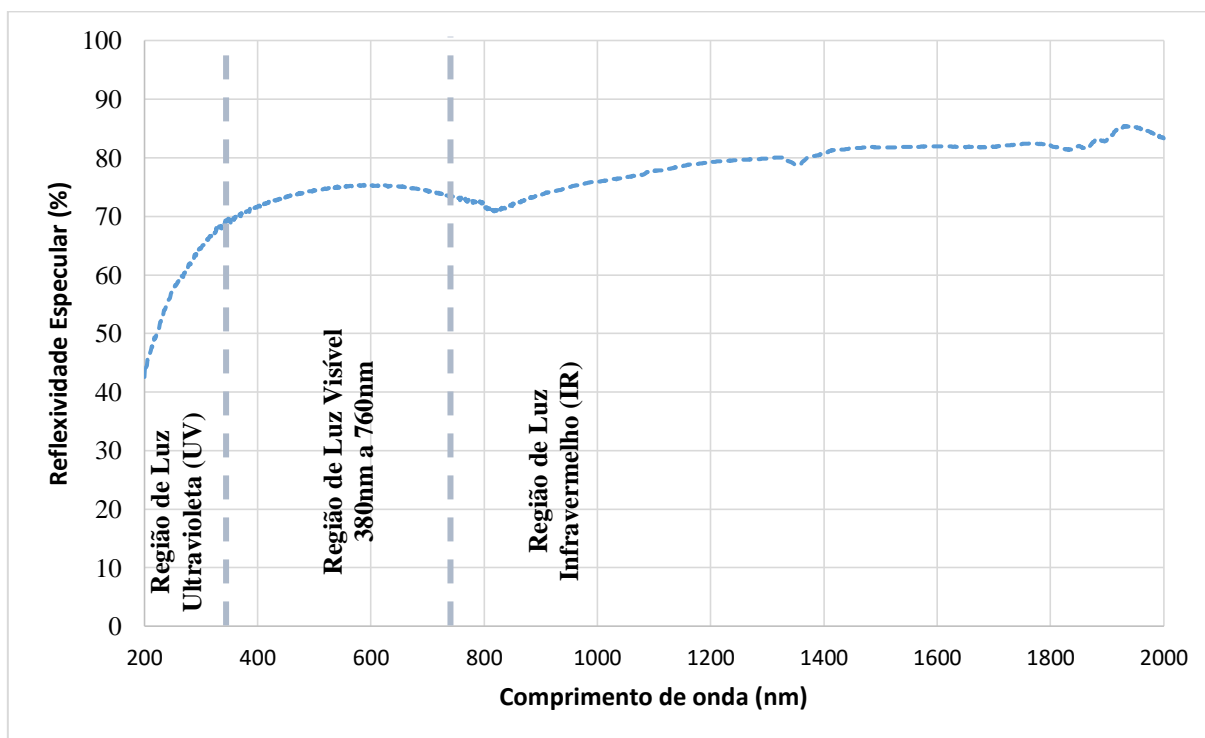


Tabela 20 – Resultados do ensaio de reflexão (PP reciclado – evaporação no vácuo)

Parâmetro / comprimento de onda	Resultados (%)
Mínimo (380nm)	42,56
Máximo (760nm)	85,42
Média da região visível (380nm a 760nm)	76,50

Como as três amostras metalizadas por evaporação no vácuo que chegaram até este ponto obtiveram resultados de reflexão especular maior ou igual a 50%, todas elas estão aptas a etapa de validação. No entanto, como último critério (resistência à tração) que a princípio não era seletivo, agora serve de fator determinante para selecionar apenas um material deste processo para validação. Assim, sendo o ABS virgem o material que apresentou maior resistência à tração (40,62MPa), será, portanto, o selecionado para a construção do protótipo e validação.

4.4.3 Ensaios de Rugosidade

Os ensaios de rugosidade foram realizados nos materiais depois das metalizações em todas as condições a fim de se obter parâmetros comparativos que possam indicar a influência da rugosidade na especularidade das superfícies. Na tabela 21 apresentam-se os resultados dos ensaios de rugosidade nos materiais metalizados pelo processo de projeção catódica.

Tabela 21 – Rugosidades (Ra) nos corpos de prova metalizados por projeção catódica

Material do Substrato	Origem do Material	Preparação da Superfície	Material do filme depositado	Rugosidade (Ra) μm
PEAD	Virgem	Sem Verniz	Cromo	0,11
			Alumínio	0,13
		Com Verniz	Cromo	0,11
			Alumínio	0,07
	Reciclado	Sem Verniz	Cromo	1,38
			Alumínio	0,84
		Com Verniz	Cromo	0,12
			Alumínio	0,90
PEBD	Virgem	Sem Verniz	Cromo	0,12
			Alumínio	0,10
		Com Verniz	Cromo	0,10
			Alumínio	0,10
	Reciclado	Sem Verniz	Cromo	0,31
			Alumínio	0,43
		Com Verniz	Cromo	0,51
			Alumínio	0,44
PS	Virgem	Sem Verniz	Cromo	0,12
			Alumínio	0,13
		Com Verniz	Cromo	7,62
			Alumínio	8,75
	Reciclado	Sem Verniz	Cromo	0,14
			Alumínio	0,29
		Com Verniz	Cromo	1,22
			Alumínio	1,05
PP	Virgem	Sem Verniz	Cromo	0,66
			Alumínio	0,64
		Com Verniz	Cromo	0,22
			Alumínio	0,24
	Reciclado	Sem Verniz	Cromo	0,15
			Alumínio	0,26
		Com Verniz	Cromo	0,88
			Alumínio	0,11
ABS	Virgem	Sem Verniz	Cromo	0,12
			Alumínio	0,19
		Com Verniz	Cromo	0,10
			Alumínio	0,10
	Reciclado	Sem Verniz	Cromo	0,54
			Alumínio	0,65
		Com Verniz	Cromo	0,20
			Alumínio	0,17

Na tabela 21 verifica-se que de forma geral, as superfícies dos materiais virgens tiveram maior tendência a apresentarem rugosidades mais baixas do que nos materiais reciclados. Como já discutido em momento anterior, essa tendência se dá pelo fato de nos materiais derivados de RSU haver uma possibilidade de impurezas estarem juntas com o material desejado de forma que ao solidificar-se a superfície não consegue oferecer uma maior uniformidade. A tabela 22 apresenta os resultados dos ensaios de rugosidade nos materiais metalizados pelo processo de evaporação no vácuo.

Tabela 22 – Rugosidades (Ra) nos corpos de prova metalizados por evaporação no vácuo

Material do Substrato	Origem	Material do filme depositado	Rugosidade (Ra) μm
PEAD	Virgem	Alumínio	0,15
	Reciclado		0,16
PEBD	Virgem		0,12
	Reciclado		0,15
PS	Virgem		0,14
	Reciclado		0,14
PP	Virgem		0,18
	Reciclado		0,11
ABS	Virgem		0,13
	Reciclado		0,34

Verifica-se que neste caso os resultados foram um pouco melhores quando comparados aos resultados obtidos pelo processo de projeção catódica. Realizando a mesma medição na amostra do produto de referência obteve-se o resultado da rugosidade (Ra) de 0,06 μm evidenciando o motivo pelo qual o produto referência oferece maior rendimento de reflexão.

4.5 RESULTADOS DAS VALIDAÇÕES

A tabela 23 apresenta os dois materiais que serão validados comparativamente ao produto de referência bem como suas características mensuradas nos ensaios anteriores.

Tabela 23 – Materiais selecionados para validação e suas características

Material (parte estrutural)	Material (parte reflexiva)	Adesão	Reflexão especular (média)	Resistência à tração
PP reciclado	Alumínio (metalizado por projeção catódica)	4B-5B	70,61%	32,6MPa
ABS virgem	Alumínio (metalizado por evaporação no vácuo)	5B	83,34%	40,62MPa

Definidos, portanto os materiais, segue-se com a validação conforme apontado na seção 3.6.1 (metodologia de validação). Os luxímetros utilizados nas medições do iluminamento do ambiente, foram configurados para realizarem coletas dos dados a cada 250 segundos, objetivando aproveitar melhor a elevada quantidade de dados, foi realizada uma média horária dos dados (durante a luz do dia) criando um “dia típico” dos dias da validação.

4.5.1 Validação: Tubo de PP reciclado metalizado (Al) por projeção catódica

Iniciando-se pelo PP reciclado, a tabela 24 apresenta os dados médios obtidos durante o período de validação que aconteceu entre os dias 29/05/2017 a 23/06/2016. Os dados são apresentados somente para o período da 06h às 18h, ou seja, apenas nos períodos com a presença da luz do dia.

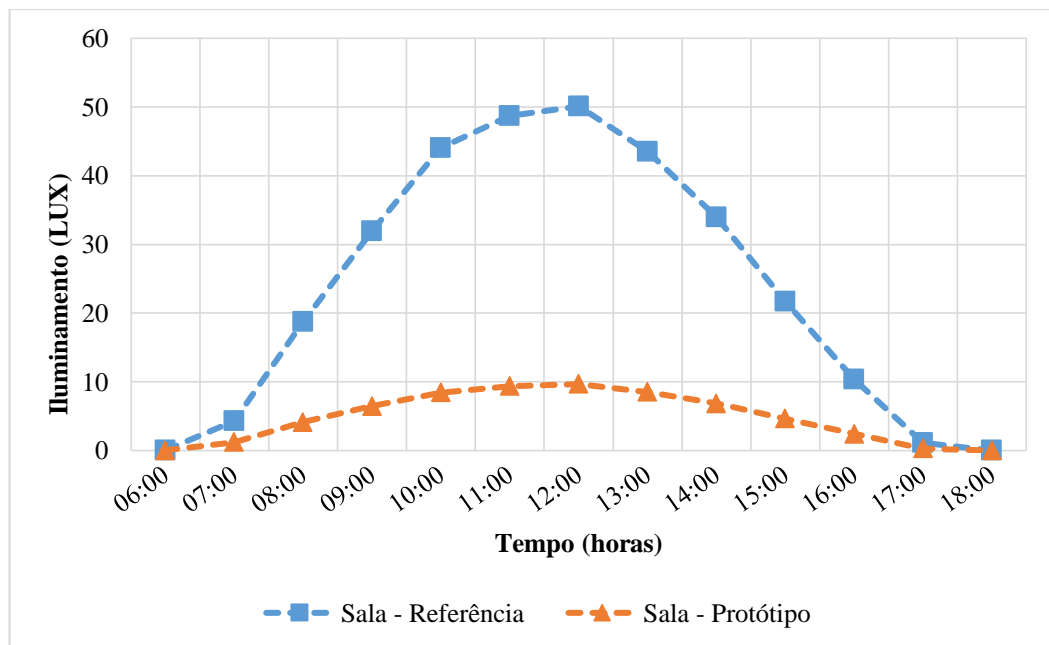
Tabela 24 – Iluminamento médio dos ambientes (Protótipo x Referência – PP reciclado)

Hora	Iluminamento Médio - Referência							Iluminamento Médio - Protótipo							Diferença Média (%)
	LX1 (lux)	LX2 (lux)	LX3 (lux)	LX4 (lux)	LX5 (lux)	LX6 (lux)	Média (lux)	LX1 (lux)	LX2 (lux)	LX3 (lux)	LX4 (lux)	LX5 (lux)	LX6 (lux)	Média (lux)	
06:00	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,01	0,00	0,01	0,03	0,04	0,00	0,02	41%
07:00	3,29	3,82	5,20	5,36	4,02	4,09	4,32	0,79	0,81	1,85	1,78	1,03	0,90	1,21	28%
08:00	14,70	16,51	22,72	22,37	17,60	18,89	18,76	2,50	2,81	6,27	5,91	3,45	3,20	4,12	22%
09:00	25,80	27,63	37,61	38,24	29,87	32,44	31,97	3,98	4,56	10,07	9,23	5,14	4,87	6,45	20%
10:00	37,33	38,12	53,63	51,49	40,98	41,82	44,08	5,29	6,09	13,31	12,30	6,50	6,03	8,45	19%
11:00	39,72	40,95	59,63	58,14	45,01	49,02	48,73	5,80	6,74	15,03	13,78	6,86	6,49	9,35	19%
12:00	41,13	42,19	60,53	59,15	47,41	49,13	50,10	5,88	6,89	15,83	14,44	6,87	6,54	9,67	19%
13:00	37,05	38,41	52,69	51,10	40,45	38,90	43,52	5,12	6,10	14,25	12,93	6,01	5,41	8,54	20%
14:00	27,95	29,35	40,99	40,25	31,74	31,21	33,93	4,12	4,85	11,39	10,27	4,93	4,42	6,84	20%
15:00	17,51	18,97	26,09	26,19	20,46	19,60	21,74	2,75	3,30	7,57	6,80	3,49	3,06	4,63	21%
16:00	8,20	9,08	12,77	12,89	9,55	9,03	10,38	1,38	1,71	3,94	3,50	1,89	1,64	2,43	23%
17:00	0,87	0,95	1,39	1,41	1,06	1,13	1,12	0,11	0,20	0,45	0,39	0,23	0,19	0,28	25%
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0%
Período de medição: 29/05/2017 a 23/06/2017 (25 dias)															21%

A coluna diferença da tabela 24 corresponde a diferença média (6 luxímetros) da iluminação dentro da sala do protótipo em relação à média (6 luxímetros) da sala com o SOLATUBE. Assim, a melhor iluminação dentro da sala do protótipo atingiu apenas 20% da iluminação gerada na sala do SOLATUBE.

A figura 84 demonstra graficamente o comportamento do iluminamento médio horário nas salas onde foram realizados os testes.

Figura 84 – Iluminamento dos ambientes (Referência x Protótipo – PP reciclado)



Verifica-se tabela 24 e o gráfico da figura 84, que o protótipo do PP reciclado apresentou baixo rendimento em comparação com a referência, com cerca de 21% de rendimento médio diário do protótipo em relação a referência. A figura 85 apresenta a média horária da distribuição da luz dentro do ambiente onde foi instalado o protótipo do tubo, e a figura 86 onde foi instalado o tubo referência.

Figura 85 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala protótipo)

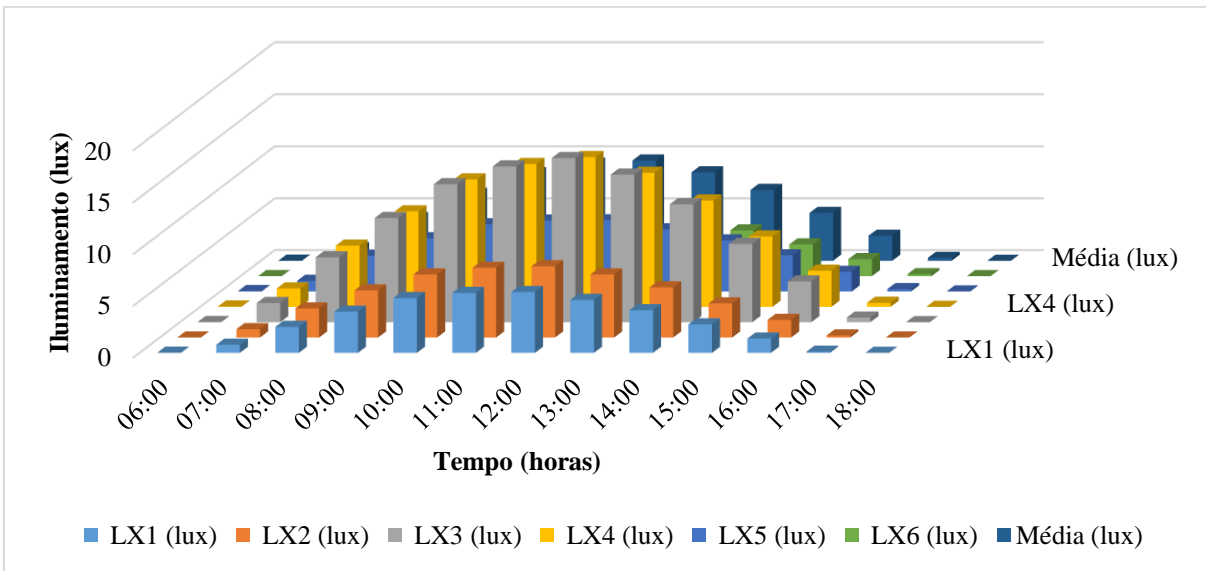
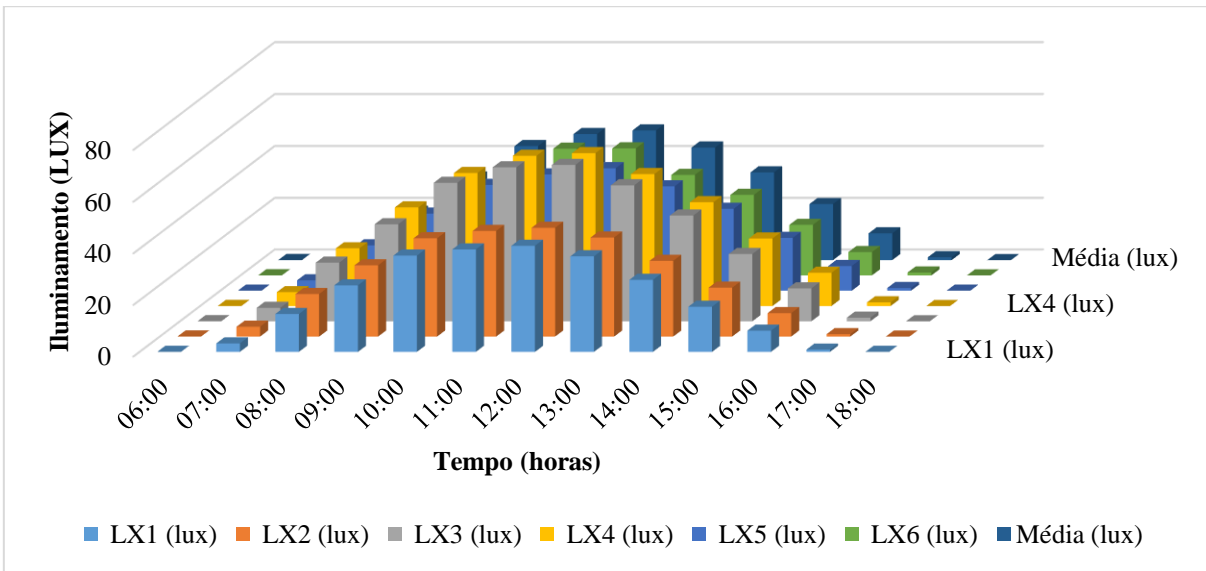


Figura 86 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala referência)



4.5.2 Validação: Tubo de ABS virgem (AI) metalizado evaporação no vácuo

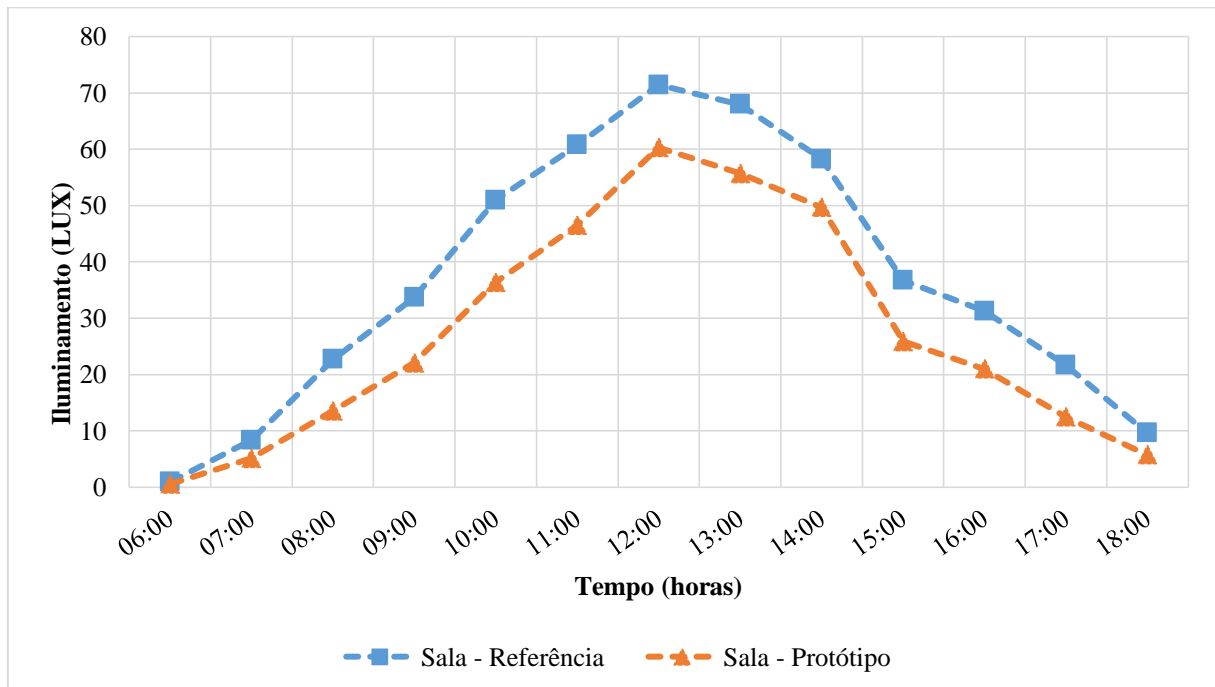
Seguindo com as validações, a tabela 25 por sua vez apresenta os dados médios obtidos durante o período de validação do ABS virgem.

Tabela 25 – Iluminamento dos ambientes (Protótipo x Referência – ABS virgem)

Hora	Iluminamento Médio - Referência							Iluminamento Médio - Protótipo							Diferença
	LX1 (lux)	LX2 (lux)	LX3 (lux)	LX4 (lux)	LX5 (lux)	LX6 (lux)	Média (lux)	LX1 (lux)	LX2 (lux)	LX3 (lux)	LX4 (lux)	LX5 (lux)	LX6 (lux)	Média (lux)	Média (%)
06:00	0,81	1,03	0,96	0,61	0,86	0,69	0,89	0,51	0,49	0,70	0,70	0,49	0,42	0,52	59%
07:00	7,76	9,23	8,98	5,06	8,04	6,81	8,35	3,56	4,65	7,36	6,88	4,65	4,23	5,10	61%
08:00	21,69	24,77	25,71	15,28	19,04	20,28	22,71	9,86	12,12	18,97	17,62	12,21	11,24	13,56	60%
09:00	31,10	35,36	39,21	22,15	28,50	30,53	33,68	17,02	19,91	29,99	28,88	20,21	17,74	22,06	66%
10:00	44,33	50,40	62,25	37,17	42,99	47,94	50,95	29,45	30,03	54,07	46,39	30,22	28,09	36,37	71%
11:00	51,48	55,75	76,64	45,08	53,49	57,96	60,76	36,90	38,10	68,27	59,17	39,29	37,46	46,53	77%
12:00	56,20	59,00	96,47	56,46	54,82	76,98	71,43	41,17	44,77	94,56	87,29	55,57	39,29	60,29	84%
13:00	51,00	59,90	92,67	53,46	52,74	67,30	67,95	31,65	36,22	86,25	84,57	64,53	41,00	55,70	82%
14:00	46,37	50,53	79,91	39,00	50,81	57,06	58,26	34,84	43,14	76,74	63,25	47,23	32,87	49,68	85%
15:00	30,69	37,94	46,06	25,19	29,96	32,23	36,69	21,85	18,99	37,83	35,25	21,60	19,58	25,85	70%
16:00	34,01	39,85	45,06	25,53	30,82	34,09	31,24	17,45	16,68	29,62	26,69	19,04	16,35	20,97	67%
17:00	20,33	23,22	25,20	16,15	17,31	19,40	21,64	7,84	11,00	15,98	16,92	13,03	10,89	12,44	57%
18:00	9,25	10,45	11,23	8,14	7,01	8,63	9,62	4,78	4,83	8,33	7,28	4,74	4,52	5,75	0%
Período de medição: 17/10/2017 a 27/10/2017 (10 dias)															65%

A figura 87 demonstra graficamente o comportamento do iluminamento médio horário nas salas onde foram realizados os testes.

Figura 87 – Iluminamento dos ambientes (Referência x Protótipo – ABS virgem)



Diferentemente do PP reciclado, o ABS virgem tem um comportamento melhor do ponto de vista de rendimento. Como pode ser visto na tabela 25 e o gráfico da figura 87, o protótipo do ABS virgem apresentou rendimento médio de cerca de 65% em relação a

referência. A figura 88 apresenta a média horária da distribuição da luz dentro do ambiente onde foi instalado o protótipo do tubo, e a figura 89 onde foi instalado o tubo referência.

Figura 88 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala protótipo)

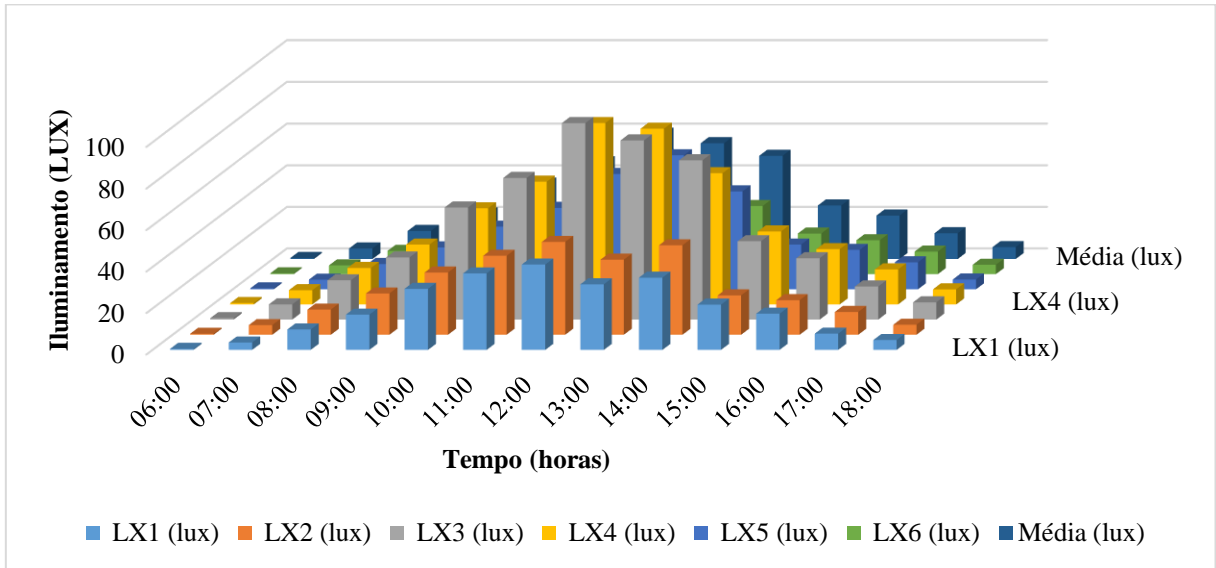
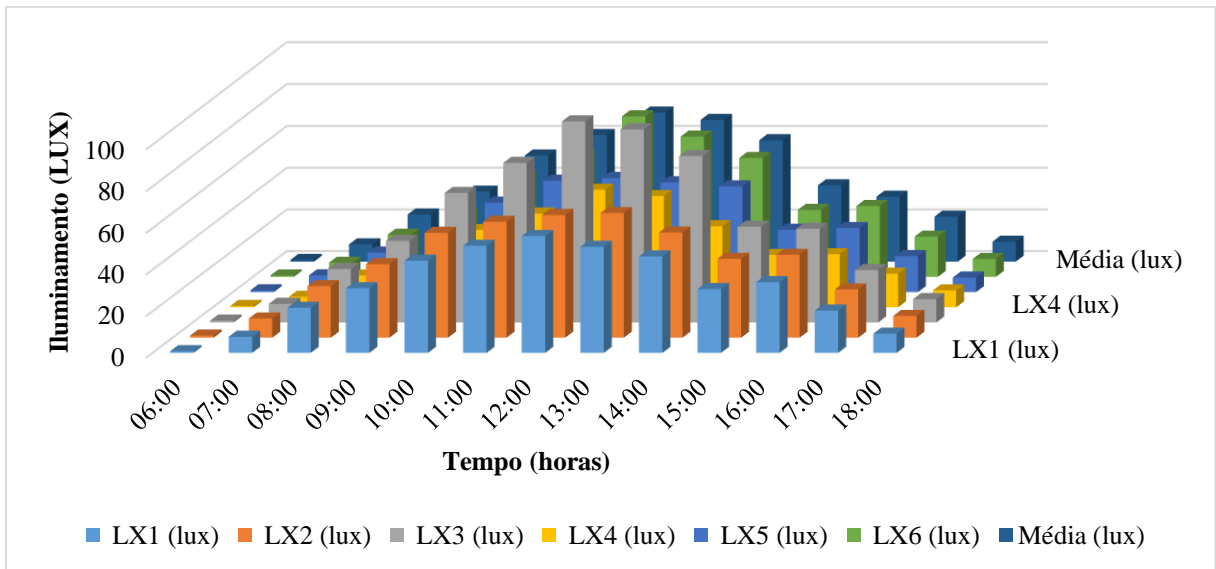


Figura 89 – Distribuição da luz dentro do ambiente (Sala referência)



Percebe-se que a distribuição da luz dentro dos ambientes difere um pouco entre o protótipo e a referência, sendo que isso pode ser motivado por eventual diferença de nivelamento do entre os tubos durante a instalação. No entanto de forma visual, não se nota dentro do ambiente diferenças significativas, sendo que por motivos óbvios a luz tende a ser mais intensa nos luxímetros logo abaixo do difusor do que nos localizados mais nos fundos e início da sala por uma característica natural de distribuição da luz. A figura 90 demonstra uma

foto retirada por volta de 14:30h de dentro da sala onde foi instalado o protótipo do tubo em ABS virgem.

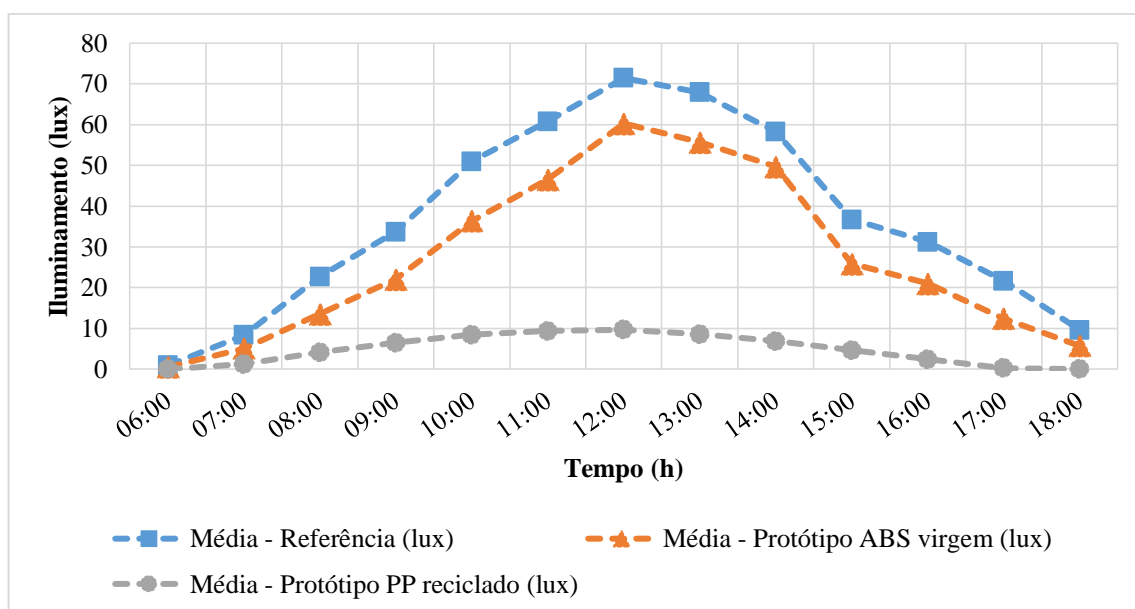
Figura 90 – Protótipo da luminária gerando luz (Sala do protótipo: ABS virgem)



4.5.3 Análise comparativa do rendimento

Os resultados obtidos pelo protótipo do tubo desenvolvido com PP reciclado (metalizado com alumínio pelo processo de projeção catódica), pelo tubo desenvolvido com ABS virgem (metalizado com alumínio pelo processo de evaporação no vácuo) e pelo tubo de referência (SOLATUBE 160DS), são apresentados comparativamente na figura 91.

Figura 91 – Iluminamento dos ambientes (Referência x Protótipo PP x ABS)



Com os dados médios das salas de referência e do protótipo, é possível aplicando-se as equações 8 e 9 da seção 2.3 (projeto de iluminação de interiores) obter a quantidade de fluxo luminoso que foram gerados diariamente durante o processo de validação. A tabela 26 demonstra estas informações.

Tabela 26 – Fluxo luminoso total gerado por dia (médio)

Hora	Iluminamento Médio Referência (lux)	Fluxo luminoso gerado (lumens)	Iluminamento Médio Protótipo ABS virgem (lux)	Fluxo luminoso gerado (lumens)	Iluminamento Médio Protótipo PP reciclado (lux)	Fluxo luminoso gerado (lumens)
06:00	0,89	55,77	0,52	32,72	0,02	1,00
07:00	8,35	521,86	5,10	318,58	1,21	75,60
08:00	22,71	1419,18	13,56	847,39	4,12	257,75
09:00	33,68	2104,71	22,06	1378,80	6,45	403,40
10:00	50,95	3184,49	36,37	2273,43	8,45	528,06
11:00	60,76	3797,64	46,53	2908,30	9,35	584,68
12:00	71,43	4464,68	60,29	3768,41	9,67	604,25
13:00	67,95	4246,57	55,70	3481,29	8,54	533,61
14:00	58,26	3640,98	49,68	3104,98	6,84	427,36
15:00	36,69	2293,38	25,85	1615,58	4,63	289,12
16:00	31,24	1952,50	20,97	1310,72	2,43	151,72
17:00	21,64	1352,80	12,44	777,63	0,28	17,66
18:00	9,62	601,00	5,75	359,20	0,00	0,00
Total		29635,57	Total	22177,04	Total	3874,21

Para os cálculos de fluxo luminoso, foram adotados empiricamente (por ainda não haver informações acerca de luminárias solares) os valores de fator de utilização do recinto (Fu) em 0,3 e o fator de depreciação da luminária (Fdl) em 0,8.

Considerando a aplicação em questão e os parâmetros adotados no cálculo anterior, se potência luminosa gerada pelo tubo referência na validação em um dia foi de 29365,57 lumens, isso quer dizer que a potência horária média é de 2447,13 lumens. Assim, se for considerado uma lâmpada utilizando tecnologia LED (atualmente a tecnologia mais econômica em termos de iluminação) da marca OSRAM modelo CLASSIC A60 (figura 92) que tem um fluxo luminoso de 800 lumens, seriam necessárias que 3,05 lâmpadas deste tipo ficassem ligadas dentro da sala durante as 12h (06h às 18h). Por fim, sabendo que a potência deste modelo é de 10W, seriam consumidos para iluminar a sala nestas condições, cerca de 367,06Wh de energia elétrica por dia, o que neste caso significa energia evitada. Entretanto, apropriando-se dos resultados do estudo apresentado em LEAL (2006), tem-se que a eficiência luminosa variando de 115 a 140lm/W contra os 80lm/W, o que significa uma eficiência de 30,5% maior (adotando-se 115 lm/W). Corrigindo-se o valor, então seriam necessários 479,01Wh de energia elétrica por dia para suprir a iluminação artificial a fim de garantir a mesma condição de luz solar, ou seja, seriam economizados em torno de 174,83 kWh por ano de energia elétrica apenas para um ponto de luz nas condições da validação. Aplicando a mesma metodologia de cálculo, para o tubo de ABS virgem a economia fica em torno 361,75Wh por dia (132,03kWh por ano) e para o tubo de PP reciclado apenas 5,25Wh por dia (1,92 kWh)

Figura 92 – Dados técnico lâmpada LED OSRAM modelo CLASSIC A60

LED SUPERSTAR	LED SUPERSTAR DIM	CLASSIC A60 - (Fig. 1)
Equivalência (W)		60W
Potência (W)		10W
Tensão (V)		100-240V
Fluxo Luminoso (lm)		800 lm
Vida Mediana (h)		25.000h
Índice de Reprodução de Cor		> 80
Fator de Potência		0,7
Temperatura de Cor (K)		2.700 K - QUENTE
Dimerizável		Não
Descrição		LED SS CLA60 10W/827 100-240V E27
Código do Produto		7010690
EAN 10		4052899929883
EAN 40		4052899930018
Unidade por caixa		6
Modelo de embalagem		 Elister



As figuras 93, 94 e 95 apresentam gráficos que demonstram de forma bastante clara que para se manter os índices de iluminamento iguais, seria necessário o incremento significativo de potência elétrica gerando um maior consumo de energia elétrica.

Figura 93 – Potência de luz natural x Potência de luz artificial - Referência

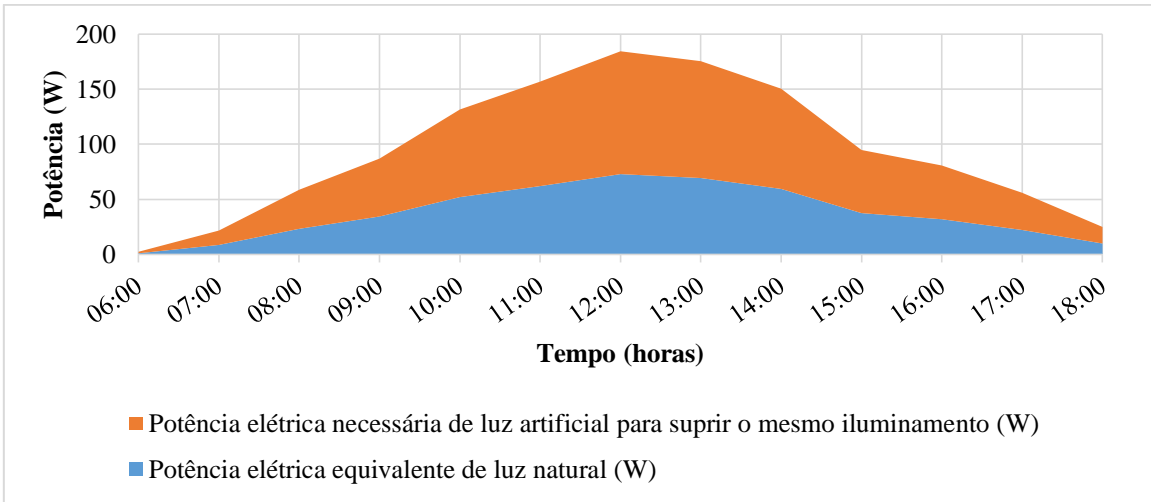


Figura 94 – Potência de luz natural x Potência de luz artificial – ABS virgem

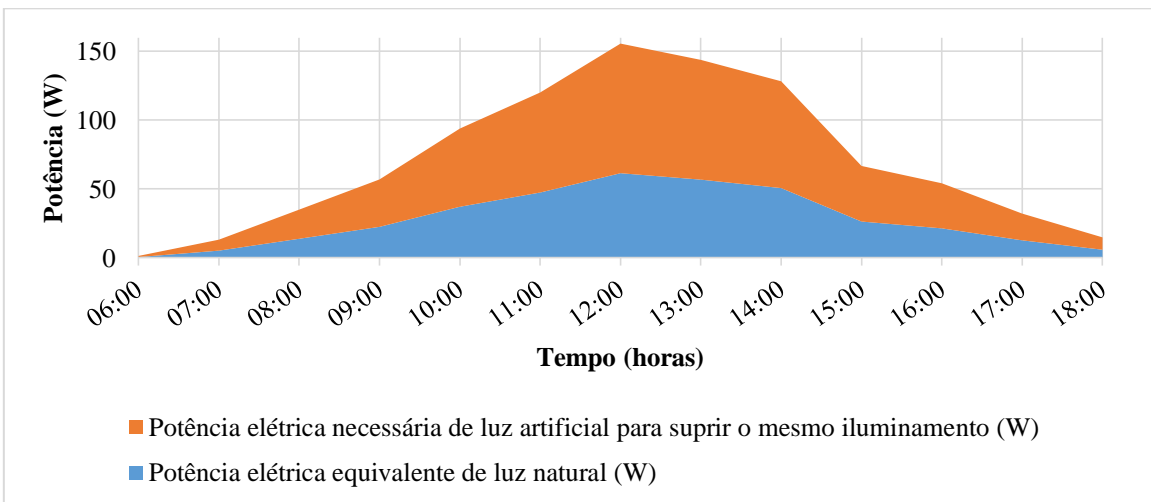
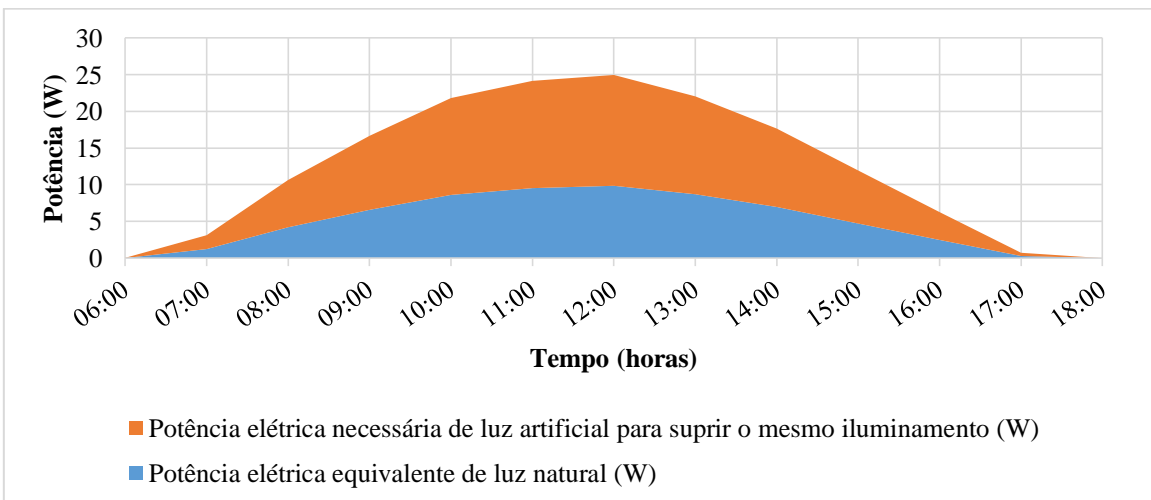


Figura 95 – Potência de luz natural x Potência de luz artificial – PP reciclado

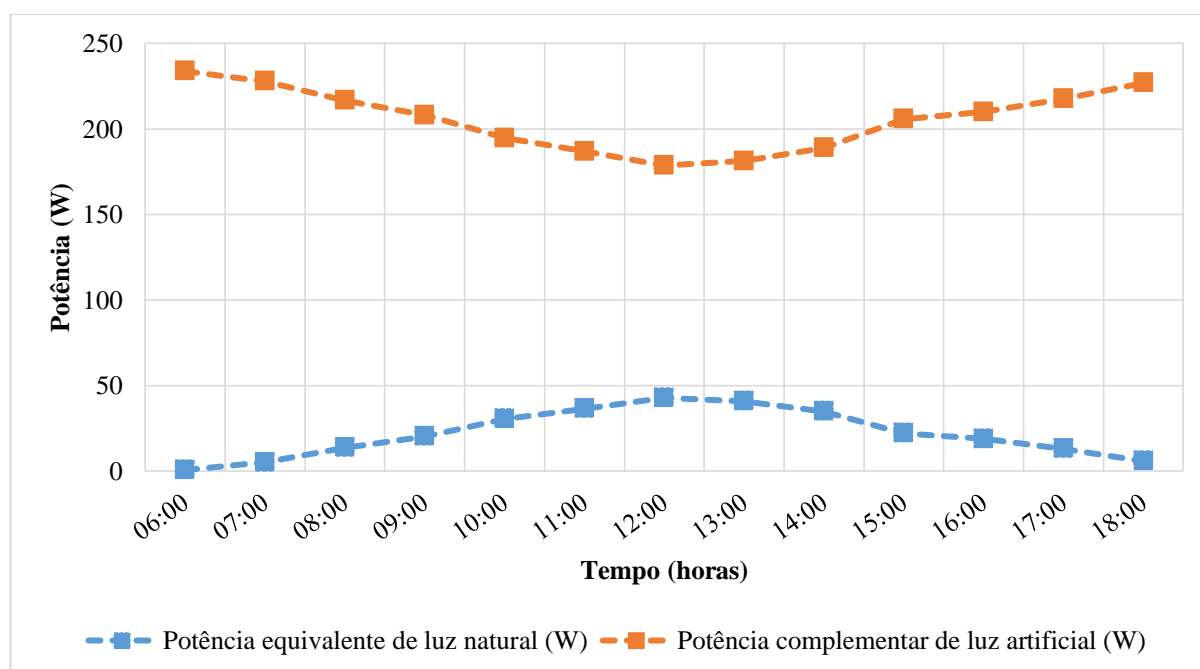


Utilizando a norma ABNT NBR/ISO CIE 8995-1:2013, e considerando que o ambiente utilizado na validação seja uma sala de aula, verifica-se que a norma determina que em construções educacionais, especificamente em salas de aula o iluminamento deve ser de no mínimo 300 lx. A partir dos dados das salas de validação e aplicando-se equações 8 e 9 da seção 2.3 e eficiência luminosa do sol, conclui-se que para manter os 300 lx normalizados é necessário o acréscimo de uma potência de luz artificial conforme apresenta-se na tabela 27 e a figura 96.

Tabela 27 – Potência complementar para 300 lux (Sala referência)

Hora	Iluminamento Médio Referência (lux)	Fluxo luminoso solar gerado (lumens)	Potência equivalente de luz natural (W)	Potência complementar de luz artificial (W)
06:00	0,89	55,77	0,53	233,68
07:00	8,35	521,86	5,00	227,85
08:00	22,71	1419,18	13,59	216,64
09:00	33,68	2104,71	20,16	208,07
10:00	50,95	3184,49	30,50	194,57
11:00	60,76	3797,64	36,38	186,90
12:00	71,43	4464,68	42,77	178,57
13:00	67,95	4246,57	40,68	181,29
14:00	58,26	3640,98	34,88	188,86
15:00	36,69	2293,38	21,97	205,71
16:00	31,24	1952,50	18,70	209,97
17:00	21,64	1352,80	12,96	217,47
18:00	9,62	601,00	5,76	226,86

Figura 96 – Potência complementar para 300 lux (Sala referência)

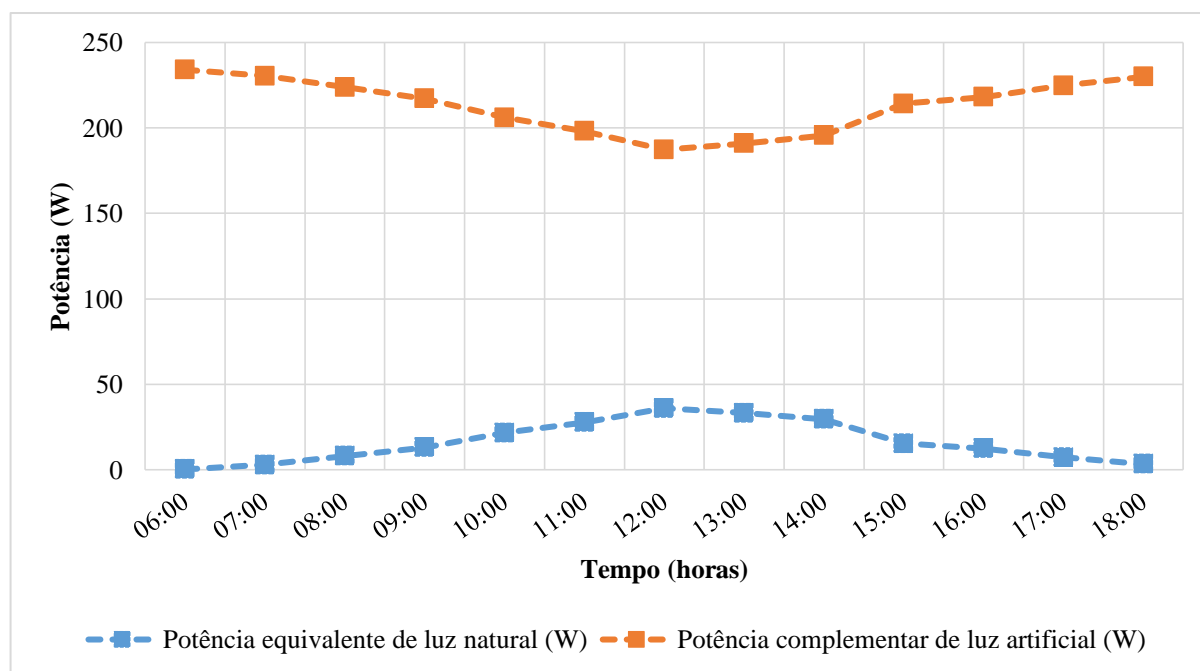


Com a mesma metodologia de cálculo, apresenta-se na tabela 28 e figura 97 os resultados do tubo de ABS virgem.

Tabela 28 – Potência complementar para 300 lux (Sala ABS virgem)

Hora	Média ABS Virgem (lux)	Fluxo luminoso solar gerado (lumens)	Potência equivalente de luz natural (W)	Potência complementar de luz artificial (W)
06:00	0,52	32,72	0,31	233,97
07:00	5,10	318,58	3,05	230,39
08:00	13,56	847,39	8,12	223,78
09:00	22,06	1378,80	13,21	217,14
10:00	36,37	2273,43	21,78	205,96
11:00	46,53	2908,30	27,86	198,02
12:00	60,29	3768,41	36,10	187,27
13:00	55,70	3481,29	33,35	190,86
14:00	49,68	3104,98	29,74	195,56
15:00	25,85	1615,58	15,47	214,18
16:00	20,97	1310,72	12,55	217,99
17:00	12,44	777,63	7,45	224,65
18:00	5,75	359,20	3,44	229,88

Figura 97 – Potência complementar para 300 lux (Sala ABS virgem)

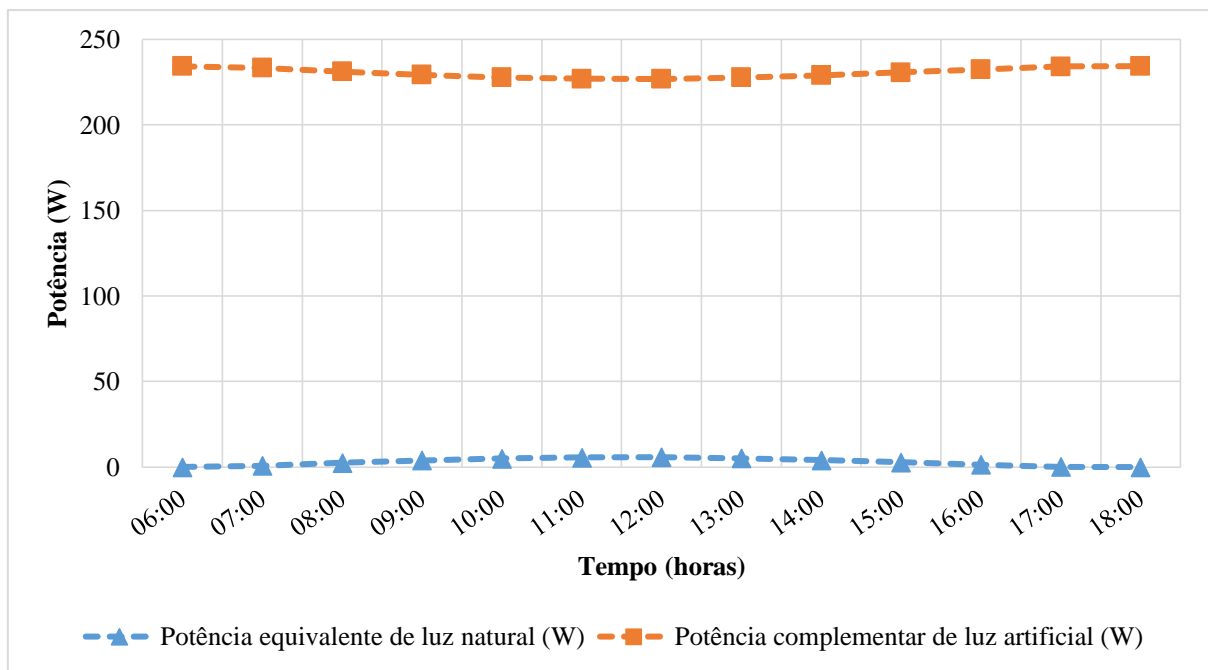


Por fim, segue-se apresentando na tabela 29 e figura 98 os resultados para o PP reciclado.

Tabela 29 – Potência complementar para 300 lux (PP reciclado)

Hora	Média Referência (lux)	Fluxo luminoso solar gerado (lumens)	Potência equivalente de luz natural (W)	Potência complementar de luz artificial (W)
06:00	0,02	1,00	0,01	234,36
07:00	1,21	75,60	0,72	233,43
08:00	4,12	257,75	2,47	231,15
09:00	6,45	403,40	3,86	229,33
10:00	8,45	528,06	5,06	227,77
11:00	9,35	584,68	5,60	227,07
12:00	9,67	604,25	5,79	226,82
13:00	8,54	533,61	5,11	227,70
14:00	6,84	427,36	4,09	229,03
15:00	4,63	289,12	2,77	230,76
16:00	2,43	151,72	1,45	232,48
17:00	0,28	17,66	0,17	234,15
18:00	0,00	0,00	0,00	234,38

Figura 98 – Potência complementar para 300 lux (Sala PP reciclado)



4.5.4 Resultados finais

Do ponto de vista econômico, por se tratar de um protótipo, não é possível determinar com precisão qual a redução do custo do produto utilizando os materiais propostos em relação ao produto comercial de referência. No entanto, estimando-se os custos baseado em informações dos fornecedores, prestadores de serviços e representantes comerciais, pode-se verificar na tabela 30 uma ideia de custos.

Tabela 30 – Custos estimados para montagem do protótipo

Custo	Valor (R\$)
Matéria prima de ABS virgem (80g por semi-tubo) para montar um tubo de 1 metro de comprimento	0,52
Metalização a vácuo por evaporação no vácuo para 20 peças permitindo formar um tubo de 1 metro de comprimento	214,6
Rebites para união das 20 peças que compõe um tubo de 1 metro de comprimento	2,51
Mão de obra para montagem de um tubo de 1m (incluindo custos trabalhistas) para montar um tubo de 1 metro de comprimento, considerando o tempo de montagem em 30 minutos	3,58
Total	221,21

Obs.: Todos os dados estão baseados em informações do mês de novembro de 2017.

Segundo orçamento recebido da empresa representante da SOLATUBE, no dia 31/10/2017, o preço de venda de um tubo reflexivo modelo 160DS é de R\$413,84 por metro. Desta forma o valor estimado do protótipo fica em torno de 46,5% menor, porém há que se considerar que as estimativas foram baseadas na construção de apenas um tubo, ou seja, para produção em larga escala esse valor tende a diminuir consideravelmente.

Finaliza-se a apresentação do trabalho com a tabela 31 de dados técnicos do protótipo desenvolvido e validado.

Tabela 31 – Dados técnicos do protótipo desenvolvido

Material estrutural do tubo	ABS virgem	Sem informações adicionais
Espessura	2mm	Sem informações adicionais
Comprimento	10cm	Produto composto por semi-tubos unidos por rebites, sendo que para cada arco montado tem-se 10cm. Para atingir o comprimento desejado se faz necessário a montagem de tantos arcos quanto necessário
Filme reflexivo	Alumínio	Processo de metalização por evaporação no vácuo
Resistência à tração	40,62 Mpa	ASTM D638
Adesão	5B	ASTM D3359-09
Reflexão nominal média	83,34%	ASTM E903
Temperatura Vítreá	-73°C	Sem informações adicionais
Temperatura de Fusão	175°C	Sem informações adicionais

Os resultados obtidos pelo tubo de ABS virgem metalizado internamente com alumínio pelo processo de PVD de evaporação no vácuo demonstraram um rendimento médio de reflexão na região visível de 83,34%. Conforme a revisão da literatura, estes resultados ficam um pouco abaixo, quando comparado com os fabricantes Espacio Solar (Espanha), Fakro (Portugal), Natural Light Tubular Skylights (EUA), Solabube (Austrália) Chatron (Portugal) que utilizam o alumínio metalizado com prata tendo rendimentos entre 98 e 99,7%, bem como a Velux (Portugal) e Solarspot (Itália) que utilizam alumínio de alto grau de pureza (altamente reflexivo) chegando a rendimento da faixa de 99% e 99,7%. No entanto, considerando-se os resultados obtidos das amostras de 83,34% contra os 91,15% (valor medido), a proposta tem rendimento aproximado 8,67% menor, porém com o decréscimo de sua eficiência obtém-se uma redução nos custos na ordem de 46,5%. De acordo com o artigo intitulado *Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission* (BARONCINI *et al.*, 2010) o valor do rendimento fica em aproximadamente 89% sendo que o material utilizado para o tubo é o oi o alumínio com aplicação de uma película prateada. Enquanto no artigo intitulado *Daylight and energy performances of a new type of light pipe* (CANZIANI; PERON; ROSSI, 2004) segue-se utilizando os mesmos materiais, no entanto concepção geométrica diferente, ou seja, quadrada atingindo um rendimento de cerca de 81% que é inferior ao rendimento obtidos nas amostras. Destaca-se que a abordagem que mais se aproxima desta proposta é o artigo intitulado *Proposta de um sistema alternativo para captação da luz solar de baixo custo para inserção no mercado Brasileiro* (JUNIOR, O. H. A. *et al.*, 2014b) que sugere o uso de tubos

de PVC com aplicação de metalização indireta através da adesão de película automotiva e película de prateada de PVC atingindo valores de cerca de 26,85% e 40,74% de rendimento.

Desta forma, dentro do que foi proposto, os resultados foram satisfatórios permitindo confirmar a viabilidade técnica de construção de tubos reflexivos que atingem valores de rendimento próximos aos tubos comercializados, porém com um custo de quase 50% motivado pelo uso de polímeros como matéria prima.

5 CONCLUSÃO

Em termos de resistência mecânica, utilizando a Norma ASTM D638, verifica-se que dentre os materiais testados, o ABS foi quem apresentou maiores resultados de resistência à tração ficando porém bem abaixo dos resultados da resistência mecânica do alumínio utilizado no produto referência. No entanto, como o produto não sofre esforços mecânicos depois de instalado, a resistência do material é importante apenas para garantir que a estrutura mecânica do tubo resista sem deformar-se às etapas de construção e instalação.

Utilizando a Norma ASTM D3359-09 verifica-se que pelo processo de metalização por evaporação no vácuo, a camada de alumínio depositada sobre o ABS virgem teve adesão total ao substrato. Além disso, o PP reciclado e o PS virgem também tiveram resultados satisfatórios neste quesito. Para a metalização por projeção catódica, apenas o PP reciclado apresentou resultado de máxima adesão.

Quanto a reflexividade das superfícies metalizadas, verifica-se visualmente que o processo de metalização por evaporação a vácuo é muito mais efetivo na deposição do filme quando comparado ao processo de projeção catódica além de ter também um custo menor devido às suas características. A partir dos ensaios de reflexão orientados pela norma ASTM E903, foi possível determinar mais uma vez que o conjunto ABS virgem metalizado com alumínio pelo processo de evaporação no vácuo tem os melhores resultados, atingindo cerca de 83% de reflexividade média da região de luz visível (380 a 760nm). Apesar da menor reflexividade comparada a referência (amostra do tubo solar SOLATUBE) que teve uma média de 91% aproximadamente (valor medido) entre os comprimentos de 380 a 760nm, justifica-se a continuidade do trabalho pelo menor custo do produto final. Com o PP reciclado obteve-se uma reflexão média menor que nos processos chegando a 70% de reflexão.

Por fim, as validações do protótipo quanto a efetividade de transmissão da luz (rendimento) ocorreram em períodos curtos, sendo 25 dias para o PP reciclado (metalizado com alumínio pelo processo de projeção catódica) de 10 dias para o ABS virgem (metalizado com alumínio por evaporação no vácuo) devido a questões de disponibilidade. O ideal seria a realização da validação no período de um ano completo, que permitiria levantar o comportamento da reflexão no tubo durante todos os meses do ano considerando diferentes estações do ano e também para verificação da depreciação do fluxo refletido a partir do envelhecimento do material. Mesmo assim, percebeu-se que no caso do ABS virgem

metalizado com alumínio pelo processo de evaporação no vácuo, o rendimento do protótipo da luminária ficou próximo ao SOLATUBE 160DS. Os aspectos construtivos do protótipo contribuíram para a atenuação da reflexão devido a quantidade elevada de emendas (semi-tubos e anéis). Apesar de não ter sido mensurado essa atenuação, entende-se que se o produto final for construído de forma inteiriça com o mínimo de emendas, o resultado final do rendimento do tubo seja ainda melhor que o obtido na validação.

Logo, a principal conclusão retirada do projeto é a efetiva comprovação da viabilidade técnica de desenvolvimento de um tubo reflexivo utilizando materiais poliméricos metalizados com alumínio em substituição as soluções comerciais que utilizam alumínio metalizado com prata, objetivando exclusivamente a redução no custo do produto.

Ressalta-se que todos os ensaios foram realizados em condição severas, ou seja, com um comprimento de tubo de 2m que é uma condição arquitetônica bastante incomum, o que quer dizer que os resultados apresentados são de ensaios em condições extremas, ou seja, em condições normais de instalações em edificações os desempenhos serão superiores aos apresentados no resultado desta tesa

Destaca-se que as análises foram realizadas em escala laboratorial com base em um protótipo desenvolvido. Portanto, ao se trabalhar com design de produto para aplicação em larga escala permitirá o aperfeiçoamento do modelo proposto e conseqüentemente acréscimo no rendimento e redução do custo de produção tornando a proposta mais atraente e vantajosa técnica e econômica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar o estudo apresentado, sugere-se para trabalhos futuros a avaliação de outros pontos que por falta de disponibilidade não foi possível contemplar:

- Avaliação aprofundada da transmissão de calor no tubo pela reflexão e qual o impacto deste parâmetro no conforto térmico do ambiente;
- Avaliação do comportamento do rendimento do tubo durante as diferentes estações do ano e condições climáticas, bem como frente ao envelhecimento sofrido pelos materiais;
- Avaliar através de equacionamento, a influência das emendas dos semi-tubos e anéis na atenuação do rendimento do tubo reflexivo e projeto de tubo em formato que facilite a otimização da reflexão;
- Determinar a atenuação do fluxo luminoso em função do comprimento do mesmo e também em função de curvas existentes na tubulação;
- Avaliar os efeitos da temperatura da aplicação proposta nos materiais poliméricos empregados;
- Avaliar a influência sobre a transmissão do espectro infravermelho e ultravioleta na temperatura do ambiente;
- Realizar um estudo da vida útil dos tubos solares com os materiais propostos para fundamentar um estudo de viabilidade econômica;
- Realizar um estudo sobre a possibilidade de construção de tubos solares utilizando impressoras 3D com os materiais poliméricos PLA ou ABS.
- Realizar um estudo sobre a resposta do tubo em função do espectro e ângulo de inclinação solar;

7 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

O presente trabalho deu origem a algumas publicações com abordagem geral sobre a proposta e também com alguns subprodutos da proposta principal, conforme pode ser visto na tabela 32.

Tabela 32 – Relação de periódicos já publicados sobre o tema abordado

Título	Periódico	ISSN	Autores	Ano
Proposta de um sistema alternativo para captação da luz solar de baixo custo para inserção no mercado Brasileiro	Elsevier – Ciência e Tecnologia dos Materiais (CTMAT)	0870-8312	Ando Junior, O. H., Da Rosa, H. B., Spacek, A. D., Malfatti, C. F., Schaeffer, L.	2014
Proposal the Use of Alternative Materials for Construction of an Alternative Low-Cost Sunlight Collecting System to Latin American Market	Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)	2172-038X	Spacek, A. D., Mota, J. M., Biléssimo, L. D., Ando Junior, O. H., Malfatti, C. F., Santana, M. V. F de	2016
Proposal for an Experimental Methodology for Evaluation of Natural Lighting Systems Applied in Buildings	<i>Energies</i> — Open Access Energy Research, Engineering and Policy Journal	1996-1073	Spacek, A. D., Neto, J. M., Bilessimo, L. D., Ando Junior, O. H., Santana, M. V. F. de, Malfatti, C. F.	2017
Sistema Híbrido de Captação de Energia para Iluminação de Ambientes Através de Luminária Híbrida Número do registro:	INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial	BR1020170133362	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) / Campos Novos Energia S.A. / Energética Barra Grande S.A.	2017
Proposal of the Tubular Daylight System Using Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Metalized with Aluminum for Reflective Tube Structure	<i>Energies</i> — Open Access Energy Research, Engineering and Policy Journal	1996-1073	Spacek, A. D., Neto, J. M., Bilessimo, L. D., Ando Junior, O. H., Freitas, G. P., Gianisella R. da S., Santana, M. V. F. de, Malfatti, C. F.	2017

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Plástico Perfil 2014**. São Paulo - SP: [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://file.abiplast.org.br>>.

ABNT. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 (Iluminação de Ambientes de Trabalho - Parte 1 : Interior)**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

ALBUQUERQUE, J. A. C. **Planeta plástico: Tudo o que você precisa saber sobre plásticos**. 1. ed. Porto Alegre - RS: Editora Sagra Luzzato, 2000.

AL-MARWAEI, M.; CARTER, D. Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances. **Applied Energy**, 2006. v. 83, n. 7, p. 774–788.

BADOTTI, A. V. B. **Avaliação do processo de metalização superficial aplicado à peças obtidas por estereolitografia**. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2003.

BARONCINI, C. *et al.* Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission. **Elsevier - Solar Energy**, 2010. v. 84, n. 2, p. 296–307. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002771>>.

BEST, W. J.; JUNIOR, M. L. **Method of producing coated vacuum metallized articles**. United States Patent Office.

BOCCIA, O.; CHELLA, F.; ZAZZINI, P. Natural light from a wall in buildings: Experimental analysis of the ventilated illuminating wall performances. **Elsevier - Solar Energy**, 2014. v. 108, p. 178–188.

CABRAL, I. D. S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R. Energia Solar – Análise Comparativa Entre Brasil E Alemanha. Salvador - BA: ConGeA, 2013. p. 1–10.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo - SP: Artliber Editora Ltda, 2006.

CANZIANI, R.; PERON, F.; ROSSI, G. Daylight and energy performances of a new type of light pipe. **Elsevier - Energy and Buildings**, 2004. v. 36, n. 11, p. 1163–1176. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880400146X>>.

CARVALHO, T. Espectro Eletromagnético - InfoEscola. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>>. Acesso em: 29 out. 2015.

CAVALIN, G.; CERVELIN, S. **Instalações elétricas prediais**. 19. ed. São Paulo - SP: Érica, 2009.

CIUGUDEANU, C.; BEU, D. Passive Tubular Daylight Guidance System Survey. **Procedia Technology**, 2016. v. 22, p. 690–696. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212017316001456>>.

COSTA, G. J. C. Da. **Iluminação Econômica - Cálculo e Avaliação**. 4. ed. Porto Alegre - RS: EDIPUCRS, 2006.

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações elétricas prediais/industriais**. 5. ed. São Paulo - SP: Pearson, 2008.

CREDER, H. **Instalações Elétrica Creder**. 15. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros técnicos e científicos editora S.A., 2007.

DEYNA, A. **Metalização de Polímeros Empregados no Setor Automotivo**. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2015. ISBN 9788578110796.

EDMONDS, I. Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section. **Elsevier - Solar Energy**, 2010. v. 84, n. 6, p. 928–938. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.001>>.

EFILUX. Iluminação Eficiente. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.efilux.com.br/hotsite/produtosresidenciailluzdodia.html>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

ENERGIA ECO. Soluções em energia renováveis. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://www.energiaeco.com.br/>>. Acesso em: 7 nov. 2015.

ENERGÍA ESTRATÉGIA. Energías renovables. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.energiaestrategica.com/>>. Acesso em: 7 nov. 2015.

EPE. **Consumo de Energia no Brasil Análises Setoriais**. Rio de Janeiro - RJ: Ministério de Minas e Energia (MME), 2014.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2015**. Brasília (DF): Empresa de pesquisa energética, 2015.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2016**. Brasília (DF): Empresa de pesquisa energética, 2016.

FILHO, J. M. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. São Paulo - SP: LTC - Livros técnicos e científicos editora S.A., 2010.

FRAGA, S. C. L. **Reciclagem de materiais plásticos: Aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais**. 1. ed. São Paulo - SP: Érica, 2014.

GARCIA-HANSEN, V.; EDMONDS, I. Methods for the illumination of multilevel buildings with vertical light pipes. **Elsevier - Solar Energy**, 2015. v. 117, p. 74–88.

GARROCHO, J. S.; AMORIN, C. N. D. **Luz natural e projeto de arquitetura - Estratégias para iluminação zenital em centros de compras**. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2005.

GHISI, E.; TINKER, J. Potencial de economia de energia em iluminação através da utilização de fibras ópticas. **Ambiente Construído**, 2008. p. 61–77.

GIL-MARTÍN, L. M. *et al.* Study of light-pipes for the use of sunlight in road tunnels: From a scale model to real tunnels. **Elsevier - Tunnelling and Underground Space Technology**, 2014. v. 41, p. 82–87.

GOETTEN, T. B. V.; SANTOS, G. T. Dos; GÜNDEL, A. Produção e caracterização de filmes finos de permalloy sobre substratos de ouro. (UNIPAMPA, Org.). Bagé(RS): UNIPAMPA, 2015. p. 2.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3. ed. São José dos Campos: Editora da universidade de São Paulo, 2012.

GRIGOLETTI, G. De C. *et al.* **Caderno didático (DAU2062) - Conforto ambiental II**. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/>>.

GUERRINI, D. P. **Iluminação Teoria e Projeto**. 1. ed. São Paulo - SP: Érica, 2007.

HUKSEFLUX BRASIL. Thermal Sensors. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.huksefluxbrasil.com.br>>. Acesso em: 6 nov. 2015.

IBGE. Renda domiciliar per capita em 2014. [S.l.], 2014. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 8 nov. 2015.

JUNIOR, O. H. A. *et al.* Proposal of a Hybrid System for Solar and Photovoltaic for Lighting Low Cost. **Renewable Energies and Power Quality (RE&PQJ)**, 2014a. v. 1, n. 12, p. 248. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/RE&PQJ-papers.html>>.

JUNIOR, O. H. A. *et al.* Proposta de um sistema alternativo para captação da luz solar de baixo custo para inserção no mercado Brasileiro. **Elsevier - Ciência & Tecnologia dos Materiais**, 2014b. v. 26, n. 1, p. 17–24.

KIM, J. T.; KIM, G. Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. **Building and Environment**, 2010. v. 45, n. 2, p. 256–269. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.024>>.

KOCIFAJ, M. Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing. **Elsevier - Solar Energy**, 2009. v. 83, n. 2, p. 186–192. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08001825>>.

KÜCHLER, M. M. **Avaliação da metalização de polímeros pelo processo de magnetron sputtering: Um estudo de preliminar**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFSC), 2006.

LEAL, S. Da S. **MEDIDAS E MODELAGEM DA RADIAÇÃO PAR PARA O NORDESTE DO BRASIL**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

LEITE, A. D. **A Energia do Brasil**. 2. ed. São Paulo - SP: Elsevier Editora Ltda, 2007.

LOPEZ, R. A. **Energia Solar Para Produção De Eletricidade**. 1. ed. São Paulo - SP: Artliber Editora Ltda, 2012.

MAISARQUITETURA. Projeto de arquitetura residencial por ONG & ONG arquitetos. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://maisarquitectura.com.br>>. Acesso em: 7 nov. 2015.

MALET-DAMOUR, B. *et al.* Light Pipes Performance Prediction: Inter Model and Experimental Confrontation on Vertical Circular Light-guides. **Elsevier - Energy Procedia**, 2014. v. 57, n. 0, p. 1977–1986. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214014295>>.

MALET-DAMOUR, B. *et al.* Study of tubular daylight guide systems in buildings: Experimentation, modelling and validation. **Energy and Buildings**, 2016. v. 129, p. 308–321. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816306995>>.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo - SP: Blucher, 1999.

MARTINHO, R. P. C. Da S. **Revestimentos PVD mono e multicamada para moldes utilizados na injeção de plásticos reforçados**. [S.l.]: Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, 2009.

MAYHOUB, M. S. Innovative daylighting systems' challenges: A critical study. **Energy and Buildings**, 2014. v. 80, p. 394–405. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.019>>.

MICHAELI, W. *et al.* **Tecnologia dos plástico**. 1. ed. São Paulo - SP: Editora Edgard BlücherLtda, 1995.

MOREIRA, V. De A. **Iluminação Elétrica**. 2. ed. São Paulo - SP: Edgard Blücher Ltda, 2006.

NILSSON, A. M.; JONSSON, J. C.; ROOS, A. Spectrophotometric measurements and ray tracing simulations of mirror light pipes to evaluate the color of the transmitted light. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2014. v. 124, p. 172–179. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.049>>.

ÖNGÜÇ ÖZGÜN, B. A. **Tubular light guidance systems as advanced daylighting strategy**. [S.l.]: Istanbul Technical University, 2007.

PALÁCIO, S. M. *et al.* Tratamento de efluentes de cromagem por eletrocoagulação com eletrodo de aço inoxidável e eletrodo misto de aço inoxidável e alumínio. **Revista de Escola de Engenharia da UFF (ENGEVISTA)**, 2013. v. 15, n. 3, p. 248–254.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1°. ed. São José dos Campos: Artes Gráficas Graficor S.R.L, 2006.

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais. Série: Conversando sobre ciências em alagoas**. Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

PINTO, R. J. F. **Injeção e caracterização do comportamento mecânico de polímeros termoplásticos**. [S.l.]: Instituto superior de engenharia de Coimbra (ISEC), 2012.

PIRASACI, T. Investigation of laminar natural convection heat transfer within tubular daylighting devices for winter conditions. **Journal of Building Engineering**, 2015. v. 4, p. 52–59. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2015.08.003>>.

PIVA, A. M.; WIEBECK, H. **Reciclagem do plástico: Como fazer da reciclagem um negócio lucrativo**. 1. ed. São Paulo - SP: Artliber Editora Ltda, 2004.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the facts 2014/2015: An analysis of European plastics production, demand and waste data**. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <http://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/final_plastics_the_facts_2014_19122>.

RIANI, J. C. **Utilização de resinas de troca-ionica em efluentes de galvanoplastia**. [S.l.]: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

RODRIGUES, L. *et al.* **Metalização de superfícies não condutoras : ABS**. [S.l.]: Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto (FEUP), 2014.

ROSA, A. V. DA. **Processos de Energias Renováveis**. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier Editora Ltda, 2015.

SANTOS, A. J. **A Iluminação natural nos edifícios - Uma perspectiva no âmbito do conforto ambiental e da eficiência energética**. LNEC.

SAPIA, C. Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber. **Solar Energy**, 2013. v. 89, p. 113–121. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.003>>.

SHUKLA, R. *et al.* Recent advances in the solar water heating systems: A review. **Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013. v. 19, p. 173–190.

SHUXIAO, W.; JIANPING, Z.; LIXIONG, W. Research on energy saving analysis of tubular daylight devices. **Energy Procedia**, 2015. v. 78, p. 1781–1786. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.305>>.

ŠIKULA, O.; MOHELNÍKOVÁ, J.; PLÁŠEK, J. Thermal analysis of light pipes for insulated flat roofs. **Elsevier - Energy and Buildings**, 2014. v. 85, p. 436–444. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814007816>>.

SILVA, E. P. Da. **Fontes renováveis - Produção de energia para um desenvolvimento sustentável**. 1. ed. São Paulo - SP: Livraria da física, 2014.

SOLARGIS. Geomodel Solar. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://solargis.info>>. Acesso em: 6 nov. 2015.

SOLATUBE. Iluminação Natural. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.solatube.com>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

SUTTER, F. *et al.* Spectral characterization of specular reflectance of solar mirrors. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2016. v. 145, p. 248–254. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.10.030>>.

SWIFT, P. D. *et al.* Rectangular-section mirror light pipes. **Elsevier - Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2008. v. 92, n. 8, p. 969–975. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024808000810>>.

SWIFT, P. D. Splayed mirror light pipes. **Elsevier - Solar Energy**, 2010. v. 84, n. 2, p. 160–165. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X09002400>>.

SWIFT, P. D. D.; SMITH, G. B. Cylindrical mirror light pipes. **Elsevier - Solar Energy Materials and Solar Cells**, 1995. v. 36, n. 2, p. 159–168. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)00172-3](http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248(94)00172-3)>.

THOMPSON, C. **Avaliação da contração e do coeficiente de expansão térmico linear em copolímeros heterofásicos**. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

TIBA, C. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. **Atlas Solarimétrico do Brasil**, 2000. v. 1, p. 111. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>>.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros - Vol.2**. 5. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros técnicos e científicos editora S.A., 2006.

TIWARI, G. N.; AL-HELAL, I. M. ScienceDirect Dynamic analysis of daylight metrics and energy saving for rooftop window integrated flat roof structure of building. **Elsevier - Solar Energy**, 2015. v. 122, p. 834–846. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.012>>.

TOLEDO, B. G.; CLAUDIA NAVES D. AMORIM. **Integração de iluminação natural e artificial: Métodos e guia prático para projeto luminotécnico**. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2008.

TREGENZA, P.; LOE, D. **Projeto de iluminação**. 2. ed. Porto Alegre - RS: Bookman editora Ltda, 2015.

VERSO, V. R. M. LO; PELLEGRINO, A.; SERRA, V. Light transmission efficiency of daylight guidance systems: An assessment approach based on simulations and measurements in a sun/sky simulator. **Solar Energy**, 2011. v. 85, n. 11, p. 2789–2801. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.017>>.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica - Conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo - SP: Érica, 2012.

WENGINOWICZ, A. **Estudo visando otimizar configurações de indução magnética para uso em um magnétron em reator de plasma**. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2007.

YU, X.; SU, Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation –A literature review. **Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015. v. 52, p. 494–503.