



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

*Sistemas Inovadores de Iluminação
Natural. Estudo de Seu Desempenho Sob
Condições de Céu Real em Campinas, SP.*

Flavia Ciampini

Campinas, agosto de 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

Sistemas Inovadores de Iluminação
Natural. Estudo de Seu Desempenho Sob
Condições de Céu Real em Campinas, SP.

Flavia Ciampini

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sergio Scarazzato

Dissertação de Mestrado apresentada à
Comissão de Pós-graduação da Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Estadual de
Campinas, Unicamp, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil, na área de
concentração de Edificações.

Campinas, agosto de 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

| | |
|-------|---|
| C481s | <p>Ciampini, Flavia Sistemas inovadores de iluminação natural. estudo de seu desempenho sob condições de céu real em Campinas, SP / Flavia Ciampini.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.</p> <p>Orientador: Paulo Sergio Scarazzato Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Iluminação natural. 2. Medição de iluminância. 3. Fachadas. 4. Janelas. 5. Luz na arquitetura. 6. Fotometria. I. Scarazzato, Paulo Sergio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.</p> |
|-------|---|

Titulo em Inglês: New daylight redirecting devices. evaluation of their
performance under real sky condition.

Palavras-chave em Inglês: Daylight systems, Daylighting facade, Windows,
Light in architecture, Photometry

Área de concentração: Edificações

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Lucila Chebel Labaki, Fernnado Oscar Ruttkay Pereira

Data da defesa: 26/08/2005

Aos meus Pais

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

Sistemas Inovadores de Iluminação
Natural. Estudo de Seu Desempenho sob
Condições de Céu Real em Campinas, SP.

Flavia Ciampini

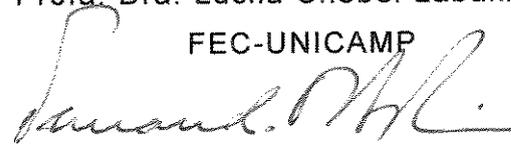
Dissertação aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Paulo Sérgio Scarazzato, Dr.
Presidente e Orientador
FEC-UNICAMP



Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki, Dra
FEC-UNICAMP



Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.
Departamento de Arquitetura e Urbanismo –UFSC

Campinas, 26 agosto de 2005

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof Dr.Paulo Sergio Scarazzato, pela orientação e pela confiança depositada no meu trabalho,

À Profa. Lucila, à Profa. Rosana, à Profa. Stellamaris pelo apoio e pela disponibilidade sempre demonstradas.

Ao Prof. Dr. Ian R. Edmonds, ao Eng. Dr. Helmut Köster, à empresa Okalux e à empresa Siteco e Schott pelo fornecimento dos painéis, livros e orientações técnicas.

À Fapesp pelo apoio financeiro.

Ao Diretor do Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Christiano Lyra Filho, pelo espaço cedido para o experimento e ao Eng. João Bertim pelas orientações na construção dos protótipos.

Aos técnicos Obadias e Daniel pela preciosa ajuda na montagem do experimento.

Ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron pela possibilidade de uso das instalações para reprodução dos painéis.

Ao amigo. Wendel pela amizade e colaboração.

E ao Antonio, pelo incentivo, amor e infindáveis explicações de física.

Sumário

| | |
|---|---------------|
| <i>Lista de Figuras</i> | <i>xi</i> |
| <i>Lista de Tabelas</i> | <i>xxix</i> |
| <i>Lista de Símbolos</i> | <i>xxxí</i> |
| <i>Resumo</i> | <i>xxxiii</i> |
| <i>Abstract</i> | <i>xxxv</i> |
| Capítulo 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Estrutura da Dissertação | 5 |
| Capítulo 2 Objetivos | 7 |
| 2.1 Objetivo Geral | 7 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 8 |
| Capítulo 3 Revisão Bibliográfica | 9 |
| 3.1 O Espectro Luminoso..... | 10 |
| 3.1.1 A Radiação Solar..... | 11 |
| 3.2 Interação da Luz com Matéria | 12 |
| 3.2.1 Difração | 14 |
| 3.2.2 Óptica Geométrica..... | 15 |
| 3.3 Disponibilidade de Luz Natural..... | 21 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.1 Luz Direta: Movimentos Aparentes do Sol | 22 |
| 3.3.2 Determinação da Trajetória Solar..... | 26 |
| 3.3.3 Luz Difusa | 34 |
| 3.3.4 Modelo de Céu Encoberto..... | 37 |
| 3.3.5 Modelo de Céu Claro | 41 |
| 3.3.6 Modelo De Céu Parcialmente Nublado | 42 |
| 3.3.7 Modelo Padrão CIE/ISO 2004 | 44 |
| 3.3.8 Determinação da Iluminância | 49 |
| 3.3.9 Análise dos Dados | 52 |
| 3.4 Função das Aberturas Laterais..... | 53 |
| 3.5 Dispositivos de Redirecionamento..... | 56 |
| 3.5.1 Brises | 58 |
| 3.5.2 Okasolar..... | 67 |
| 3.5.3 Koster Louvres | 70 |
| 3.5.4 Perfis RETROLux..... | 72 |
| 3.5.5 RETROLuxTherm..... | 77 |
| 3.5.6 RETROFLEX..... | 81 |
| 3.5.7 Materiais Transparentes Isolantes | 84 |
| 3.5.8 Painéis Prismáticos | 87 |
| 3.5.9 Filmes Prismáticos | 98 |
| 3.5.10 Sistema Huppe..... | 98 |
| 3.5.11 Laser Cut Panel..... | 99 |
| 3.5.12 Channel Panel..... | 105 |
| 3.5.13 Light Guiding Shade | 107 |
| 3.5.14 Filmes Holográficos | 108 |
| 3.5.15 Serraglaze | 110 |
| 3.5.16 Prateleira de Luz | 117 |
| 3.5.17 Sistemas Anidólicos | 124 |
| 3.5.18 HELIOSTATOS | 126 |
| 3.5.19 DUTOS DE LUZ..... | 128 |
| Capítulo 4 Metodologia | 131 |

| | |
|---|-----|
| 4.1 Método Experimental | 132 |
| 4.1.1 Descrição do Experimento..... | 133 |
| 4.1.2 Sistema de Medição | 140 |
| 4.2 Método de Predição | 152 |
| 4.2.1 Laser Cut Panel..... | 153 |
| 4.2.2 Painéis Prismáticos | 159 |
| 4.2.3 Brises..... | 160 |
| Capítulo 5 Resultados | 163 |
| 5.1 Laser Cut Panel 0° | 164 |
| 5.1.1 Fotos Internas..... | 168 |
| 5.2 Laser Cut Panel 9° | 169 |
| 5.2.1 Fotos Internas..... | 171 |
| 5.3 Laser Cut Panel 12° | 172 |
| 5.3.1 Fotos Internas..... | 175 |
| 5.4 Channel Panel..... | 175 |
| 5.5 Prismatic Panel | 179 |
| 5.5.1 Fotos Internas..... | 182 |
| 5.6 RETROLux..... | 183 |
| 5.6.1 Fotos Internas..... | 185 |
| 5.7 RETROLuxTherm..... | 187 |
| 5.7.1 Fotos Internas..... | 189 |
| 5.8 RETROFlex..... | 189 |
| 5.8.1 Fotos Internas..... | 191 |
| 5.9 OKASOLAR | 192 |
| 5.9.1 Fotos Internas..... | 195 |
| 5.10 TRANSPARENT ISOLATED MATERIAL..... | 195 |
| 5.11 Micro Sun Shielding Louver | 199 |
| 5.12 Combisol | 202 |
| 5.13 Médias Mensais | 204 |
| 5.13.1 Painéis do Grupo 1 | 205 |
| 5.13.2 Painéis do Grupo 2 | 213 |

| | |
|---|-----|
| Capítulo 6 Conclusões | 219 |
| 6.1 Ferramenta de Predição | 220 |
| 6.2 Sistema de Aquisição de Dados | 220 |
| 6.3 Avaliação do Desempenho dos Modelos | 221 |
| 6.4 Limitações..... | 222 |
| 6.5 Considerações Finais | 222 |
| 6.6 Perspectivas | 224 |
| Referências | 226 |
| I. Anexo I - A Estrutura do Olho..... | 237 |
| I.1.1 A Visão..... | 241 |
| I.2 Grandezas Fotométricas..... | 243 |
| I.2.1 O Fluxo Luminoso | 244 |
| I.2.2 Intensidade Luminosa | 245 |
| I.2.3 Iluminância | 246 |
| I.2.4 Luminância | 251 |
| I.3 Ofuscamento | 253 |
| I.3.1 Índices de Desconforto para o Ofuscamento | 255 |
| II. Anexo II - Circuito Eletrônico..... | 260 |
| Programa de Aquisição..... | 268 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 - Espectro das cores, cada comprimento de onda monocromático é percebido pelo olho como uma cor. Fonte: OVERHEIM, 1982..... | 11 |
| Figura 3.2 - Interação da luz com a matéria. A soma das três componentes, refletida (ρ) absorvida (α) e transmitida (τ) representa 100% da luz incidente. Fonte: modificado de CHAVES, 2001 | 13 |
| Figura 3.3 - Difração, experimento com interferência de ondas. Fonte: Adaptado de SOBEL, 1987 | 14 |
| Figura 3.4 - Diferentes reflexões em função das propriedades do material. Fonte: CHAVES, 2001 | 16 |
| Figura 3.5 - Para planos horizontais o complementar do ângulo de incidência (α) será igual ao complementar do ângulo de reflexão (β). Ao inclinar o plano de um ângulo (γ)Fonte: CHAVES, 2001..... | 17 |
| Figura 3.6 – (a) Reflexão e refração. (b) diferença de índice de refração ($n_1 < n_2$). c) diferença de índice de refração ($n_1 > n_2$). Fonte: CHAVES, 2001..... | 18 |
| Figura 3.7 - Diferença Angular na refração (CHAVES, 2001)..... | 19 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.8 – Reflexão Interna Total. | 20 |
| Figura 3.9 - O formato da parábola permite focar a luz em um único ponto. | 21 |
| Figura 3.10 – Trajetória aparente do Sol em relação à Terra. A inclinação (\square) entre a Eclíptica e o Equador celeste determina solstícios e equinócios. Fonte: KÖSTER, 2004 | 24 |
| Figura 3.11 - (a) Duração dos dias e noites para Equinócios de Primavera e Outono (respectivamente á esquerda) e solstício de inverno e verão (respectivamente á direita) | 25 |
| Figura 3.12 - Trajetória aparente do sol no equador e no pólo norte | 25 |
| Figura 3.13 –(A) Plano de projeção tangente ao pólo.(B). Projeção Ortográfica do globo terrestre . (C) Projeção Ortográfica da trajetória Solar. Fonte: www.3dsoftware.com/Cartography/USGS/MapProjections/Azimuthal/Orthographic | 28 |
| Figura 3.14 – Projeção Eqüidistante horizontal | 28 |
| Figura 3.15 – (a) Diagrama para obtenção da projeção estereográfica. (b)Reta projetante que liga o ponto a ser projetado (A, B, C) ao Nadir, gerando os pontos projetados (A',B',C') no plano de projeção (c) Carta Solar na projeção estereográfica horizontal. Fonte: SNYDER, 1987 | 30 |
| Figura 3.16 – Projeção Gnomônica Horizontal..... | 31 |
| Figura 3.17- Projeção Estereográfica dos percursos aparentes do sol para latitude - 22,9°, com sobreposição do transferidor horizontal. Fonte: www.labee.ufsc.br/software/luzDoSol | 32 |
| Figura 3.18 – Distribuição de nuvens em Campinas de março à outubro. Fonte: do autor | 36 |
| Figura 3.19 - Céu claro variação de luminância na abobada celeste. Fonte: HERNANDES-ANDRES, 2003..... | 36 |
| Figura 3.20 - Céu homogêneo, a luminância não varia com parâmetros geométricos como altura e azimute, céu de Campinas em 06/06/05. Fonte: ROBBINS, 1986 . | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.21 - Figura céu uniforme, luminância no zênite 3 vezes maior que no horizonte, céu de Campinas em 06/06/05. Fonte: ROBBINS, 1986 | 38 |
| Figura 3.22 – Influencia da luminância da abobada celeste. Fonte: Modificado de ANDERSEN, 2004 | 40 |
| Figura 3.23 - Ângulos azimutais e zenitais. Fonte: ANDERSEN, 2004 | 41 |
| Figura 3.24 - a) Céu claro, 12h , 09/2005,Campinas b) mapa de contornos da radiância normalizada c) sobreposição dada pelo mapa de contorno. Fonte: HARRISON e COOMBES, 1988 | 42 |
| Figura 3.25 - :Ângulos zenitais e azimutais que definem a posição do sol e de um elemento no céu. Fonte: ISO 15469:2004 | 45 |
| Figura 3.26- Hemisfera de raio unitário e sua projeção no plano horizontal | 49 |
| Figura 3.27 – Princípio do ângulo Sólido Projetado Fonte: ABNT 2005 | 50 |
| Figura 3.28 - Subdivisão da abóbada celeste em 220 zonas (projeção estereográfica). | 51 |
| Figura 3.29 - Coordenadas do sol e de um ponto P no céu..... | 51 |
| Figura 3.30 – Gráfico de Isoluminancias. Fonte: TORRICELLI, SALA e SECCHI, 1995 | 53 |
| Figura 3.31 Lei do inverso do quadrado das distâncias..... | 54 |
| Figura 3.32 – Queda da iluminância com a distância da janela. Fonte: BAKER e STEEMERS, 2002 | 54 |
| Figura 3.33 - Tipos convencionais de brises. Fonte: http://www.luxalon.com.br/ | 58 |
| Figura 3.34 a) brise convencional (b)- Primeiras inovações (c) sistema triangular. Fonte: WILLFRIED, 2005..... | 61 |
| Figura 3.35 - Brise com perfil triangular (a) Perfis sobrepostos (b)Seção dos Perfis (c) Perfis Rotacionados em função do eixo de simetria (S). Fonte: BARTENBACH, 1987. DIGERT, 2001. | 62 |
| Figura 3.36 - Reflexões nos panos de vidro duplos, causadas pelos brises são fonte de ofuscamento. Fonte:–KÖSTER, 2001 | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.37 – Seção transversal de uma lamela. Comportamento dos feixes incidentes. | 65 |
| Figura 3.38 - Comportamento do perfil côncavo para alturas solares maiores (a) e menores (b). Fonte: KÖSTER, 2001 | 66 |
| Figura 3.39 - Vista externa e interna do edifício sede da Empresa Schrodtt, em Iserlohn, Alemanha, do arquiteto Martin Schrodtt. Fonte: OKALUX, 2002..... | 68 |
| Figura 3.40 - (a) Brises convencionais geram ofuscamento se posicionados horizontalmente. (b) rotacionados para proteger da radiação solar do verão não permitem vista para o exterior. (c) o novo perfil Okasolar permite uma maior transparência, garantindo uma proteção solar, permitindo que os brises permaneçam abertos mesmo no verão. Fonte: KÖSTER, 2004 | 69 |
| Figura 3.41 - Dispositivo OKASOLAR, da empresa OKALUX. Fonte: www.okalux.de .. | 69 |
| Figura 3.42 - Perfil do Okasolar, (a) desenho esquemático do redirecionamento da radiação solar direta. Fonte: OKALUX, 2002. | 70 |
| Figura 3.43 - Brises convencionais bloqueio da visão para garantir a proteção solar. Rotacionando obtêm-se maior proteção de maiores angulações, garantindo visibilidade. Fonte: KÖSTER, 2004 | 71 |
| Figura 3.44 – RETROLux. A inclinação da segunda porção do perfil determina a visibilidade e o ângulo de reflexão. Fonte: KÖSTER, 2004..... | 71 |
| Figura 3.45 - Seção lateral do brise. Fonte: KÖSTER, 2001..... | 72 |
| Figura 3.46 - (a) perfil convencional possui boa visibilidade, mas cria ofuscamento. (b) Ao rotacionar o perfil convencional reduz-se a transparência e os níveis de iluminação (c) Ao dividir o perfil em duas porções melhora-se a transparência (d) Com a geometria elaborada aumenta-se a transparência ao mesmo tempo que garante-se a proteção da radiação para maiores angulações solares Fonte: KÖSTER, 2004..... | 73 |
| Figura 3.47 - Figura lamelas (a) a porção dentada do perfil, retro-reflete feixes de angulações solares maiores que 45°. (b) Perfil O, reflete a radiação para ângulos | |

próximos da horizontal, como resultado os feixes penetram no ambiente em profundidade. (c) Perfil U reflete a radiação para ângulos próximos da normal, evitando o ofuscamento em alturas inferiores a 1,90m. Fonte: KÖSTER, 2004...74

Figura 3.48 - Esquema explicativo do funcionamento combinado dos perfis O e W.75

Figura 3.49 - Redirecionamento dos feixes com os diferentes perfis. Fonte: KÖSTER, 2004.....75

Figura 3.50 - Curvas de distribuição da intensidade para um RetroLux O para uma altura solar de 30° e Azimute 0°. Em (A) a elevação. Em (B) a planta baixa. Fonte: KÖSTER, 200476

Figura 3.51 - Curvas de distribuição da intensidade para um RetroLux O para uma altura solar de 30° e Azimute 30°. Em (A) a elevação. Em (B) a planta baixa. Fonte: KÖSTER, 200476

Figura 3.52 – Perfis de Retroluxtherm, O e U, respectivamente. Fonte: KÖSTER, 200478

Figura 3.53 - Painéis na parte superior e inferior da abertura, com um espaço livre na altura do observador. Fonte: KÖSTER, 200478

Figura 3.54 – Office for monument preservation em Esslingen do arquiteto Odilo Reutter.....79

Figura 3.55 - (a) Redirecionamento dos feixes incidentes para os perfis RETROLux U (b) RETROLuxTherm O e (c) RETROLuxTherm U. Fonte: KÖSTER, 200479

Figura 3.56 - Simulação mostra o comportamento de dois conjuntos de brises RETROLux, O e U perfil O e U, no gráfico são mostrados a incidência solar, a radiação difundida para o interior e a radiação retro-refletida. Nos gráficos aparece a porcentagem da energia radiante transmitida em função do ângulo de incidência, Fonte: KÖSTER 2004.....80

Figura 3.57 - Simulação mostra o comportamento de dois conjuntos de brises RETROLuxTherm perfil O e U, no gráfico são mostrados a incidência solar, a radiação difundida para o interior e a radiação retro-refletida. Nos gráficos aparece

| | |
|--|----|
| a porcentagem da energia radiante transmitida em função do ângulo de incidência, Fonte: KÖSTER 2004. | 81 |
| Figura 3.58 - (a) Mombino high-rise Zurique Arquitetos Heinz Zimmerman e Rolf Lauppi. (b) perfil RETROFlex. Fonte: KÖSTER, 2004 | 82 |
| Figura 3.59 - Figura (a) planta baixa e vista de perfis verticais para fachadas leste e oeste. (b) planta baixa e vista de perfis verticais duplos, para fachada norte. Fonte: KÖSTER, 2004..... | 83 |
| Figura 3.60 - Desenho esquemático de um perfil convencional e do RETROFLEX..... | 83 |
| Figura 3.61 –Retro-reflexão para um RETROFLEX na posição Horizontal. Fonte: KÖSTER, 2004..... | 84 |
| Figura 3.62 - Painel de OKALUX entre vidros. Fonte: KALTENBACH, 2004. | 85 |
| Figura 3.63 - (a) esquema de funcionamento. (b) detalhe do funcionamento para capilares retos e inclinados (c). Fonte: OKALUX, 2002b | 86 |
| Figura 3.64 - (a) permeabilidade ao UV. (b) Decaimento das iluminâncias em função da distância | 86 |
| Figura 3.65 - Politechnic Temasek. Fonte: OKALUX, 2002b..... | 87 |
| Figura 3.66 - (a) Painéis prismáticos. (b) Sistema triangular de painéis prismáticos. (c) Painéis prismáticos dispostos em forma de brises. Fonte: www.bominsolar.com. 88 | |
| Figura 3.67 - (a)Painéis Prismáticos para iluminação lateral. (b) A painéis para iluminação zenital. Fonte: www.bomin solar.de..... | 89 |
| Figura 3.68 - Comportamento do feixes ao incidirem no prisma. (a) 1- Refração dos feixes na passagem de meios com índices de refração diferentes (ar/acrílico e acrílico/ ar). 2 - Reflexão interna total, com ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão. 3-Refração, reflexão interna total e nova refração nas superfícies do prisma mudam a direção do feixe. (b) 4- Raios sofrem diversas refrações no interior do prisma e reflexão interna total. (c) Ao incidirem no prisma os feixes sofrem dispersão, assim os diferentes comprimentos de ondas são refratados com ângulos diferentes. Fonte: KÖSTER, 2004 | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.69 - À esquerda, painel prismático, a direita, desenho esquemático do posicionamento dos painéis prismáticos (LORENZ 1998)..... | 92 |
| Figura 3.70 Inclinação do eixo longitudinal dos prismas em relação ao eixo horizontal, em função da latitude azimute da abertura. Fonte: LORENZ, 2001 | 92 |
| Figura 3.71 - Trajetória dos feixes incidindo sobre o painel prismático. Fonte: LORENZ, 2001..... | 93 |
| Figura 3.72 - Período de radiação excluído do interior em função da declinação solar δ_r . Fonte:www.siteco.de | 95 |
| Figura 3.73 - Foto e esquema do Sistema Huppe. Fonte: KOSTER, 2004..... | 99 |
| Figura 3.74 – (a) Vista de um Painel de Corte a Laser em instalação tipo veneziana. | 100 |
| Figura 3.75- (a) Corte transversal de um LCP. (b) Elevação da luz defletida em função do ângulo de incidência. Fonte: EDMONDS, 1991..... | 101 |
| Figura 3.76– Direção dos feixes que determina os ângulos máximos e mínimos da faixa angular para a qual toda a luz é defletida. Fonte: EDMONDS 1991a..... | 103 |
| Figura 3.77 Fração da luz defletida para o um elemento retangular $\theta = 0^\circ$ e para inclinadas $\theta = 7^\circ$, para diferentes padrões geométricos de altura e espessura do painel (D/W). Fonte: Edmonds, 1991..... | 104 |
| Figura 3.78 - Intervalo angular para o qual 100% da radiação é defletida para o interior do ambiente com D= 4mm e W=10mm. Fonte: do autor. | 105 |
| Figura 3.79 – Vista de um canto do Channel Panel, mostrando as duas placas de acrílico sobrepostas, com suas respectivas lamelas reflexiva | 106 |
| Figura 3.80 – Funcionamento do Channel Panel para diferentes alturas solares..... | 106 |
| Figura 3.81 - Light Guiding Shade. Fonte: EDMONDS e GREENUP, 2002 | 107 |
| Figura 3.82 - Brise de vidro com filme holográfico “Daylight Guidance Systems”, David Carter Society of Light and Lighting, East Anglia Region 2004. Fonte: KOSTER, 2004..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.83 - A esquerda sistema Serraglaze. “High-Performance Commercial Building Façades”. A direita, corte esquemático do funcionamento dos vazios..... | 110 |
| Figura 3.84 - Esquema de montagem de placas acrílicas sobrepostas, formando o dispositivo. Fonte: http://www.serraglaze.redbus.co.uk | 111 |
| Figura 3.85 - Possíveis desenhos do dispositivo em função dos diferentes desempenhos luminosos a serem alcançados. Fonte: http://www.serraglaze.redbus.co.uk | 112 |
| Figura 3.86 - A esquerda, Corte de um painel simples e sobreposição de dois painéis, formando o dispositivo de iluminação natural. A direita, Detalhe em escala aumentada do SERRAGLAZE. Fonte: MILNER, 2002..... | 113 |
| Figura 3.87 - Representação dos feixes incidentes no painel para uma placa simples e para uma placa composta. Fonte: MILNER, 2002..... | 114 |
| Figura 3.88 - Placas com encaixe triangular. Fonte: MILNER, 2002..... | 116 |
| Figura 3.89 -A, B, C, D, E – Diferentes formas de aplicação para os painéis de SERRAGLAZE. Fonte: MILNER, 2002..... | 116 |
| Figura 3.90 - (a) Corte esquemático de uma Prateleira. (b) Tipologias de prateleiras de luz. Fonte: IEA, 2000..... | 118 |
| Figura 3.91 - Prateleira de luz com filme refletivo. Fonte: BOER, 1995 | 122 |
| Figura 3.92 - Vista de uma abertura sem prateleira de luz, com uma prateleira pintada em branco e com um película refletiva. Fonte: BELTRAN, 1994 | 123 |
| Figura 3.93 - Sistemas anidólicos no Aeroporto Internacional de Zurique. Fonte: do autor..... | 124 |
| Figura 3.94 - Corte esquemático de um sistema anidólico. Fonte: WELFORD e WINSTON, 1989 | 125 |
| Figura 3.95 - Corte esquemático de um sistema anidólico com coletor zenital..... | 126 |
| Figura 3.96 - Heliostato. Fonte: http://www.bartenbach.com | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.97 - Rodoviária de Bushof Aachen Fonte: http://www.bomin-solar.de/bushof_aachen.htm | 127 |
| Figura 3.98 - Duto de luz com cobertura altamente refletiva. Duto Prismático. Fonte: IEA, 2000..... | 128 |
| Figura 3.99 - Dutos horizontais e verticais. Fonte: IEA, 2000..... | 129 |
| Figura 3.100 – (esquerda) Desenho esquemático de dutos com lentes. (direita) Duto oco com ranhuras prismáticas. Fonte: COBB, 1989..... | 129 |
| Figura 4.1 - Vista Aérea da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEEC) onde os modelos em escala foram instalados. A caixa d'água de quatro andares onde o experimento foi realizado garante um ambiente de medição livre de obstrução. Fonte: do Autor | 134 |
| Figura 4.2 - (A) Face norte dos protótipos, vista da Avenida Albert Einstein, em direção da entrada principal. (B) Face oeste, vista da Avenida Albert Einstein em direção à Faculdade de Engenharia Agrícola. Fonte: do Autor | 134 |
| Figura 4.3 - Foto dos 4 protótipos sobre a laje da caixa d'água do bloco E da FEEC, 135 | |
| Figura 4.4 – Planta baixa do modulo, com as distâncias do sensores. Fontr: do Autor | 136 |
| Figura 4.5 – (A) Planta baixa do protótipo, em vermelho os sensores internos e externo. | 136 |
| Figura 4.6 - Espectro de transmissão do vidro comum utilizado..... | 137 |
| Figura 4.7 – Imagem do entorno do módulo, sobre a laje da caixa d'água do bloco E da FEEC. | 138 |
| Figura 4.8 - Painel prismático, Micro Sun Shielding Louvre, Combisol, RETROLux, RETROFlex, RETROLuxTherm, TIM, Laser Cut Panel, 0° 12°, Channel Panel e Okasolar W. Fonte: do Autor | 139 |
| Figura 4.9 - LDR de CdS utilizado no sistema de medição. Fonte: www.selcoproducts.com | 140 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.10 - Resposta espectral do sensor de CdS. Fonte: www.selcoproducts.com | 141 |
| Figura 4.11 - Curva de resposta característica do LDR. Fonte: www.selcoproducts.com | 141 |
| Figura 4.12 - Instrumentos para calibração do sistema- A) Luxímetro Minolta B) Multímetro Radio Shack. C) Halopin® 60W OSRAM. | 142 |
| Figura 4.13 - Gráfico de calibração, Lux em função de Ohms | 143 |
| Figura 4.14 - Efeito co-seno medido para u luxímetro e para o LDR. | 143 |
| Figura 4.15 – Monocromador utilizado. | 144 |
| Figura 4.16 - Montagem com lâmpada, monocromador, divisor de tensão, conversor analógico digital e CPU, para obter a curva que representa a resposta experimental da sensibilidade do LDR. | 147 |
| Figura 4.17 - Resposta espectral em volts medida experimentalmente para o LDR e para o detector de Silício..... | 147 |
| Figura 4.18 - Curva da resistência em função do Comprimento de onda | 148 |
| Figura 4.19 - Respostas normalizadas proporcionais a intensidade de luz incidente sobre o LDR e Silício (Resposta Experimental) | 150 |
| Figura 4.20 - Curva de resposta do detector de silício. Fonte: www.newport.com | 150 |
| Figura 4.21 - Resposta Espectral do LDR, do silício e do olho humano (curva fotóptica). | 151 |
| Figura 4.22 – Legenda para a tabela de alturas e azimutes solares | 152 |
| Figura 4.23 - Primeira Planilha. Entrada de dados, dimensões do módulo e posição Solar | 154 |
| Figura 4.24 – Deflexão da luz no interior dos módulos, em função do Horário. Funcionamento do LCP para diferentes θ , no solstício de verão e inverno para a latitude de Campinas..... | 155 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.25 - Ângulos solares incidentes e de reflexão interna em Campinas para $\theta=0^\circ$ (A) e $\theta=2^\circ$ (B) e $\theta=9^\circ$ (C) e $\theta=12^\circ$ (D).(Os ângulos são discriminados na planilha). | 157 |
| Figura 4.26 - Fração defletida. (a) a curva vermelha mostra a fração defletida para $\theta=0^\circ$ e a curva Azul para $\theta=2^\circ$, em função da incidência solar. (b) A curva vermelha mostra a fração defletida para $\theta=0^\circ$ e $\theta=12^\circ$ | 158 |
| Figura 4.27 - Inclinação do painel prismático (w) em função da variação do azimute, para latitudes $22^\circ 49'$ Sul (Campinas) e norte. | 160 |
| Figura 4.28 - Funcionamento das lamelas achatadas e curvas..... | 161 |
| Figura 5.1 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março..... | 165 |
| Figura 5.2 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril..... | 166 |
| Figura 5.3 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio..... | 166 |
| Figura 5.4 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho..... | 166 |
| Figura 5.5 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho..... | 167 |
| Figura 5.6 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu encoberto em março. | 167 |
| Figura 5.7 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu encoberto em abril. | 168 |
| Figura 5.8 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)..... | 168 |
| Figura 5.9 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março..... | 170 |
| Figura 5.10 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril..... | 170 |
| Figura 5.11 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio..... | 170 |
| Figura 5.12 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.... | 171 |
| Figura 5.13 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março..... | 171 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.14 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita) | 172 |
| Figura 5.15 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março. . | 173 |
| Figura 5.16 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril. | 173 |
| Figura 5.17 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. ... | 173 |
| Figura 5.18 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. .. | 174 |
| Figura 5.19 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março. | 174 |
| Figura 5.20 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em junho..... | 174 |
| Figura 5.21 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita) | 175 |
| Figura 5.22 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março. . | 176 |
| Figura 5.23 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril. | 176 |
| Figura 5.24 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. ... | 177 |
| Figura 5.25 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. .. | 177 |
| Figura 5.26 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março. | 177 |
| Figura 5.27 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em junho..... | 178 |
| Figura 5.28 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março. . | 180 |
| Figura 5.29 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril. | 180 |
| Figura 5.30 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. ... | 180 |
| Figura 5.31 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. .. | 181 |
| Figura 5.32 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho..... | 181 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.33 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente nublado em março..... | 181 |
| Figura 5.34 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril. | 182 |
| Figura 5.35 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)..... | 182 |
| Figura 5.36 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. | 184 |
| Figura 5.37 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. | 184 |
| Figura 5.38 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho. | 184 |
| Figura 5.39 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio. | 185 |
| Figura 5.40 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)..... | 185 |
| Figura 5.41 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. | 187 |
| Figura 5.42 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio. | 188 |
| Figura 5.43 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. | 188 |
| Figura 5.44 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho. | 188 |
| Figura 5.45 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)..... | 189 |
| Figura 5.46 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. | 190 |
| Figura 5.47 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio. | 190 |
| Figura 5.48 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. | 190 |
| Figura 5.49 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho. | 191 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.50 – Seqüência das imagens internas para 9:20h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita) | 191 |
| Figura 5.51 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março. . | 192 |
| Figura 5.52 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março. | 193 |
| Figura 5.53 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril. | 193 |
| Figura 5.54 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril..... | 193 |
| Figura 5.55 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. ... | 194 |
| Figura 5.56 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio..... | 194 |
| Figura 5.57 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho..... | 194 |
| Figura 5.58 – Seqüência das imagens internas para 9:20h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita) | 195 |
| Figura 5.59 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março. . | 196 |
| Figura 5.60 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril. | 197 |
| Figura 5.61 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. ... | 197 |
| Figura 5.62 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. .. | 197 |
| Figura 5.63 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março. | 198 |
| Figura 5.64 - Iluminâncias normalizados para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril..... | 198 |
| Figura 5.65 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio..... | 198 |
| Figura 5.66 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março. . | 200 |
| Figura 5.67 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril. | 200 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.68 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. | 201 |
| Figura 5.69 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho. | 201 |
| Figura 5.70 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março. | 201 |
| Figura 5.71 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril. | 201 |
| Figura 5.72 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março. | 202 |
| Figura 5.73 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio. | 203 |
| Figura 5.74 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho. | 203 |
| Figura 5.75 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março. | 203 |
| Figura 5.76 – Médias Mensais para Céu Claro no mês de Março, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Chanel Panel. | 205 |
| Figura 5.77 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Channel Panel. | 206 |
| Figura 5.78 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Maio, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Channel Panel. | 207 |
| Figura 5.79 Médias Mensais para Céu Claro no mês de Junho, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Channel Panel, RetroLux, Retroflex e RetroLuxTherm. | 208 |
| Figura 5.80 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Julho, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, RetroLux, Retroflex e RetroLuxTherm. | 209 |
| Figura 5.81 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Março, para os painéis de vidro comum, LCP 0° 9°, 13° e Channel Panel. | 211 |
| Figura 5.82 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, LCP 0° 9°, 13° e Channel Panel. | 212 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.83 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Maio, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, RetroLux, Retroflex e RetroLuxTherm..... | 212 |
| Figura 5.84 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Junho, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9° e 13° | 213 |
| Figura 5.85 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Março, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM | 214 |
| Figura 5.86 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM | 215 |
| Figura 5.87 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Maio, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM | 216 |
| Figura 5.88 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de julho, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM | 216 |
| Figura 5.89 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Março, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM | 217 |
| Figura 5.90 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM | 217 |
| Figura 5.91 Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Maio, para os painéis, Combisol, Okasolar e TIM..... | 218 |
| Figura I.1 - Desenho esquemático da estrutura do olho humano..... | 238 |
| Figura I.2 - Absorção dos bastonetes e dos três tipos de cones como função do comprimento de onda. Fonte: BOWMAKER e DARTNALL, 1980..... | 241 |
| Figura I.3 - Visão Fotóptica e Escotóptica - Comportamento do coeficiente de visibilidade em função do comprimento de onda da radiação monocromática. Fonte: LO GIUDICE, 1999 | 243 |
| Figura I.4 - Desenho esquemático onde a Intensidade luminosa é dada pelo fluxo luminoso (Θ) em função do ângulo em esferoradiano ω obtido dividindo-se a área projetada pelo raio ao quadrado. Fonte: modificado de www.squ1.com | 245 |

| | |
|---|-----|
| Figura I.5 - Fluxo luminoso incidente sobre uma superfície unitária. Fonte: www.squ1.com | 247 |
| Figura I.6 - Iluminância no plano a) horizontal e b) vertical. Fonte: GIUDICE e SANTOLI, 1999b..... | 248 |
| Figura I.7 - (a) A área A2 é vista em sua totalidade pelo observador, isto porque a normal do plano, coincide com o ângulo de visão do observador. (b) Na medida em que o plano é inclinado forma-se um ângulo entre a normal do plano e o ângulo de visão do observador (α), desta forma a área $A_2=A_1\cos \alpha$. Fonte: LO GIUDICE, 1999..... | 249 |
| Figura I.8 - Luminância e as variáveis esféricas relevantes. Fonte: ANDERSEN, 2004 | 251 |
| Figura I.9 - Níveis aceitáveis de luminâncias para cada ângulo de visão: (a) 2500cd/m ² (b) 1800cd/m ² (c) 1250cd/m ² (d) 850cd/m ² (e) 580cd/m ² . Fonte: ROBBINS, 1986 | 254 |
| Figura I.10 - Ofuscamento em superfícies horizontais..... | 255 |
| Figura I.11 - Magnitude da sensação, modelo de Steven. Fonte: STEVENS, 1946 | 257 |
| Figura II.1 - Desenho esquemático do circuito eletrônico. | 260 |
| Figura II.2 - Escolha do Canal, como o conversor analógico digital escolhe o canal que será lido e faz a conversão dos dados que entraram. Fonte: datasheet da Maxim. | 261 |
| Figura II.3 - Operador amplificacional quádruplo (LM324N). Fonte: Datasheet LM324N http://www.datasheetarchive.com/search.php?search=lm324n&sType=part | 262 |
| Figura II.4 - Multiplexador CD4051B. Fonte: Datasheet Texas Instruments..... | 263 |
| Figura II.5 - Divisor de Tensão..... | 264 |
| Figura II.6 - Valores médios da iluminância obtida no interior do modelo. As medições foram realizadas nos meses de Novembro a Fevereiro. A curva azul mostra a média dos valores medidos com o luxímetro. A curva rosa mostra a correção em função do co-seno. | 266 |

Figura II.7 - Circuito Eletrônico, renderização com utilização do software UTIBOARD266

Figura II.8 - Posicionamento dos componentes eletrônicos, vista superior..... 267

Figura II.9 - Posicionamento dos componentes eletrônicos, vista inferior..... 267

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 3.1 - Comprimentos de onda para a sensação de Cor. Fonte: HECHT, 1998 ... | 11 |
| Tabela 3.2 - Relação entre índice de reflexão e o índice de percepção do olho humano. Fonte: BIANCHI, 1991 | 13 |
| Tabela 3.3 - Tabela índices para classificação dos tipos de céu. Fonte: CIE 2004 - ISO 15469:2004..... | 48 |
| Tabela 4.1 - Altura solar e azimute para Campinas, os valores mostrados se referem ao período no qual foram realizadas as medições dos DIN nos protótipos montados na Unicamp..... | 153 |
| Tabela I.1 - Quadro resumo das grandezas fotométricas..... | 252 |
| Tabela I.2 - Valores para fator de posição P. Fonte: HOPKINSON, LONGMORE e PETHERBRIDGE, 1966 | 256 |
| Tabela I.3 - Índices máximos (GI) permitidos de acordo com o uso de cada ambiente. Fonte: BAKER , FANCHIOTTI e STEEMERS, 1993 | 256 |
| Tabela II.1 - Controle dos bits pelo MAX186, funcionamento das linhas CS, CLK, DIN e DOUT com os bits correspondentes. Esta tabela mostra o significado do byte de | |

| | |
|---|-----|
| controle aplicado ao MAX186 para configurar o funcionamento. Fonte: datasheet da Maxim..... | 261 |
| Tabela II.2 - Seleção dos canais de entrada, combinação de bits que seleciona os canais de entrada que serão lidos pelo conversor analógico digital mostrando como se empregam os bits SEL2 SEL1 e SEL0, para selecionar os canais de entrada e os modo de saída simples. Fonte: datasheet da Maxim. | 261 |
| Tabela II.3 - Transmissão de dados entre o operador amplificacional LM324N e o conversor analógico digital MAX186, de acordo com a montagem do circuito realizado..... | 262 |
| Tabela II.4 - Seleção dos canais de entrada pelo multiplexador CD4051B, combinação de bits que seleciona os canais de entrada que serão lidos pelo CD4051B. Fonte: Datasheet Texas Instruments | 263 |
| Tabela II.5 - Valores das resistências de ganho (RG) do circuito..... | 265 |

Lista de Símbolos

| | | |
|-----------|---|--|
| λ | - | comprimento de onda |
| k | - | fator de visibilidade |
| P | - | potência radiante |
| V | - | coeficiente espectral de visibilidade |
| Φ | - | fluxo luminoso |
| I | - | intensidade luminosa |
| ω | - | ângulo sólido elementar |
| I_0 | - | intensidade media esférica |
| E | - | iluminância |
| α | - | ângulo de rotação do plano 1 para o plano 2 |
| L | - | luminância |
| c | - | velocidade da luz no vácuo (vazio) |
| v | - | velocidade da luz num determinado meio |
| n | - | índice de refração |
| f | - | freqüência |
| \bar{x} | - | sensibilidade do olho ao vermelho em função do comprimento de onda |
| \bar{y} | - | sensibilidade do olho ao verde em função do comprimento de onda |

- \bar{z} - sensibilidade do olho ao azul em função do comprimento de onda
- ϕ_c - ângulo crítico
- a, b - parâmetros de gradação da luminância
- α_o - azimute de um elemento no céu (sentido horário, em radianos)
- α_s - azimute do sol (sentido horário, em radianos)
- c, d, e - parâmetros indicativos de espalhamento
- χ - menor distância angular entre um elemento do céu e o sol (em radianos)
- $f(\chi)$ - função indicativa do espalhamento
- $\varphi(Z)$ - função da gradação do espalhamento
- γ - ângulo de elevação de um elemento do céu acima do horizonte (radianos)
- L_a - Luminância de um elemento do céu (cd/m^2)
- L_z - Luminância no zênite (cd/m^2)
- Z - distância angular entre um elemento do céu e o zênite (radianos)
- Z_s - distância angular o sol e o zênite

Resumo

A importância desta pesquisa reside na avaliação quantitativa de diferentes dispositivos de iluminação natural, disponíveis no mercado internacional, mediante a aquisição das iluminâncias obtidas através de ensaios em protótipos. Este trabalho foi realizado com objetivo de verificar se a aplicação destes sistemas, restritos a sistemas de iluminação lateral, no território nacional trariam de fato alguma vantagem para as edificações, no sentido de otimizar a iluminação natural obtida em ambientes profundos, em território brasileiro. As medições foram realizadas sob condição de céu real na cidade de Campinas, SP.

A dissertação é composta por três etapas. A primeira, traz uma revisão dos princípios básicos necessários para o estudo das tecnologias utilizadas. Em seguida são apresentados alguns dispositivos de iluminação natural no cenário internacional, identificando suas características e os princípios físicos que determinam seu funcionamento. Na segunda etapa, mediante utilização de planilhas eletrônicas, determinou-se, para cada painel, a posição e o desenho mais adequados à latitude de Campinas para fachada norte. De acordo com estas especificações foram solicitados, no exterior, os painéis aos fabricantes.

Na terceira fase, com um sistema de medição de iluminâncias, criado especialmente para esta tarefa, foram registradas as iluminâncias obtidas no interior de quatro protótipos, construídos na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) utilizando-se os 12 diferentes painéis doados por universidades e empresas estrangeiras.

Os painéis de iluminação natural foram acoplados à abertura dos protótipos, localizada na fachada norte. As iluminâncias obtidas com cada painel foram registradas de 8:00 as 18:00, de março a julho. Para que todos os painéis fossem medidos com condições de sol semelhantes foi realizado um rodízio de forma que a cada quatro dias todos os painéis foram acoplados aos protótipos e suas iluminâncias medidas ao longo do dia.

Os dados são tratados de forma a obter valores médios mensais das iluminâncias, em função da profundidade do ambiente, onde foram realizadas as medições para dias claros, encobertos e parcialmente encobertos. A partir da comparação dos dados obtidos experimentalmente procurou-se estabelecer quais dos dispositivos estudados, iluminam o ambiente de forma otimizada em relação a um vidro comum de 3mm, criando uma iluminação mais homogênea ou conseguindo iluminâncias maiores no fundo do ambiente.

O estudo mostrou que todos os dispositivos poderiam facilmente ser adaptados ao clima luminoso de Campinas, para fachada norte, no entanto cada um destes dispositivos tem as suas limitações e vantagens.

Por fim uma solução ótima para alcançar um aproveitamento otimizado da luz natural dentro dos espaços, de acordo com os dispositivos estudados é sugerido na conclusão do trabalho.

Palavras Chave: Iluminação Natural, medição de iluminância

Abstract

The importance of this research relies on the quantitative evaluation of different daylighting devices, available in the international market, by means of acquiring the illuminance through models. This work was accomplished with objective of verifying the application of these systems, restricted to lateral illumination in national territory, if they would bring in fact some advantage for buildings, in the sense of optimizing the daylighting obtained in deep rooms, in Brazilian territory. The measurement has been made under real sky condition in the city of Campinas, SP.

This thesis is composed of three stages. The first, brings a revision of the basic principles necessary for the study of the technologies used. Soon afterwards these daylighting devices in the international scene are presented, identifying their characteristics and the physical principles that determine its operation. In the second stage, by use of electronic spreadsheets, it was determined for each panel, the position and the most appropriate drawing for the latitude of Campinas for a North façade. In agreement with these specifications the panels were requested abroad from their manufacturers.

In the third phase, with an illuminance measurement system, especially created for this task, the illuminance inside four prototypes were acquired, built in the State

University of Campinas (UNICAMP), using the 12 different panels donated by universities and foreign companies.

The daylighting panels were coupled to the opening of the prototypes, located in the north façade. The illuminance obtained with each of these panels was registered from 8:00 to 18:00, from March to July. So that all of the panels were measured with the similar sun conditions so that every four days all of the panels were coupled to the prototypes and their illuminance measured during the day.

The data are treated to get monthly average values of the illuminances, as a function of the depth of the environment, where the measurements were accomplished for clear, partially cloudy and cloudy days. From the comparison of these data we establish which of the studied devices can achieve a better performance if compared with a standard clear glass panel, and which can obtain a homogeneous illumination or greater illuminances along the deep of the room.

The study showed that all the devices could easily be adapted to the luminous climate of Campinas, for the north façade, however each one of these devices has their limitations and advantages.

Finally a new solution is suggested to reach an optimized exploitation of daylight in interior spaces, in agreement with the results obtained in the conclusion of this work.

Keyword: daylight, measurement of illuminance

Capítulo 1

Introdução

No mundo contemporâneo as atividades humanas representam um importante elemento nos múltiplos fatores que são responsáveis pelas mudanças climáticas. A demanda energética tende a um crescimento vertiginoso para atender as necessidades da humanidade, hoje estimada em seis bilhões e meio de pessoas. No entanto, o uso da energia, quer originada através de combustíveis fósseis ou nucleares, ou através da exploração em grande escala da hidroeletricidade, tende a provocar sérios danos ambientais e conseqüências de grande porte, como efeito estufa e a desertificação (BÖHM, 2003). Como conseqüência desta grande demanda vivenciamos um aquecimento global de diversos graus ao final do XXI século, de grande relevância se comparado com as mudanças climáticas ocorridas na ausência da interferência humana, durante milênios. Catástrofes como a de Dakha em 2005 e Nova Deli em 2005, tem mostrado o desequilíbrio do meio ambiente.

Esta situação tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias para obtenção de edifícios sustentáveis que procuram obter um impacto mínimo no ambiente, visando garantir a disponibilidade de recursos, a longo prazo.

O uso da luz natural como fonte primária de luz, no decorrer do dia, é parte integrante dos edifícios sustentáveis porque a substituição da luz artificial pela natural, no período diurno, resulta em menor consumo anual de energia elétrica, economizando recursos e investimentos. Além disto, devido à própria natureza da luz natural, composição espectral e variabilidade ao longo do dia, é possível criar um interior visualmente estimulante e saudável e que portanto favorece a produtividade de seus usuários. Por fim mediante utilização de dispositivos avançados de Iluminação natural é possível reduzir os horários de pico do uso da energia, reduzindo os custos.

No Brasil, já em 1985 surgiu, por parte do Poder Executivo Federal brasileiro, a preocupação com a conservação de eletricidade no país, sendo instituído, então o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, hoje Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica – PROCEL. No entanto, apenas a partir de 1998, diante de uma crise eminente, com a instalação da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, responsável pela geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica) é criada uma Resolução que obriga as concessionárias a investirem um mínimo de 1% de suas receitas operacionais líquidas em programas de eficiência energética e de pesquisa e desenvolvimento.

Em seguida, no ano 2000, impulsionados pela desaceleração das atividades econômicas por conta da crise energética, uma lei (Lei 9991 de 24 julho 2000) aprovada no Congresso Nacional redefiniu a alocação desses recursos e criou um fundo Setorial de Energia (CT-ENERG) destinado a financiar ações de pesquisa e desenvolvimento e eficiência energética, através Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE. No seu primeiro ano de existência o CT-ENERG investiu cerca de R\$ 52 milhões em projetos de P&D, a maior parte dos recursos apoiou projetos nas áreas de energias renováveis, vistas como solução para atendimento desse

crescimento da demanda energética. Para o ano 2005, a verba prevista é de R\$ 80 milhões a serem investidos em pesquisa básica e aplicada.

Os próprios programas do PROCEL mostram que existem muitas formas pelas quais a conservação de energia pode ser otimizada. Uma delas é a utilização da energia solar como fonte de iluminação durante o dia; é uma inovação tecnológica com grande potencial de uso, mas pouco empregada até hoje.

A luz solar apresenta grandes vantagens em relação a luz artificial. Além de ser gratuita, limpa, e disponível em quantidades fantásticas, com duração de alguns bilhões de anos, possui vantagens de caráter ergonômico, luminotécnico, energético e econômico. Produz alta iluminância, permite uma excelente distinção e percepção de cores, estas propriedades indicam que a luz solar fornece boas condições de visão. Além disto, devido a própria evolução, o olho humano percebe como naturais os objetos iluminados pela luz solar. Estudos mostram que trabalhar num ambiente iluminado somente por luz artificial é prejudicial à saúde e resulta em maior stress e desconforto (IEA, 2000).

Para que a luz natural possa atingir de fato o objetivo e tornar uma edificação sustentável é necessária uma estratégia de integração que envolve a localização e a orientação da edificação, o desenho das aberturas, a integração com o sistema de luz artificial e térmico além da manutenção do conjunto. Um projeto que não avalie todos os fatores pode criar vários inconvenientes, tais como o ofuscamento, devido á reflexões intensas nas superfícies dentro do ambiente, desconforto devido a diferenças acentuadas de iluminação dentro dos espaços, além de ganhos excessivos de calor e conseqüente carga excessiva de ar condicionado.

Um dos exemplos típicos de má utilização da luz natural pode ser verificada, a partir do século XX, naqueles edifícios que incorporaram o conceito das “curtain walls”; que procura neutralizar a massa do edifício através dos panos de vidro nas fachadas. No Brasil, os inconvenientes decorrentes desta postura vão desde o excesso de luz até complicações térmicas e energéticas. Nos últimos anos devido às constatações da má qualidade luminosa e térmica destes edifícios amplamente envidraçados,

intensificaram-se os estudos das características quantitativas e qualitativas (espectroscópicas) dos materiais utilizados na construção civil (ROY et al, 1995).

Assim, como resposta à necessidade de edificações auto-sustentáveis, que agredam menos o meio ambiente, buscando uma economia de energia, garantindo a substituição da iluminação artificial pela natural durante o período diurno, atendendo simultaneamente ao desejo de se erguer edifícios com invólucros transparentes, tem surgido, no exterior uma classe nova de produtos inovadores que potencializam o uso da luz solar nas edificações (PEREZ, 1993). É importante notar que no mercado internacional a demanda por este tipo de produto nas edificações é grande, a mais de 10 anos.

Vários destes materiais, alguns realmente novos, denominados de dispositivos de iluminação natural (DIN), trabalham redirecionando a luz incidente, evitando o ofuscamento, mantendo a transparência do invólucro e permitindo que a luz natural seja explorada na edificação de maneira criativa. Manipulam a luz do sol através dos mecanismos de reflexão interna total, transmissão, refração e difração, utilizando-se da diferença da geometria das placas e da diferença entre os índices de refração dos materiais para o redirecionamento dos feixes solares. Estes sistemas são apropriados quando uma sala é muito profunda para ser iluminada de maneira adequada por aberturas convencionais, que não conseguem fornecer uma luz uniforme ou apropriada para o desenvolvimento das tarefas.

Em função disto, este estudo se propõe, para que sejam realizadas medições da iluminância obtida com o uso de alguns destes dispositivos (DIN), pré-selecionados, sob condições de céu real, no território nacional. O objetivo da pesquisa é verificar se estes sistemas seriam capazes de redirecionar a luz solar de forma a criar um ambiente bem iluminado, livre de ofuscamento ou interferências, para as latitudes brasileiras.

1.1 Estrutura da Dissertação

Com a finalidade de determinar o objetivo exposto acima, este trabalho foi subdividido em seis capítulos, a bibliografia, e dois anexos, cujo conteúdo será brevemente descrito a seguir.

O primeiro capítulo, **Introdução**, aborda em linhas gerais o problema a ser tratado ao longo desta pesquisa, a motivação e justificativa deste trabalho. O segundo capítulo, **Objetivos**, traz os objetivos gerais específicos do estudo.

No terceiro capítulo, **Revisão Bibliográfica**, apresenta-se uma revisão da literatura e um levantamento dos dispositivos de Iluminação natural desenvolvidos no exterior. Neste capítulo são apresentados os princípios físicos que explicam como cada dispositivo interage com a luz, e suas especificidades; são apresentados os modelos existentes para caracterizar a disponibilidade de luz natural e por fim a estratégia de análise dos dados obtidos.

O quarto capítulo, **Metodologia**, trata da metodologia empregada para avaliar os diferentes DIN. A primeira etapa traz a simulação do comportamento dos painéis, mediante o uso de planilhas eletrônicas. Com este procedimento é possível estimar o comportamento dos dispositivos e de acordo com estes dados são determinados o posicionamento e o formato dos DIN para garantir a adequação à latitude local. A segunda etapa apresenta o método experimental, onde está descrito o experimento realizado, e consta a instrumentação, a calibração e o procedimento das medições para caracterização das iluminâncias horizontais em ambientes internos, com o uso dos DIN.

No quinto capítulo, **Resultados**, são graficados os resultados obtidos através das medições, realizadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa. O comportamento estimado, no quarto capítulo, será comparado ao comportamento medido.

No sexto capítulo, **Conclusões**, são resumidos os principais resultados e são feitas as considerações finais, comentadas as limitações e sugeridos trabalhos futuros as serem desenvolvidos.

A **Bibliografia**, traz as referências utilizadas neste trabalho, o **Anexo I** traz os conceitos básicos de luminotécnica, o **Anexo II** traz a montagem do sistema de medição e o programa de aquisição de dados, em linguagem C, utilizados para a realização das medições.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho objetiva determinar, mediante o uso de alguns dispositivos de iluminação natural considerados tecnologicamente avançados, presentes no cenário internacional, qual possui a maior capacidade de redirecionar a luz natural para o interior dos ambientes, para a latitude de Campinas, S.P., em condições de céu claro, nublado e parcialmente nublado.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantamento dos dispositivos de iluminação natural presentes no exterior que se apresentam como soluções tecnológicas inovadoras, capazes de redirecionar a luz para o interior, sem no entanto prejudicar a transparência do invólucro do edifício.
- Cálculo da posição e geometria dos dispositivos, com objetivo de otimizar a eficiência do sistema para uma fachada Norte, na latitude de Campinas, mediante utilização de planilhas eletrônicas.
- Desenvolvimento de um sistema de medição simplificado e de um programa de aquisição de dados.
- Medição das iluminâncias em protótipos com diferentes dispositivos, para fachada norte em condições climáticas reais.
- Avaliação comparativa dos dispositivos, quanto ao desempenho luminoso, mediante análise dos dados de iluminância obtidos pelo sistema de medição, desenvolvido especialmente para esta pesquisa.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Normalmente boas condições de visibilidade são determinadas por adequadas quantidades de luz sobre uma tarefa, distribuição e equilíbrio de luminâncias e iluminâncias, direcionamento da luz, contraste adequado, ausência de ofuscamento e um espectro de cores que proporcione a olho humano uma boa renderização das imagens.

Para realizar uma avaliação objetiva dos DIN (Dispositivos de Iluminação Natural) é necessário conhecer as grandezas relacionadas à iluminação natural, os parâmetros que se refletem no desempenho luminoso de cada dispositivo, e os processos que envolvem a interação da luz com a matéria. Em função disto serão discutidos alguns conceitos de fotometria, que se ocupa da quantidade de energia radiante emitida por uma fonte, ou recebida por uma superfície, em relação às sensações produzidas no indivíduo através do olho.

A fotometria moderna, elaborada no século XVIII começou com os estudos de Bouguer em 1729 e Lambert em 1760. Já nestas pesquisas percebeu-se que o olho tem a propriedade de ser influenciado não pela quantidade de energia radiante que incide sobre ele e sim pela relação desta com o tempo, ou seja da potência dos feixes das radiações incidentes. Os estudos, então, evoluíram para a medição das sensações produzidas, por conjuntos de radiações diversas, não somente como potência, mas também como comprimento de onda (MONCADA, LO GIUDICE E VOLLARO 1999b).

3.1 O Espectro Luminoso

A luz solar faz parte do espectro eletromagnético que compreende os mais diversos tipos de ondas desde os raios cósmicos, os raios gama, os ultra-violetas, os infravermelhos e as ondas de radio e televisão, dentre outros. Cada um, destes tipos de onda, compreende um intervalo definido por uma magnitude característica, que pode ser o comprimento de onda (λ) ou a frequência (f). A relação entre ambas é:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo ($c=3 \times 10^8$ m/s). No entanto, a luz que chega aos nossos olhos e nos permite ver, é um pequeno conjunto de radiações eletromagnéticas, de comprimento de onda compreendido entre 380nm e 780nm. Para cada comprimento de onda, na faixa do visível, corresponde uma determinada sensação de cor. Enfileirando todas as radiações monocromáticas (visíveis) com seus comprimentos e as respectivas cores percebidas, é possível construir o espectro das cores, (Figura 3.1). Portanto cada cor no espectro (sensação decifrada pelo olho) é correspondente a uma radiação monocromática (estímulo).

Desta forma uma onda monocromática de 700nm será interpretada pelo olho como sendo vermelho enquanto uma onda de 550nm será verde. Na Tabela 3.1 é possível identificar os comprimentos de onda para a faixa do espectro visível ao olho humano.

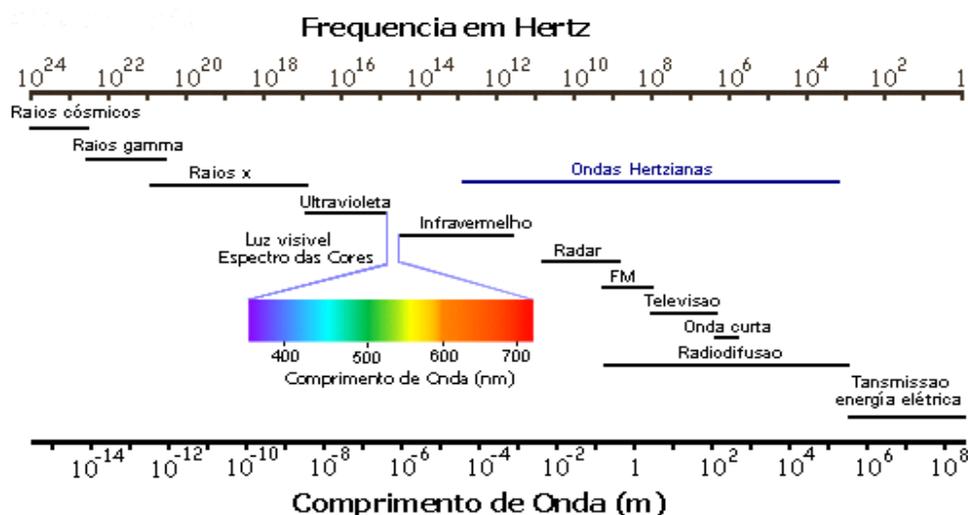


Figura 3.1 - Espectro das cores, cada comprimento de onda monocromático é percebido pelo olho como uma cor. Fonte: OVERHEIM, 1982

Tabela 3.1 - Comprimentos de onda para a sensação de Cor. Fonte: HECHT, 1998

| Comprimento de onda | Cor | Comprimento de onda | Cor |
|---------------------|----------|---------------------|---------|
| 622 – 780 nm | Vermelho | 492 – 577 nm | Verde |
| 597 – 622 nm | Laranja | 455 – 492 nm | Azul |
| 577 – 597 nm | Amarelo | 390 – 455 nm | Violeta |

3.1.1 A Radiação Solar

O espectro das cores, no entanto não compreende várias cores, como por exemplo o branco, ou o marrom. Newton foi o primeiro a reconhecer que a luz branca é uma mistura de todas as cores do espectro visível e que não podia ser obtida pela

decomposição espectral realizada com o experimento do prisma. Isto porque as cores representadas pelo espectro são relativas a percepção de uma única onda monocromática de um determinado comprimento. No entanto, na natureza não existem radiações monocromáticas, portanto a luz natural vista, é sempre uma mistura de radiações em diferentes concentrações, que chegam ao olho. Cada cor é, portanto, a resposta perceptiva do olho ao estímulo.

Este estímulo é equivalente a uma mistura das cores puras (várias ondas monocromáticas sobrepostas) e a curva espectral desta cor é resultante da soma das curvas monocromáticas que a compõe. A luz do sol, por exemplo, é uma mistura de radiações monocromáticas de diversos comprimentos que resulta numa cor, interpretada pelo olho, como branca. É importante considerar que o olho atinge sua maior capacidade de renderização da cor, quando os objetos são iluminados pela luz solar e que o olho interpreta como “normal” exatamente as cores percebidas sob esta luz (HECHT, 1998).

3.2 Interação da Luz com Matéria

Para obter um controle da luz natural no interior das edificações mediante o uso de dispositivos, acoplados as aberturas, é necessário conhecer os diferentes mecanismos pelos quais a luz interage com a matéria. Os mecanismos aqui avaliados serão a reflexão, refração, a reflexão interna total e a difração. Com estes mecanismos os dispositivos são capazes de manipular a luz solar de acordo com os níveis de iluminação que deseja-se atingir nos ambientes.

Uma superfície que receba luz pode absorver, refletir e transmitir quantidades de luz de acordo com suas propriedades físicas. A soma das três componentes, refletida (ρ) absorvida (α) e transmitida (τ) será sempre 1, ou seja 100% da luz incidente

(Figura 3.2). O coeficiente de reflexão (ρ) é o que influencia no brilho de uma superfície, na Tabela 3.2 alguns coeficientes e sua relação com a sensação que causam ao olho humano.

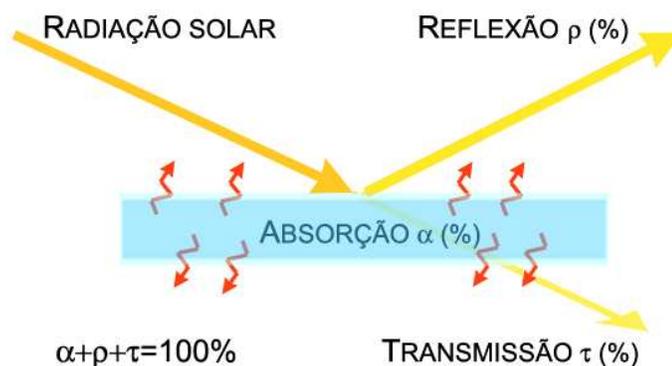


Figura 3.2 - Interação da luz com a matéria. A soma das três componentes, refletida (ρ) absorvida (α) e transmitida (τ) representa 100% da luz incidente. Fonte: modificado de CHAVES, 2001

Tabela 3.2 - Relação entre índice de reflexão e o índice de percepção do olho humano. Fonte: BIANCHI, 1991

| Material | Índice de reflexão (ρ) | Percepção |
|---------------------------|-------------------------------|--------------|
| Alumínio anodizado | 0.90 – 0.95 | Muito Brilho |
| Pintura branca | 0.75 – 0.85 | |
| Reboco branco novo | 0.70 – 0.80 | |
| Alumínio escovado | 0.60 – 0.75 | Com Brilho |
| Reboco branco desgastado | 0.50 – 0.55 | |
| Painéis acústicos brancos | 0.50 – 0.60 | |
| Pinho | 0.40 – 0.50 | Médio |
| Madeiras acinzentadas | 0.40 – 0.55 | |
| Concreto novo | 0.30 – 0.45 | |
| Mogno e noqueira | 0.15 – 0.40 | Escuro |
| Tapete cinza | 0.15 – 0.25 | |
| Piso de carvalho gasto | 0.15 – 0.25 | |
| Tijolo vermelho | 0.10 – 0.30 | Muito Escuro |
| Concreto gasto | 0.10 – 0.20 | |
| Tapete cinza escuro | 0.05 – 0.10 | |

3.2.1 Difração

Na difração, experimento com padrões de interferência, a luz é entendida como onda e é explicada pelo Princípio de Huygens: quando os pontos de uma abertura ou de um obstáculo são atingidos pela frente de onda eles tornam-se fontes de ondas secundárias que mudam a direção de propagação da onda principal, contornando o obstáculo. Para entender o comportamento da luz, Young elaborou um experimento realizado com um feixe de luz monocromático, passando por um orifício e incidindo sobre um anteparo (SOBEL,1987). Na Figura 3.3 as ondas incidentes atravessam os orifícios. No caso de um orifício cujo tamanho é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda que o atravessa (c na Figura 3.4), ele funcionará como uma fonte de ondas circulares, como as ondas provocadas na superfície de um lago ao ser atingido por uma pedra. Este fenômeno que ocorre é denominado difração. Desta forma o feixe incidente ao passar pelas beiradas do orifício apresentará alargamento angular e linhas satélites à direita e à esquerda. Origina-se então uma superposição de frentes de onda devido à existência de duas quinas. A sobreposição das ondas denomina-se interferência, que pode ser construtiva ou destrutiva.

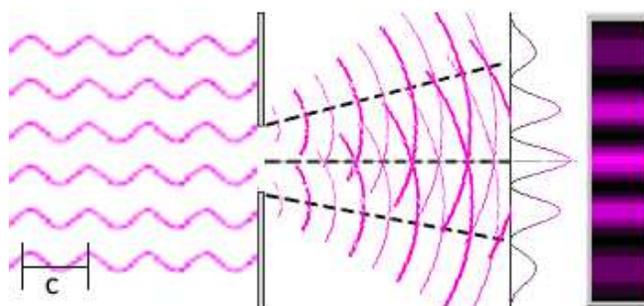


Figura 3.3 - Difração, experimento com interferência de ondas. Fonte: Adaptado de SOBEL, 1987

É possível entender claramente o resultados das interferências ao observar o anteparo. Para um feixe de luz monocromático (comprimento de onda 400nm) o resultado da interferência destrutiva é a ausência de luz, representada pelos pontos escuros da figura difração. Já a interferência construtiva cria pontos mais claros e com

maior intensidade como pode ser visto nos pontos mais claros do painel. Estes intervalos que com um feixe monocromático aparecem escuros estariam preenchidos por outros comprimentos de onda se o feixe incidente fosse composto por mais de um comprimento de onda. Aparecendo portanto um arco íris se a luz incidente fosse branca. Normalmente é difícil percebermos a difração de ondas luminosas, a olho nu, porque os obstáculos e aberturas em que a luz incide são normalmente bastante grandes em relação ao seu comprimento de onda. No entanto existem dispositivos de iluminação natural (principalmente películas) que trabalham com este princípio, e são aqueles que envolvem holografia.

3.2.2 Óptica Geométrica

A óptica geométrica é o conjunto de fenômenos ópticos nas situações em que os efeitos de difração são desprezíveis. Nestas condições os feixes são considerados paralelos e sua trajetória é uma linha reta, sendo que os feixes refletidos ou refratados pelas superfícies, também o serão, no caso de feixes monocromáticos. Quando a luz incide sobre um material, uma porção é refletida, de forma que o feixe incidente no material seja devolvido ao meio. Uma outra fração é absorvida pelo próprio material e em caso de superfícies transparentes ou translúcidas uma porção pode ser refratada. A forma como a radiação será refletida pode ser especular, cã o ângulo de incidência seja igual ao de reflexão, espalhada, difusa ou combinada (Figura 3.4) CHAVES, 2001.

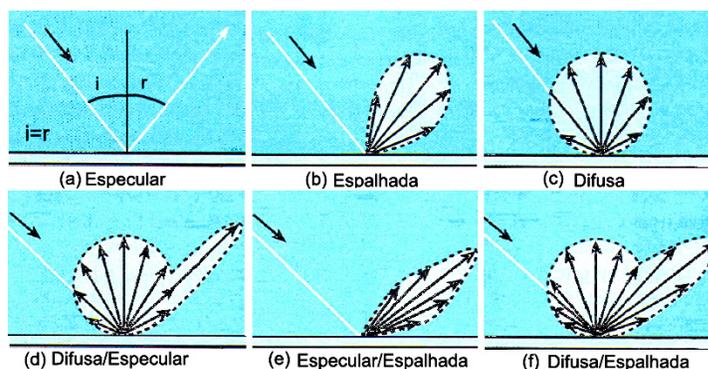


Figura 3.4 - Diferentes reflexões em função das propriedades do material. Fonte: CHAVES, 2001

3.2.2.1 Reflexão

A reflexão também ocorre em superfícies opacas (não transparentes), de forma difusa. Diferentemente da reflexão especular (Figura 3.6), que mantém a luz que é refletida de maneira focalizada, com uma angulação igual à dos feixes incidentes, na reflexão difusa, em função da rugosidade do material, abre-se um cone maior de luz, difundindo portanto os feixes (BAKER, 1993). Caso a superfície seja de tipo lambertiana, a difusão ocorre de maneira uniforme em todas as direções. Já em caso de superfícies rugosas a radiação de espalha de maneira não uniforme.

A Figura 3.6a, mostra um feixe de luz incidindo sobre a interface plana entre dois meios 1 e 2 (por exemplo ar e vidro), ambos transparentes. O feixe incidente faz um ângulo θ_1 com a normal a interface, enquanto os feixes refletido e refratado fazem ângulos θ_1' e θ_2 respectivamente, com aquela normal. Esses ângulos satisfazem as Leis de Fresnel Snell (CHAVES, 2001) :

- para reflexão especular - $\theta_1 = \theta_1'$ ou seja o ângulo de incidência será igual ao ângulo de reflexão (Figura 3.6 a)
- para refração - $n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$ Para que ocorra a refração os dois meios precisam ser necessariamente, transparentes ou translúcidos

Para reflexão é importante notar a relação existente entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão. Na figura R estão marcados os ângulos complementares ao de incidência (α) e ao de reflexão (β). Esta representação facilita o entendimento do mecanismo de redirecionamento dos raios solares por reflexão, uma vez que pode ser entendido o ângulo α como a altura angular do sol e o ângulo β , o ângulo com o qual os raios entram em profundidade num ambiente. Assim caso os feixes incidam num plano ($\gamma=0$) os feixes serão direcionados com um mesmo ângulo para o interior do ambiente. Ao rotacionar o plano de incidência (por exemplo um brise ou uma prateleira de luz) o ângulo de redirecionamento (β) será equivalente a altitude solar menos duas vezes a inclinação do plano, de acordo com a fórmula:

$$\beta = \alpha - 2\gamma \quad (3.2)$$

Onde α é o complementar do ângulo de incidência, β é o complementar do ângulo de reflexão e γ é o ângulo de rotação do plano. Note-se que caso o resultado de γ seja negativo isto quer dizer que deve girar a placa em sentido anti-horário. Assim se por exemplo com uma altitude solar de $\alpha=60^\circ$ deseja-se redirecionar a luz para um ângulo interno, $\beta=30^\circ$ será necessário inclinar o plano $+15^\circ$.

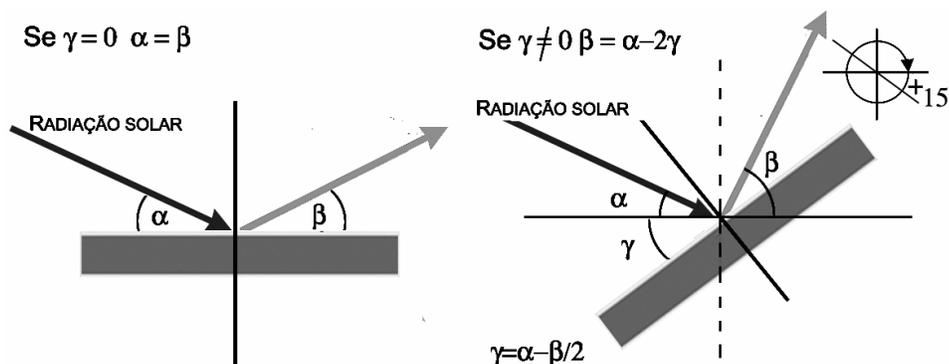


Figura 3.5 - Para planos horizontais o complementar do ângulo de incidência (α) será igual ao complementar do ângulo de reflexão (β). Ao inclinar o plano de um ângulo (γ) Fonte: CHAVES, 2001

3.2.2.2 Refração

Os dois fatores n_1 e n_2 , de acordo com as Leis de Fresnel, são os índices de refração dos meios 1 e 2 respectivamente, sendo que este índice é dado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e sua velocidade no meio referido de acordo com a equação (3.3)

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.3)$$

Note-se que se um feixe de luz passa de um meio menos denso (por exemplo o ar) que tem portanto um índice de refração menor ($n_1 < n_2$) para um meio mais denso (por exemplo o vidro) então o feixe aproxima-se da normal (Figura 3.6b). No caso contrário, onde o feixe passa de um meio mais denso para um meio menos denso ($n_1 > n_2$) (por exemplo de uma placa de acrílico para o ar) então o feixe afasta-se da referida normal.

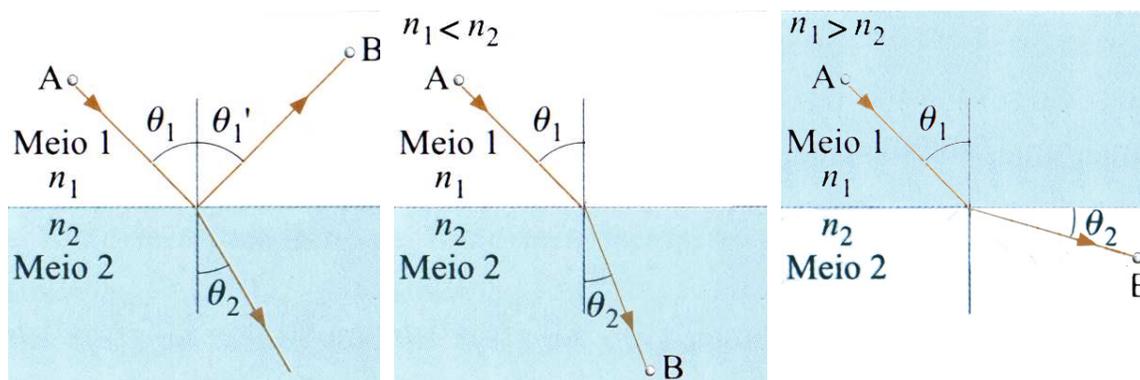


Figura 3.6 – (a) Reflexão e refração. (b) diferença de índice de refração ($n_1 < n_2$). c) diferença de índice de refração ($n_1 > n_2$). Fonte: CHAVES, 2001

Para um vidro simples um feixe passa de um meio menos refringente para um meio mais refringente e portanto aproxima-se da normal. Em seguida, ao passar de um meio mais refringente para um menos refringente o raio afasta-se da normal. Ao final das refrações o raio sairá com um diferença angular D , (Figura 3.7).

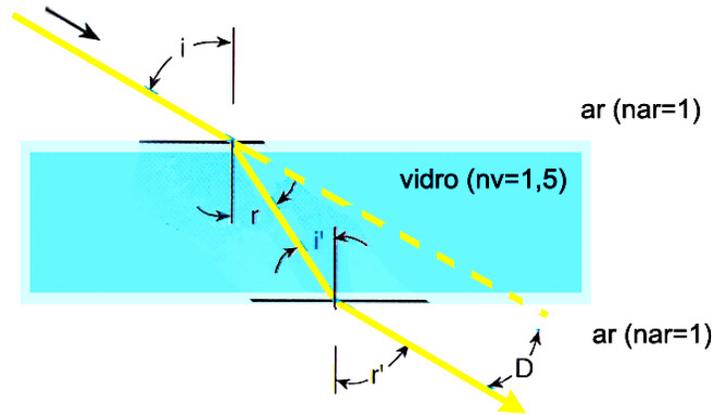


Figura 3.7 - Diferença Angular na refração(CHAVES, 2001).

3.2.2.3 Reflexão Interna Total

Na reflexão interna total a luz incidente, provém de um meio mais denso (com maior índice de refração) e ao incidir na interface do meio menos denso, ao invés de ser refratado para o outro meio é refletido de volta para o meio de origem. A Figura 3.8 mostra raios provenientes de uma fonte puntiforme S, (num meio 1, mais denso $n_1 > n_2$, por exemplo o vidro), incidindo sobre a interface vidro-ar (onde o ar é o meio 2). É possível perceber que os raios têm, progressivamente, maiores ângulos de incidência na interface e sofrem reflexão e refração. À medida que o ângulo de incidência aumenta, o ângulo de refração também aumenta. Para o raio “e”, o ângulo de refração atinge os 90° , e portanto o raio refratado é tangente à interface. Nessa situação, o ângulo de incidência é chamado de ângulo crítico ϕ_c . Para ângulos de incidência maiores do que ϕ_c , como os dos raios “f” e “g”, não há raio refratado, e toda a luz incidente é refletida, efeito conhecido como reflexão interna total. Note-se que a reflexão interna total não pode ocorrer quando a luz incidente está num meio que tem o menor índice de refração (CHAVES, 2001).

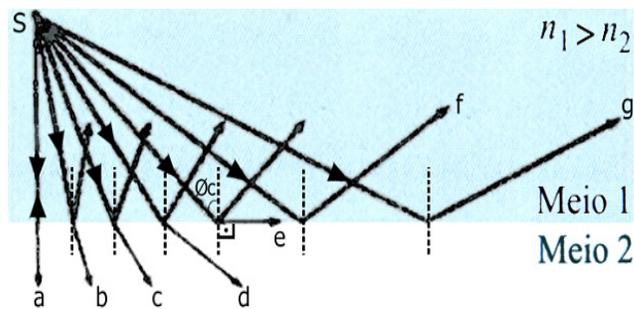


Figura 3.8 – Reflexão Interna Total.
 Fonte: CHAVES, 2001.

Caso seja desejado obter um material que reflita os raios por reflexão interna total de vê ser calculado o ângulo crítico ϕ_c de acordo com a lei de Fresnel ($n_1 \text{sen} \phi_c = n_2 \text{sen} 90^\circ$) encontrando, então:

$$\phi_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} \tag{3.4}$$

3.2.2.4 Focalização da Luz

Através da reflexão é possível focalizar os feixes e concentrar a radiação. Este mecanismo muito utilizado em concentradores solares que utilizam a óptica não-imaginária (WELFORD e WINSTON, 1989) tem sido utilizado também em dispositivos que concentram e redirecionam a luz natural. Inicialmente esta forma de concentrar a luz, em sistemas denominados anidólicos, era utilizado para climas cujo céu era nublado quase todo o ano, atualmente estes sistemas tem sido estudados também para serem utilizados com radiação solar direta. Com este mecanismo é possível concentrar um feixe de luz colimada em um foco de diâmetro muito reduzido em relação ao diâmetro do feixe. (Figura 3.9)

O fundamento do fenômeno de focalização é o fato de que, várias trajetórias vizinhas resultam no mesmo tempo de trânsito para a luz (CHAVES, 2001). Para concentrar os feixes utilizam-se duas parábolas espelhadas que podem ser descritas pela equação:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.5)$$

A vantagem desta forma é que possui um único ponto focal para o qual toda a luz pode ser refletida, como mostrado na Figura 3.9, portanto o uso de sistemas parabólicos maximiza a razão da concentração do sistema garantindo que toda a luz refletida é focada num receptor que normalmente é posicionado no ponto focal.

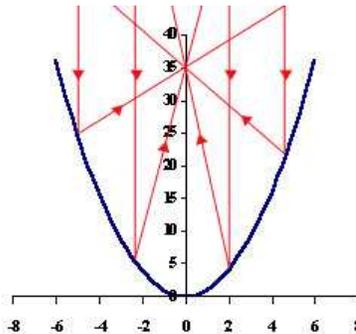


Figura 3.9 - O formato da parábola permite focar a luz em um único ponto.
Fonte: <http://reslab.com.au/resfiles/hightemp/texhtml>

3.3 Disponibilidade de Luz Natural

A luz do sol pode ser caracterizada como uma fonte intensa, cuja larga escala de espectros, lhe confere uma renderização de cores muito variada em aparência e intensidade. Estas variações de intensidade e cor, do amanhecer ao por do sol, a cada dia e em função da estação são devidas à vasta gama de possibilidades de incidência em função do movimento solar. Pela sua mobilidade e mudança de características é um forte veículo para expressão arquitetônica e pode fornecer ao edifício qualidade e conforto, se o seu impacto na edificação, e usuários, for considerado acuradamente no projeto (ROBBINS, 1986).

O que denomina-se normalmente luz natural, refere-se á combinação de duas variáveis principais, a luz direta proveniente do sol e a difusa proveniente da reflexão,

absorção e difusão desta mesma luz direta, na atmosfera terrestre. A difusão ocorre em parte devido às próprias partículas em suspensão na atmosfera, em parte pelo espalhamento que ocorre na parte inferior das nuvens, devido as condições atmosféricas. A luz também pode ser refletida pelo solo e superfícies circunstantes. Portanto a intensidade da luz que atingirá um ponto irá depender da densidade do ar através do qual os raios devem penetrar, da nebulosidade do local, da quantidade de partículas em suspensão e do meio circunstante (BAKER e STEEMERS, 2002).

Ao sofrer alterações, causadas devido à propagação da luz através de superfícies, que podem ser externas ao ambiente construído (nuvens, vegetação, outras edificações, terreno, dentre outros) ou internas, sendo estas as próprias superfícies que compõem o ambiente edificado, intensidade da luz é reduzida e sua distribuição espectral alterada. Conseqüentemente, ao trabalhar com a luz natural, será importante notar a flutuação existente na distribuição de luminâncias em função da abobada celeste (luz difusa) e o comportamento da radiação vinda do sol (luz direta), sobre as superfícies (iluminâncias). Para determinar a distribuição de luminâncias é necessário considerar às propriedades e variáveis do céu, enquanto para prever o comportamento da luz direta é preciso entender a geometria solar.

3.3.1 Luz Direta: Movimentos Aparentes do Sol

Para se definir a posição dos corpos celestes e descrever os movimentos aparentes, convencionou-se que todos eles se situam, por projeção radial a partir do lugar de observação, sobre uma superfície imaginária denominada esfera celeste, na qual o sol e todos os astros a ele vinculados deslizam por sua superfície.

Como a Terra realiza um movimento de rotação em torno de seu eixo norte-sul, no sentido de oeste para leste, vemos, se tomarmos a terra como referência, (e considerando-a estática), a esfera celeste girar ao redor do eixo no sentido contrário, ou

seja de leste para oeste. Esta rotação recebe o nome de movimento aparente da esfera celeste e o eixo de rotação é denominado Eixo da esfera celeste ou eixo do Universo. O paralelo á esfera celeste que passa pelo equador da Terra é denominado Equador Celeste. Por causa deste movimento e em função da inclinação do eixo da terra de cerca $23,5^\circ$, vemos todos os astros, embora mantendo suas posições relativas, descreverem arcos de circunferência sobre a esfera celeste.

O plano de translação da terra ao redor do sol (Eclíptica) não coincide com o Equador celeste (devido á inclinação do eixo da terra), no entanto por duas vezes no ano existe um ponto de intersecção das duas trajetórias. O ponto de intersecção do equador com a eclíptica, que é o ponto no qual o sol passa quando vem do hemisfério sul para o norte indica o início da primavera no hemisfério norte, ou o início do outono para o hemisfério Sul. Quando isto ocorre, o sol ilumina com a mesma intensidade os dois hemisférios da terra e este período é denominado equinócio (outono e primavera) no qual dias e noites tem o mesmo número de horas. Os maiores afastamentos do Sol do Equador celeste são denominados de solstícios e indicam os períodos nos quais os dias tem duração máxima e as noites duração mínima, para o solstício de verão e as noites duração máximas e os dias com duração mínima, para o solstício de inverno (Figura 3.10). Na Figura 3.11 a projeção plana da terra que indica a duração dos dias e noites para os Equinócios de Primavera e Outono e para os Solstícios de inverno e verão.

Portanto entre o dia 20 e 22 de Março, o Sol “passa” no Ponto Vernal (ponto de intersecção entre a Eclíptica e o Equador celeste, quando em trânsito do hemisfério Sul para o Norte) e sua declinação ($\delta=0$) é igual a zero. Este ponto indica o Equinócio de outono para latitudes sul e o equinócio de primavera para latitudes norte. A partir desta data, a declinação do Sol vai aumentando até o dia 21 de Junho, quando a declinação atinge seu valor máximo ($\delta=23,5^\circ$) que marca o solstício de inverno para latitudes sul, e o de verão, para latitudes norte.

Em seguida a declinação decresce até atingir o zero, marcando o equinócio de primavera para latitudes sul e outono para norte. A partir desta data a declinação do sol

torna-se negativa e decresce até o valor mínimo de $-23,5^\circ$, por volta do dia 21 de Dezembro (solstício de verão para latitudes sul e inverno para latitudes norte). Do solstício até o dia 21 de setembro a declinação aumenta até zero graus, até que a eclíptica encontre novamente o equador celeste, marcando então o equinócio de primavera para latitudes sul e outono para latitudes norte (NETO, 1995)

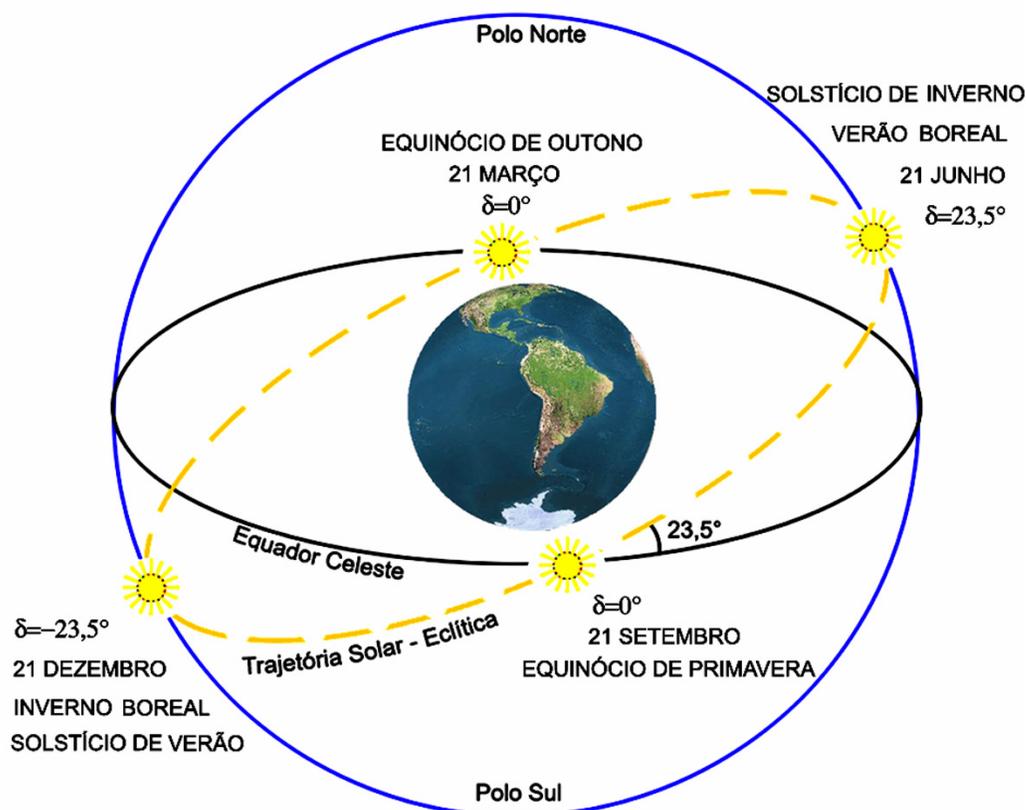
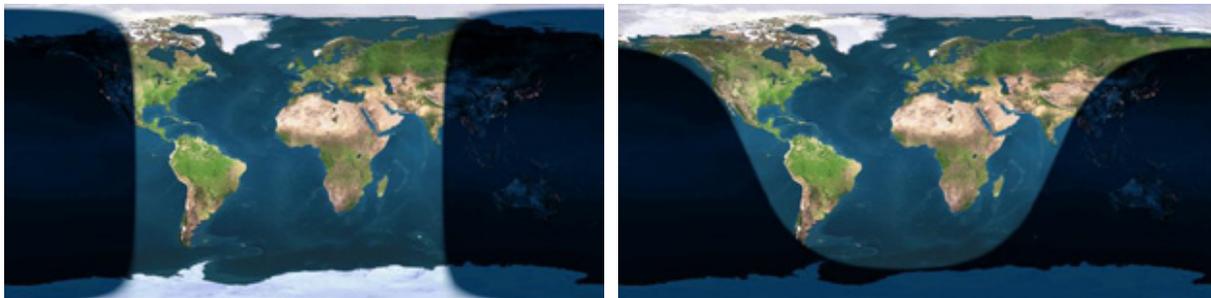


Figura 3.10 – Trajetória aparente do Sol em relação à Terra. A inclinação (δ) entre a Eclíptica e o Equador celeste determina solstícios e equinócios. Fonte: KÖSTER, 2004



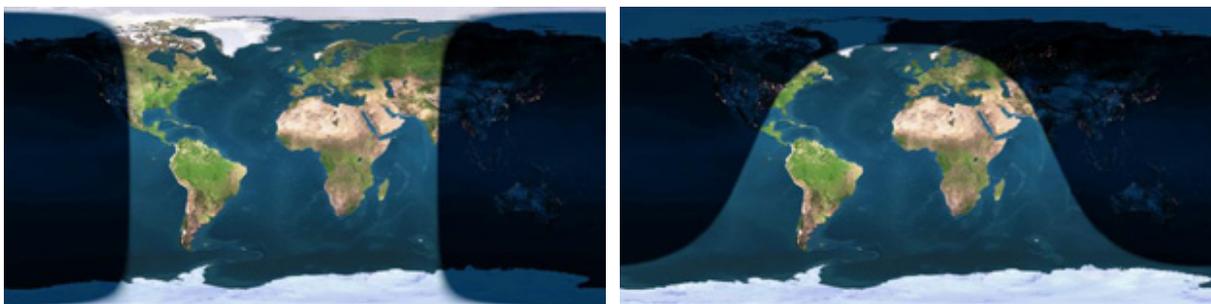


Figura 3.11 - (a) Duração dos dias e noites para Equinócios de Primavera e Outono (respectivamente á esquerda) e solstício de inverno e verão (respectivamente á direita)
 Fonte: www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncgi/Earth

Em consequência dos dois movimento aparentes, a trajetória descrita pelo sol na esfera celeste é como uma hélice dupla, fechada sobre si mesma, com um passo muito apertado devido á pequena variação diária da declinação solar. No entanto, para simplificar a realidade, podem se substituir as espirais de hélice por circunferências que marcam solstícios e equinócios, para descrever a trajetória solar aparente no equador celeste, (Figura 3.12).

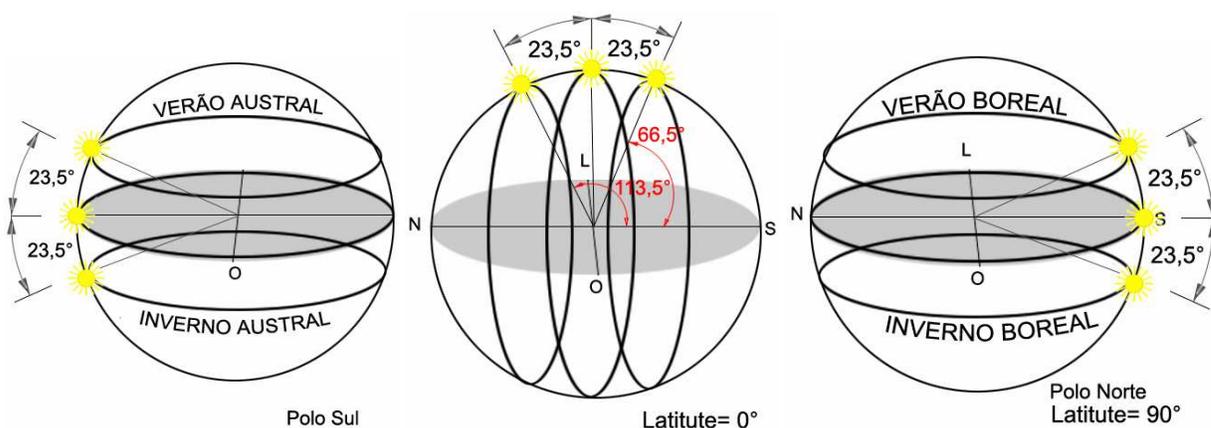


Figura 3.12 - Trajetória aparente do sol no equador e no pólo norte

Desta forma no equador a altura solar máxima é 90° nos equinócios, e nos solstícios, mais ou menos $23,5^\circ$, a partir do eixo do zênite. Para se calcular a altura máxima no solstício de verão e inverno (que se verifica sempre ao meio-dia), em outras latitudes, basta subtrair de 90° a latitude do ponto e somar $+23^\circ$ e menos 23° . Assim, por exemplo, para o Equador (latitude = 0°) efetua-s a seguinte operação: $90^\circ - 0^\circ - 23 = 67^\circ$, o que significa que a altura solar é 67° a partir do horizonte (sentido anti-horário),

para o solstício de inverno e $113^{\circ},5$ a partir do horizonte. Para sabermos a altura solar em relação ao zênite, Figura 3.12. Note-se ainda que (KOSTER, 2004). A altura do sol acima do horizonte, em graus (H_s), também pode ser obtida de acordo com a equação 3.6, onde t representa o tempo expresso em horas solares. Desta forma, a cada hora o sol se movimenta cerca de 15° . Por exemplo, para meio dia, ($t=12h$) $H_s = 0$ considerando que o ângulo está sendo medido a partir do zênite, ou seja, a partir do horizonte o sol terá uma altura de 90° .

$$H_s = 15^{\circ}(t - 12) \quad (3.6)$$

3.3.2 Determinação da Trajetória Solar

Existem vários métodos para calcular a posição do sol em relação a Terra, que podem ser baseados em cálculos numéricos, tabulares ou métodos gráficos. Alguns métodos de cálculo mais complexo é preferível quando uma precisão acentuada for necessária, como na navegação espacial, no entanto para arquitetura existem métodos gráficos que permitem entender a geometria solar com facilidade. Alguns destes métodos gráficos serão abordados na próxima seção.

3.3.2.1 Cartas Solares e Transferidores

As cartas solares são projeções, sobre um plano, dos pontos cardeais e das trajetórias aparentes do sol, acima do horizonte, para uma dada latitude, assinalando-se em cada trajetória projetada, as posições do sol (altura) e instantes (t), igualmente espaçados, anteriores e posteriores ao meio-dia solar verdadeiro. Da mesma forma, os transferidores de coordenadas horizontais, são projeções, sobre o mesmo plano, de círculos verticais igualmente espaçados em azimute e paralelos horizontais igualmente

espaçados em altura. Desta forma sobrepondo o transferidor na carta solar, com os pontos cardeais em concordância, possam-se determinar as coordenadas solares, altura acima do horizonte e azimute (ângulo em relação ao norte), para qualquer data e hora num ano. Para construção das cartas solares, qualquer método de projeção cartográfica pode ser empregado, mas consideram-se, mais apropriados aqueles que são projeções sobre um plano paralelo ao horizonte, passando pelo zênite, dentre estes destacam-se portanto a projeção ortográfica, a eqüidistante, a estereográfica e a gnomônica (NETO, 1995).

3.3.2.2 Projeção Ortográfica Horizontal

Aparentemente desenvolvida por Egípcios e Gregos por volta do II séc. a.C., a projeção ortográfica horizontal é uma projeção do infinito que não preserva nem as áreas nem os ângulos. As linhas de projeção são paralelas entre elas e perpendiculares em relação ao plano de projeção, sendo que este plano de projeção é tangente a esfera celeste Figura 3.13 A. Este tipo de projeção tornou-se popular em 1960 desde que as primeiras fotografias da terra foram tiradas do espaço, no entanto seta tipo de projeção não é amplamente utilizado para dados científicos em função das grandes distorções que se verificam nas proximidades das bordas da esfera (Figura 3.13 B). Com este método, conhecendo-se altura solar (γ) e o azimute (α) é possível projetar os pontos num plano de projeção e obter a projeção ortográfica da trajetória solar (SNYDER, 1987) de acordo com as equações:

$$x(\alpha, \gamma) = \cos \gamma \operatorname{sen}(\alpha - \alpha_0) \quad (3.7)$$

$$y(\alpha, \gamma) = \cos \gamma_1 \operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \gamma_1 \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (3.8)$$

Onde x e y são os pontos de projeção, α é o azimute, γ é 90° - altura solar (lembrando-se que, a altura solar toma-se a partir do zênite; e α_0 e γ_0 são os eixos de referência. Como exemplo apresenta-se na Figura 3.13 uma carta solar onde figuram as

trajetórias aparentes do Sol nos solstícios e equinócios, e o transferidor de coordenadas horizontais com graduações espaçadas de 15° em 15°.

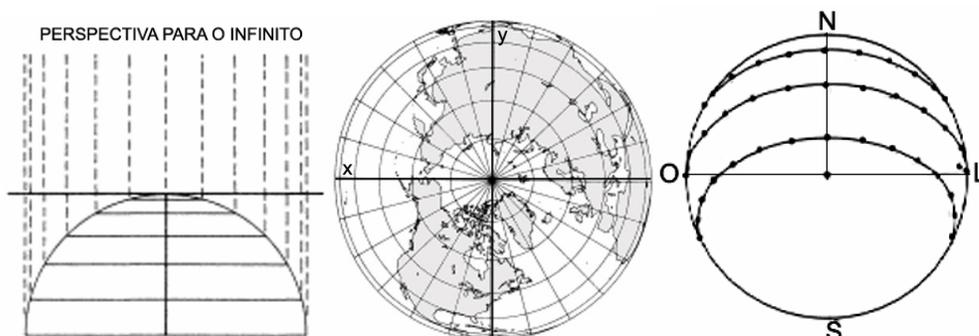


Figura 3.13 –(A) Plano de projeção tangente ao pólo.(B). Projeção Ortográfica do globo terrestre .
(C) Projeção Ortográfica da trajetória Solar. Fonte:
www.3dssoftware.com/Cartography/USGS/MapProjections/Azimuthal/Orthographic

3.3.2.3 Projeção Eqüidistante Horizontal

Neste tipo de projeção, diferentemente da projeção Ortográfica horizontal, os paralelos são igualmente espaçados em círculos concêntricos, e portanto não existe a distorção nas extremidades, Figura 3.14. Este método de projeção tem a vantagem de permitir a construção de cartas que quando combinadas com fotografias obtidas com a câmera de Robin-Hill, permitem interessantes estudos da insolação (NETO, 1995).

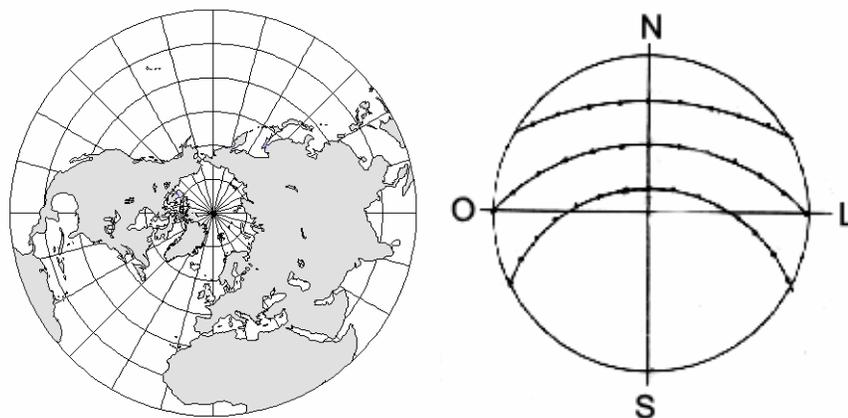


Figura 3.14 – Projeção Eqüidistante horizontal

$$x = k' \cos \lambda \operatorname{sen}(\alpha - \alpha_0) \quad (3.9)$$

$$y = k' [\cos \gamma_1 \operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \gamma_1 \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha_0)] \quad (3.10)$$

Sendo:

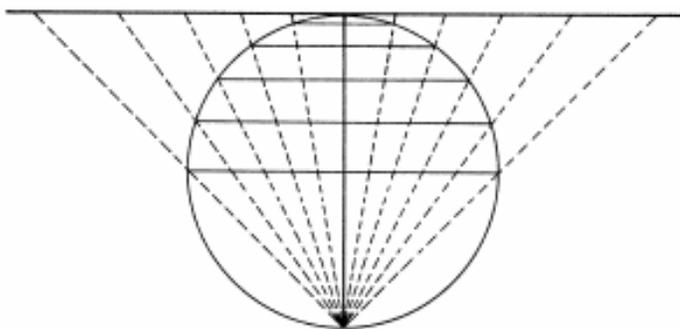
$$k' = \frac{c}{\operatorname{sen} c} \quad (3.11)$$

$$\cos c = \operatorname{sen} \lambda_1 \operatorname{sen} \lambda + \cos \lambda_1 \cos \lambda \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (3.12)$$

Aonde c é a distância angular do centro da esfera.

3.3.2.4 Projeção Estereográfica Horizontal

De acordo com a projeção estereográfica horizontal, qualquer ponto da abobada (A, B, C) é projetado no plano de projeção, por meio de uma reta que parte, invariavelmente do ponto notável chamado nadir (simétrico ao zênite), e une este, ao ponto a ser projetado no plano. Esta reta projetante, ao interceptar o plano de projeção, identifica neste, um ponto (A', B', C') que é a projeção desejada, Figura 3.15.



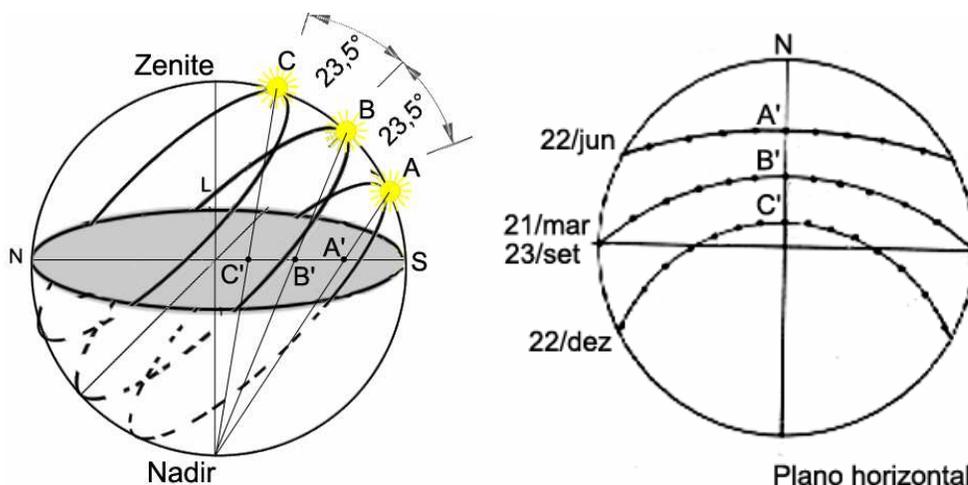


Figura 3.15 – (a) Diagrama para obtenção da projeção estereográfica. (b)Reta projetante que liga o ponto a ser projetado (A, B, C) ao Nadir, gerando os pontos projetados (A',B',C') no plano de projeção (c) Carta Solar na projeção estereográfica horizontal. Fonte: SNYDER, 1987

As equações de transformação de coordenadas, (SNYDER, 1987) para uma esfera de raio R são:

$$x = k \cos \gamma \operatorname{sen}(\alpha - \alpha_0) \quad (3.13)$$

$$y = k \cos \gamma_1 \operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \gamma_1 \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (3.14)$$

Onde α é o azimute, γ é 90° - altura solar e α_0 e γ_0 são os eixos de referência, e:

$$k = \frac{2R}{1 + \operatorname{sen} \gamma_1 \operatorname{sen} \gamma + \cos \gamma_1 + \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha_0)} \quad (3.15)$$

3.3.2.5 Projeção Gnomônica Horizontal

A projeção gnomônica é projetada do centro da esfera, e por isso também é denominada de projeção do centro (ou gnomônica) representa uma imagem formada por lentes esféricas e portanto aparece de forma bem distorcida, Figura 3.16.

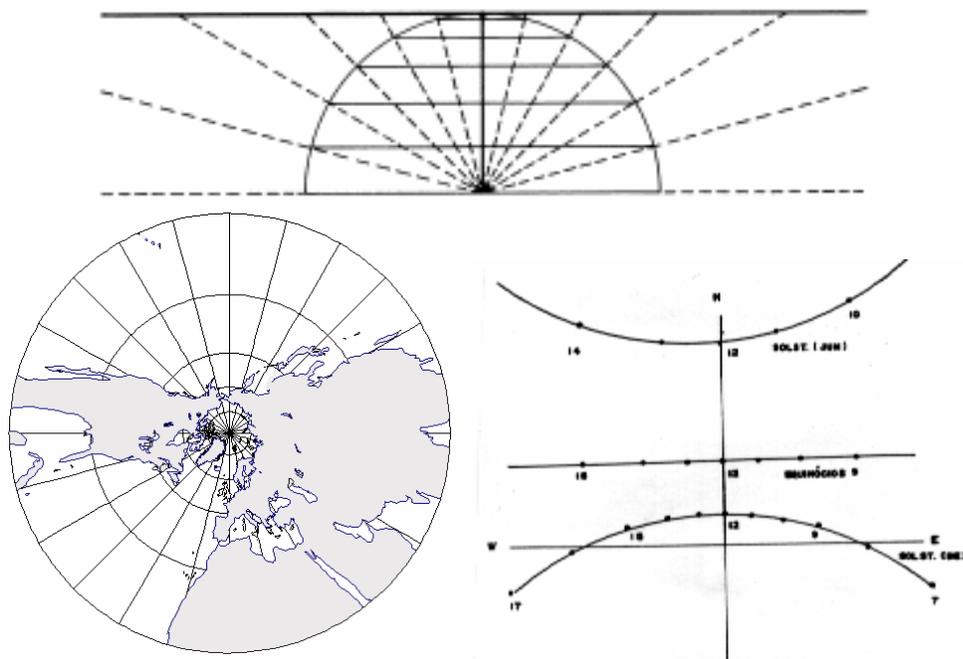


Figura 3.16 – Projeção Gnomônica Horizontal

As equações para obtenção das projeções são reportadas abaixo:

$$x = \frac{\cos \gamma \operatorname{sen}(\alpha - \alpha_0)}{\cos c} \quad (3.16)$$

$$y = \frac{\cos \gamma_1 \operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \gamma_1 \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha_0)}{\cos c} \quad (3.17)$$

e c é a distância angular do ponto (x,y) do centro da projeção dado por

$$\cos c = \operatorname{sen} \gamma_1 \operatorname{sen} \gamma + \cos \gamma_1 \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (3.18)$$

3.3.2.6 Transferidores

Os transferidores de coordenadas horizontais permitem, para quem em posse de uma carta solar, determinar altura e azimute solares. Para tanto basta sobrepor o transferidor equivalente ao tipo de carta utilizada, (para cada tipo de projeção seu

transferidor equivalente) e ler diretamente ou por interpolação os valores correspondentes do ponto desejado, para uma determinada data.

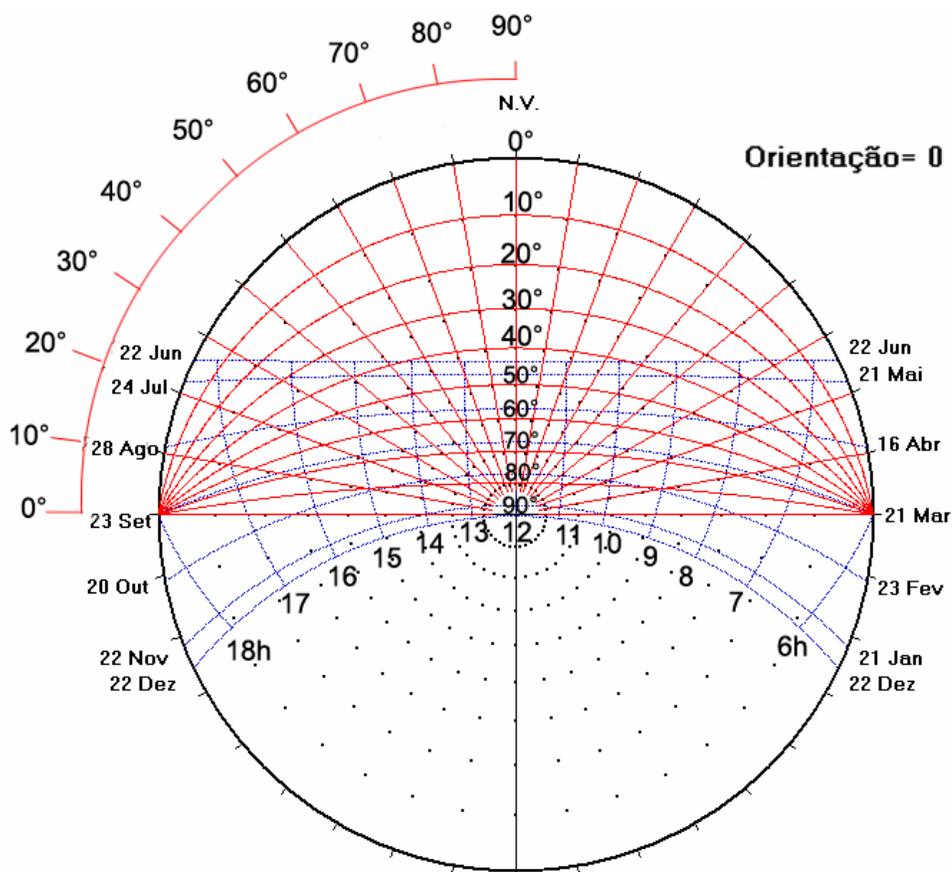


Figura 3.17- Projeção Estereográfica dos percursos aparentes do sol para latitude $-22,9^\circ$, com sobreposição do transferidor horizontal. Fonte: www.labeee.ufsc.br/software/luzDoSol

Na Figura 3.17 uma projeção estereográfica da trajetória solar aparente aparece em azul. Sobrepondo-se o transferidor horizontal, em vermelho, é possível identificar os ângulos de altura e azimute. Nesta pesquisa, optou-se por trabalhar com um algoritmo de precisão (MURIEL, 2001) visto que o dimensionamento dos painéis (DIL) utilizados na fase experimental dependia rigorosamente dos resultados das simulações da trajetória solar.

3.3.2.7 Protetores Solares

A luz natural pode ser admitida no interior das edificações por meio de aberturas zenitais ou laterais. A iluminação zenital fornece, em geral, uma maior uniformidade na distribuição da luz sobre o plano de trabalho, quando comparada a sistemas laterais com mesma área de abertura, no entanto, não fornece uma visão do entorno, necessidade básica na grande maioria dos ambientes, (CABÚS ,1997).

Para aberturas laterais, a iluminância produzida por uma fonte diminui à medida que a distância com relação a ela aumenta, isto faz com que os sistemas de iluminação lateral só sejam eficientes para regiões próximas às janelas, pois são raros os casos em que a luz natural consegue atingir o fundo da sala. Tanto a luminância excessiva proveniente da abóbada celeste e do sol, como o calor por estes emitidos, devem ser controlados através do uso de proteções solares.

A luz solar direta que incide perpendicularmente num plano pode atingir até 100klux, por isto ela tem sido excluída do interior da edificação, com a justificativa de ser provável causa de ofuscamento e aquecimento. Esta preocupação com o aquecimento causado pela luz natural, nos trópicos, acabou originando, edifícios, ora com pequenas aberturas, ora com excessivas proteções, que tornaram os espaços muito mais escuros que aqueles encontrados em climas temperados, que apesar de não ter a mesma abundancia de luz conseguiram um aproveitamento muito mais eficiente da luz solar (EDMONDS e GREENUP, 2002).

Para o dimensionamento dos protetores solares aplica-se um método gráfico denominado traçado de máscaras. Para o traçado de sombras dos protetores solares é necessário analisar o ângulos de incidência solar num determinado período.

3.3.3 Luz Difusa

Quando a radiação solar penetra na atmosfera da terra, uma porção é difundida devido aos fenômenos de refração e absorção das moléculas e partículas em suspensão e uma parte é refletida pelas nuvens. Desta forma o domo inteiro parece emitir luz. Esta porção da radiação refletida pela abobada celeste é a componente difusa. Por sua vez esta varia de acordo com uma serie de parâmetros geométricos, meteorológicos e sazonais (a posição do sol, o tempo e o clima) que em função de seu constante dinamismo são difíceis de decodificar. Sob céu claro (sem nuvens) as pequenas partículas atmosféricas refletem predominantemente aqueles comprimentos de onda que correspondem a porção azul do espectro, fazendo com que o céu assuma uma cor azul. Sob estas condições o céu é mais escuro a 90° do sol (no horizonte se o sol estiver no zênite) e mais claro e brilhoso nas áreas que rodeiam o sol. Em contrapartida sob céu coberto as partículas em suspensão refratam e refletem todos os comprimentos de onda em iguais proporções ocasionando a vista de um céu claro, aproximadamente três vezes mais brilhante no zênite do que no horizonte (MOORE, 1984).

Enquanto a luz solar direta é uma fonte pontual de iluminação, a luz difusa é uma fonte superficial, distribuída e bem mais suave que a primeira, produzindo uma iluminação, sem direcionamento específico e portanto não gera maiores sombreamentos. Para céu coberto os valores podem atingir de 500 a 2000lux bem menor que aqueles para luz solar direta, de 64.584 a 107.640 lumens/m² (ou lux).

3.3.3.1 Condições de Céu

O desempenho de uma fonte de luz de grande superfície, como a abobada celeste, para a qual o inverso do quadrado da distância não é aplicável, não pode ser definido pela curva polar de sua intensidade luminosa, assim torna-se necessário mostrar como se dá o fenômeno da iluminação devido a uma fonte superficial (abobada celeste) (ABNT, 2004). Portanto no caso de edificações, a iluminação produzida numa superfície, pelo céu visto através de aberturas é independente da distância da abobada celeste (neste caso a fonte de iluminação) sendo completamente definida pela direção e luminância de cada zona do céu e pelo ângulo sólido abrangido.

3.3.3.2 Tipos de Céu

Sendo que a disponibilidade de luz natural varia de acordo com a altura do sol sobre o horizonte (luz direta) e com as diferenças no grau de nebulosidade e turvamento da atmosfera, conhecer a distribuição de luminâncias no domo celeste é um dos dados principais necessários para se projetar corretamente utilizando a luz natural. Vários modelos matemáticos foram criados para representar a distribuição de luminâncias do domo celeste, para diferentes tipos de céu, dos quais os mais comuns são o uniforme, encoberto e claro, sendo que existe uma enorme variedade de modelos, que compreendem também o céu parcialmente nublado. No entanto o principal problema dos métodos analíticos é se servir de modelos que realmente reproduzam as condições de céu real.

É importante notar que os modelos encontram uma série de limitações, exatamente pelo fato de que, na prática, a distribuição da luz varia constantemente e a distribuição de luminâncias varia em função do tipo de nuvem, da quantidade de água que esta contém e de seu posicionamento (Figura 3.18). Mesmo os céus que aparentam ser uniformes, apresentam na verdade grandes assimetrias na distribuição de luminâncias, como mostram estudos recentes (HERNANDES-ANDRES, 2003).

Estas variações na luminância da abobada (Figura 3.19) são muito importantes principalmente porque um ponto particular, num ambiente interno, terá uma relativa exposição ao céu, dependendo da vista da abobada que este ponto terá pela abertura (LEE e ROMERO, 2003).

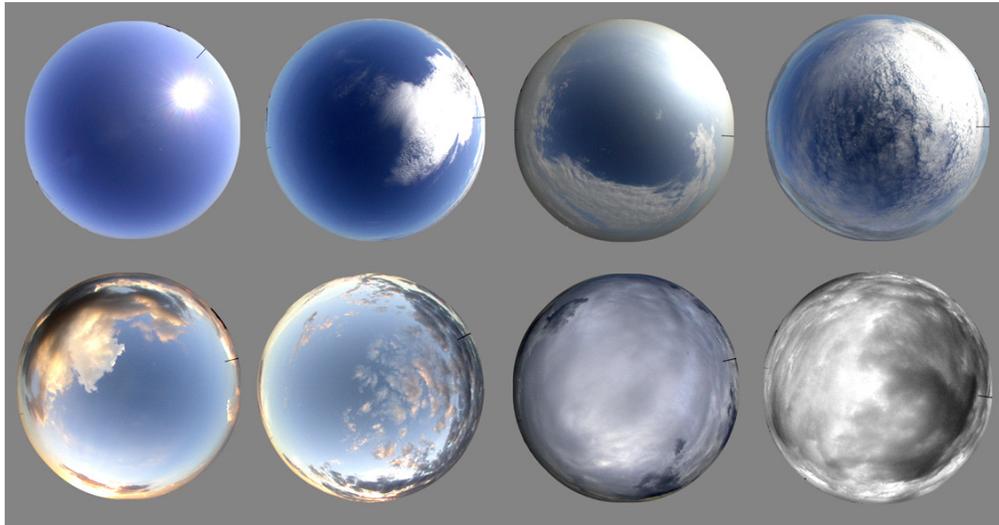


Figura 3.18 – Distribuição de nuvens em Campinas de março à outubro.
Fonte: do autor

Apesar disto, para poder realizar simulações de gastos energéticos nas edificações é necessário conhecer as condições de iluminação natural durante todo o ano e isso, na maioria das localidades, só pode ser feito através das estimativas de luminâncias dadas pelos modelos.

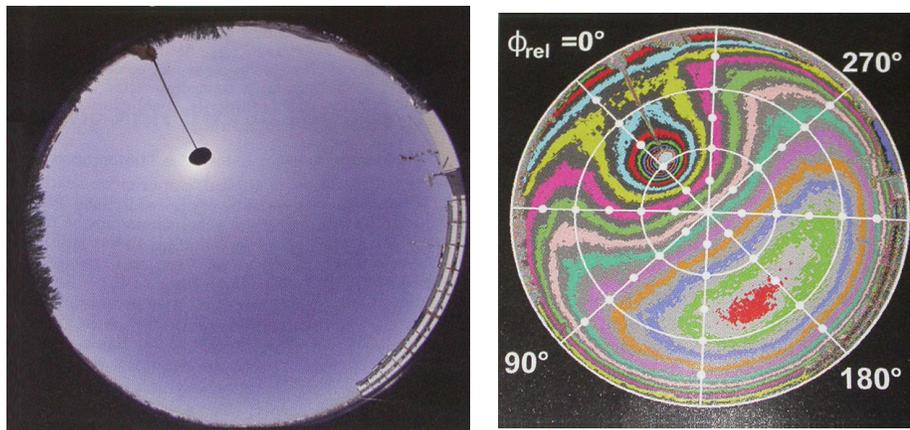


Figura 3.19 - Céu claro variação de luminância na abobada celeste.
Fonte: HERNANDES-ANDRES, 2003

Atualmente a norma da CIE S 011/E:2003 (CIE S 011/E:2003 Commission Internationale De L'eclairage) transformada em ISO 15:2004(E), estabelece uma serie de distribuições luminosas que modelam as condições do céu sob uma variada gama de condições, de totalmente coberto ate céu claro. É importante ressaltar que o desenvolvimento deste modelo aconteceu graças a evolução e incorporação de outros que serão rapidamente resumidos a seguir.

Os modelos existentes de distribuição de luminâncias para classificação de céu, podem ser organizados segundo três classes (ROY et al, 1995). Modelos empíricos análogos: são definidos por expressões algébricas derivadas, que definem a continua distribuição de luminâncias pela abobada celeste que seguem os modelos da Commission Internationale de L'Eclairage (CIE). Dados a calibração apropriada, tempo e localização específicos, o valor da luminância pode ser obtido para qualquer α e γ (azimute e altitude solar).

Os modelos de dados medidos: são definidos por valores medidos em posições conhecidas do domo celeste. São utilizados scanners que conseguem armazenar até 140 pontos no domo e técnicas de interpolação são utilizados para obter valores em outros pontos para qualquer altitude e azimute (γ e α) desejados.

Modelos híbridos de dados: estes modelos são derivados dos primeiros dois com o objetivo de descrever melhor as condições locais. Descrições detalhadas de cada um destes modelos são dados por (ROY et al, 1995).

3.3.4 Modelo de Céu Encoberto

O primeiro modelo padrão CIE para distribuição de luminâncias foi idealizado para um tipo de céu encoberto, cuja cobertura de nuvens é escura densa e homogênea. A luminância é tratada como uniforme em toda a abóbada e portanto em qualquer ponto

a luminância é sempre igual àquela encontrada no zênite, ou seja a luminância é independente das relações geométricas ($L_{\theta}=L_z$).

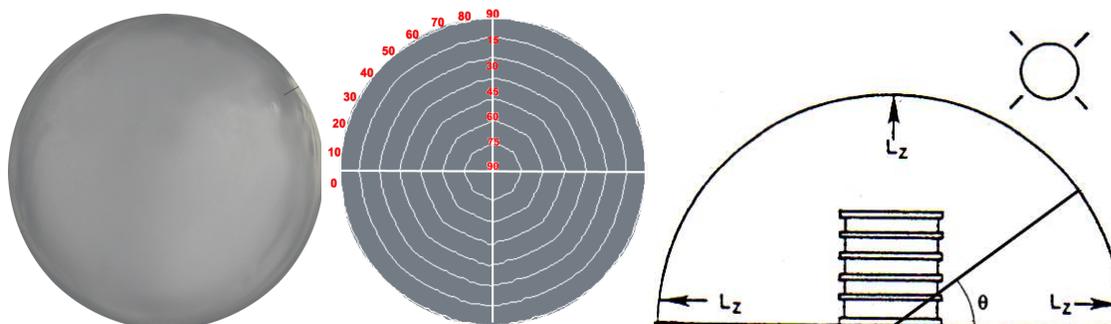


Figura 3.20 - Céu homogêneo, a luminância não varia com parâmetros geométricos como altura e azimute, céu de Campinas em 06/06/05. Fonte: ROBBINS, 1986

Em seguida surgiu um modelo não uniforme, para céu encoberto, sugerido por Moon e Spencer (1942) e originou o CIE Standard Overcast Sky (1955) de 1996 da CIE (CIE S 003/E-1996). Modelo de assimetria de luminâncias em função da altitude, ou seja, a luminância não é uniforme, mas varia apenas de acordo com a altura solar (Figura 3.21).

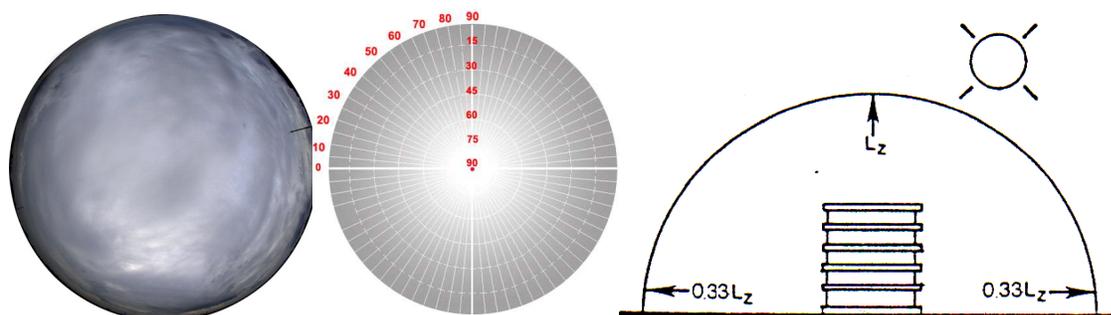


Figura 3.21 - Figura céu uniforme, luminância no zênite 3 vezes maior que no horizonte, céu de Campinas em 06/06/05. Fonte: ROBBINS, 1986

Pertence a uma condição meteorológica que corresponde a um céu coberto totalmente nebuloso, com uma atmosfera clara aonde o sol não é visível e o céu é três vezes mais luminoso no zênite que no horizonte (Figura 3.21), sendo que através da abobada não se percebe nenhum efeito direcional da luz. As variações da luminância

do horizonte para o zênite na proporção 1:3 são descritas por uma relação trigonométrica:

$$L_p = L_z \frac{1 + 2 \operatorname{sen} \gamma}{3} = L_z \frac{1 + 2 \cos Z}{3} \quad (3.19)$$

onde L_p é a luminância num ponto no céu em cd/m^2 , L_z é a luminância no zênite em cd/m^2 , γ é o ângulo de elevação de um elemento no céu acima do horizonte e Z é a distância angular entre um elemento do céu e o zênite.

3.3.4.1 Cálculo das Iluminâncias devido á luz difusa da abóbada

Para calcular a iluminância num ponto que abranja uma área infinitesimalmente pequena, conhecendo o ângulo sólido (3.20) e a relação da iluminância com a luminância (3.21) (MONCADA, GIUDICE e SANTOLI, 1999b) pelas,

$$d\omega = \operatorname{sen} \theta d\theta d\varphi \quad (3.20)$$

$$E = \int L d\omega \quad (3.21)$$

é possível então calcular a iluminância recebida num ponto (θ, φ) em função da luminância de toda abobada celeste de acordo com a equação (ANDERSEN, 2004).

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} [L(\theta, \varphi) \operatorname{sen} \theta \cos \theta] d\theta d\varphi \quad (3.22)$$

No caso de uma abertura, na qual a área da abobada não é infinitesimal e sim equivalente a área da janela, enxergando parte do céu a iluminância num ponto $L(\theta, \varphi)$ será dada pela equação:

$$E_p = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [L(\theta, \varphi) \text{sen} \theta \cos \theta] d\theta d\varphi \quad (3.23)$$

Assim ao utilizarmos o modelo de céu coberto CIE onde $L_p = L_z(1 + 2\text{sen}\theta)/3$ é possível calcular tanto a iluminância recebida por um ponto exposto á inteira abobada ($E_{\text{tot}}^{\text{CIE}}$) a como a iluminância num ponto (E_p^{CIE}) de acordo com as equações (3.22) e (3.23). Portanto a componente SC ($SC = E_{\text{tot}}^{\text{CIE}}$) medida em um ponto sob condições de céu encoberto CIE tem uma iluminância expressa em lux que pode ser obtida através da equação:

$$E_{\text{tot}}^{\text{CIE}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \left[L_z \left(\frac{1 + 2 \cos \theta}{3} \right) \text{sen} \theta \cos \theta \right] d\theta d\varphi \quad (3.24)$$

Resolvendo esta integral obtêm-se o valor da iluminância num ponto, onde :

$$E_{\text{tot}}^{\text{CIE}} = \frac{7\pi}{9} L_z \quad (3.25)$$

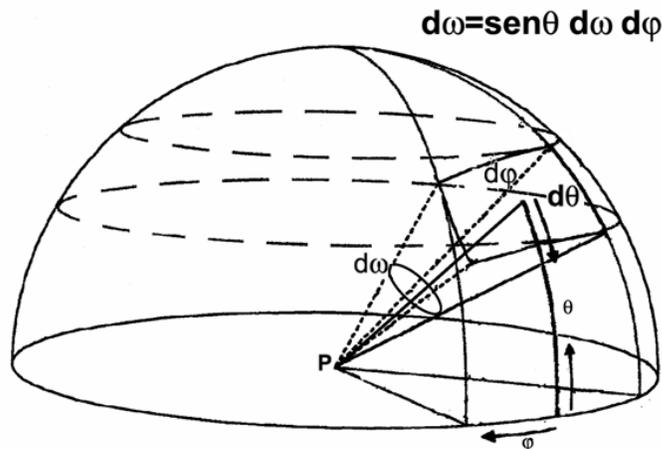


Figura 3.22 – Influencia da luminância da abobada celeste. Fonte: Modificado de ANDERSEN, 2004

Em seguida aplicando á equação $E_p = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [L(\theta, \varphi) \text{sen} \theta \cos \theta] d\theta d\varphi$ (3.23) os

valores da luminância da abobada tipo CIE e conhecendo os ângulos $\theta_1, \theta_2, \varphi_1$ e φ_2 (Figura 3.23), é possível determinar a iluminância num dado ponto (3.27).

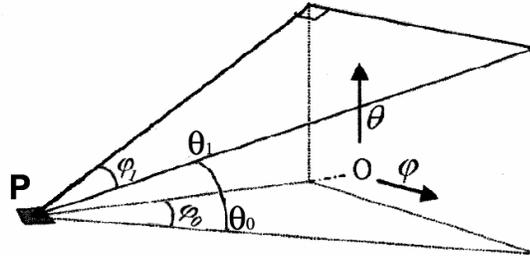


Figura 3.23 - Ângulos azimutais e zenitais. Fonte: ANDERSEN, 2004

$$E_P^{CIE} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[L_z \frac{(1 + 2 \cos \theta)}{3} \text{sen } \theta \cos \theta \right] d\theta d\varphi \quad (3.26)$$

$$E_P^{CIE} = \frac{L_z}{3} (\varphi_1 - \varphi_2) \left[\frac{1}{2} (\text{sen}^2 \theta_2 - \text{sen}^2 \theta_1) - \frac{2}{3} (\cos^3 \theta_2 - \cos^3 \theta_1) \right] \quad (3.27)$$

3.3.5 Modelo de Céu Claro

O modelo de céu claro representa uma condição meteorológica com ausência de nuvens. A distribuição de luminâncias para céu claro foi derivada de KITTLER (1967), incorporado a norma CIE Standard Clear Sky (1973) e em seguida para o standard CIE/ISO 03/E-1996 segundo a fórmula:

$$L(\gamma, \chi) = L_z \frac{\left(1 - e^{-0.32/\text{sen} \gamma} \right) (0.91 + 10e^{-3\chi} + 0.45 \cos^2 \chi)}{0.274 (0.91 + 10e^{-3Z_s} + 0.45 \cos^2 Z_s)} \quad (3.28)$$

onde: $L(\gamma, \chi)$ é a luminância em um elemento no céu; χ é a distância angular do elemento do céu ao sol; Z_s é a distância do sol ao zênite (DARULA e KITTLER, 2002)

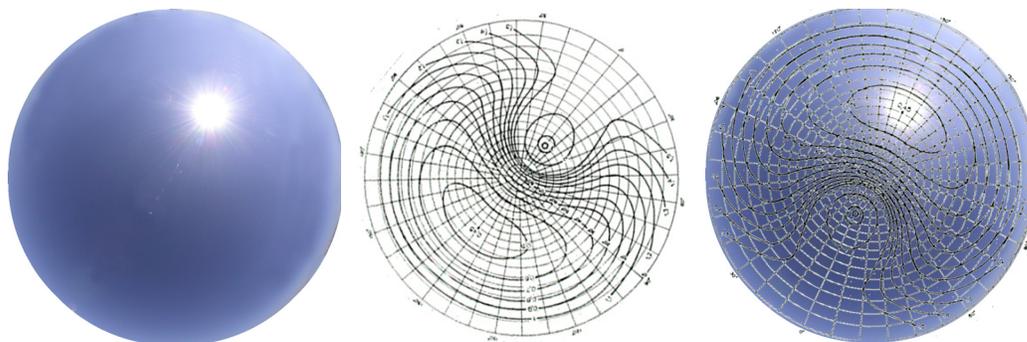


Figura 3.24 - a) Céu claro, 12h , 09/2005,Campinas b) mapa de contornos da radiância normalizada c) sobreposição dada pelo mapa de contorno. Fonte: HARRISON e COOMBES, 1988

Ambos os modelos para céu claro e encoberto tem uma ótima aproximação da distribuição de luminâncias numa abobada celeste e apesar da polêmica gerada entorno da veracidade destes modelos estudos comprovam que eles de fato descrevem condições de luminâncias possíveis. No entanto a frequência de ocorrência destas condições de céu totalmente claro ou totalmente encoberto, tão bem moldadas por estes padrões internacionais, são consideravelmente pequenas. A maioria dos céus reais encontra-se numa faixa intermediária aos dois modelos. Desta forma os modelos para céus parcialmente nublados começaram a ser desenvolvidos (DARULA e KITTLER, 2002).

3.3.6 Modelo De Céu Parcialmente Nublado

O problema dos modelos padrão para céu claro e encoberto é que abrangem apenas uma pequena porcentagem das possibilidades das condições de céu realmente existentes. Para poder utilizar a energia solar e planejar a conservação energética mediante o projeto dos edifícios, são necessários modelos que utilizem dados meteorológicos, de forma que seja possível reproduzir de forma mais acurada possível as condições do tempo. Para garantir um projeto que vise a conservação de energia, são necessários modelos realísticos de previsão de radiação solar e disponibilidade de luz natural que permitam a avaliação de céus parcialmente cobertos. Vários modelos

foram desenvolvidos com este propósito e atualmente mediante a utilização de ferramentas computacionais é possível reproduzir uma vasta gama de condições de céu em função do tipo cobertura das nuvens e de sua porcentagem (IGAWA et al, 2004).

A eficácia luminosa da luz natural é um parâmetro utilizado para estimar o comportamento da luz natural, é definida como sendo o quociente do fluxo luminoso pelo fluxo radiante expresso em lumens/watt e depende da altitude solar, da cobertura das nuvens (céu claro, parcialmente encoberto ou encoberto) e do vapor de água presentes na atmosfera (LITTLEFAIR, 1985). A eficácia luminosa fornece a relação entre dois parâmetros importantes: a iluminação natural e a radiação solar, ou seja da iluminância da luz natural pela correspondente irradiância devida á radiação solar e pode ser obtida de acordo coma equação:

$$K = \frac{683 I_{e\lambda} V_{\lambda} d_{\lambda}}{I_{e\lambda} d_{\lambda}} \quad (3.29)$$

Onde:

$I_{e\lambda}$ é o fluxo espectral radiante, em watts por unidade de intervalo comprimento de onda

V_{λ} é a resposta espectral relativa do olho humano á aquele comprimento de onda

d_{λ} faixa de comprimento de onda,

683 é o fluxo luminoso que corresponde a um fluxo radiante de 1W a 555nm de comprimento de onda.

Quinze tipos de céu relativos as distribuições de luminâncias são mostrados por KITTLER et al (1998) e são baseados em valores de luminâncias escaneados do céu de Tóquio, Berkeley e Sidney a foram propostos simultaneamente. Cinco tipos para céu coberto, cinco tipos para céu claro e cinco céus parcialmente nublados (ou de transição) são modelados pela combinação de graduação e pelas funções “indicatrix”. Este é o modelo que foi adotado em 2004 pela CIE e cobre todas as ocorrências de

espectro considerando espalhamentos diferentes e difusos pela difusão na atmosfera e os efeitos da luz solar direta, dela resultou a norma ISO 15469:2004(E), que será mostrado a seguir.

3.3.7 Modelo Padrão CIE/ISO 2004

Atualmente CIE estabeleceu mediante esta norma, uma série de condições de luz natural externas que ligam a luz solar direta e a luz da abobada para fins práticos. A posição do sol e de um elemento arbitrário no céu, assim como os parâmetros “a”, “b” “c”, “d” e “e”, que descrevem as condições atmosféricas, são utilizadas para o cálculos das luminâncias. Sendo que “a” e “b” representam os parâmetros de gradação das luminâncias, e “c”, “d” e “e” os índices de espalhamento. As distribuições de luminâncias têm as seguintes características:

São simétricas a partir do meridiano solar e são obtidas em função da distância angular Z_s entre o sol e o zênite. São definidas por funções suaves e contínuas. Estas distribuições são típicas de céus claros e para aqueles cuja cobertura de nuvens é homogênea. Fornecem uma aproximação para céus de nuvens de formação heterogênea que é suficientemente acurada para propósitos práticos de projeto. A luminância relativa para qualquer ponto no céu depende do ângulo χ entre este elemento do céu e o sol, e, do ângulo Z , entre o elemento do céu e o zênite. É dado em termos de duas funções: o índice relativo de espalhamento $f(\chi)$ e a gradação da luminância entre o horizonte e o zênite $\varphi(Z)$.

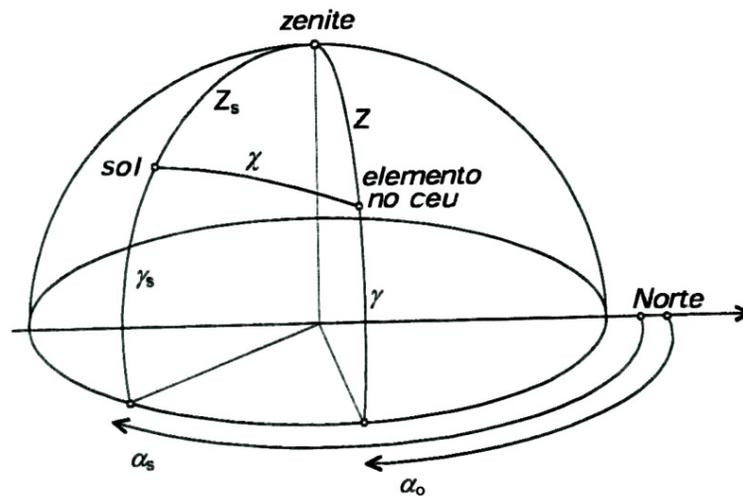


Figura 3.25 - :Ângulos zenitais e azimutais que definem a posição do sol e de um elemento no céu.
 Fonte: ISO 15469:2004

Onde:

- a, b parâmetros de gradação da luminância
- α_o azimute de um elemento no céu (em radianos)
- α_s azimute do sol (em radianos)
- c, d, e parâmetros indicativos de espalhamento
- χ menor distância angular entre o elemento do céu e o Sol
- $f(\chi)$ função indicativa do espalhamento
- $\varphi(Z)$ função da gradação do espalhamento
- γ elevação angular de um elemento do céu acima do horizonte
- L_a Luminância de um elemento do céu (cd/m^2)
- L_z Luminância no zênite (cd/m^2)
- Z distância angular entre um elemento do céu e o zênite (radianos)
- Z_s distância angular o Sol e o zênite

3.3.7.1 Distribuição de Luminâncias

A posição de um elemento no céu, arbitrário, é definido pelo seu ângulo com o zênite Z e pelo ângulo de azimute, dados pela diferença entre o elemento e o sol $|\alpha_0 - \alpha_s|$ (Figura 3.25). Se Z_s é o ângulo zenital solar, a distância angular entre o elemento e o sol é :

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos|\alpha_0 - \alpha_s|) \quad (3.30)$$

O ângulo de elevação, γ , pode ser usado no lugar do ângulo zenital, Z , para definir a posição de um elemento. Então:

$$Z = \frac{\pi}{2} - \gamma \quad (3.31)$$

De forma semelhante o ângulo zenital solar pode ser obtido pela elevação solar por:

$$Z_s = \frac{\pi}{2} - \gamma_s \quad (3.32)$$

A razão da luminância, L_a , de um elemento arbitrário no céu em relação a luminância no zênite, L_z é dada por:

$$\frac{L_a}{L_z} = \frac{f(\chi)\varphi(Z)}{f(Z_s)\varphi(0)} \quad (3.33)$$

A função de graduação da luminância, φ , refere-se a luminância de um elemento no céu em relação ao seu ângulo zenital:

$$\begin{aligned} \varphi(Z) &= 1 + a \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad \text{para } 0 \leq Z < \frac{\pi}{2} \\ \varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) &= 1 \quad \text{para } Z = \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Os parâmetros a e b são dados na Tabela 3.3 para tipos de céu padronizados. A equação (3.33) requer o valor no zênite, dado pela fórmula:

$$\varphi(0) = 1 + a \exp b \quad (3.35)$$

A função f é o índice de espalhamento que relaciona a luminância relativa de um elemento no céu em relação a sua distância angular do sol:

$$f(\chi) = 1 + c \left[\exp(d\chi) - \exp\left(d \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cos^2 \chi \quad (3.36)$$

e seu valor no zênite é

$$f(Z_s) = 1 + c \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cos^2 Z_s \quad (3.37)$$

Para propósito de classificação e descrição os parâmetros de “a” a “e” se encontram na Tabela 3.3. Nesta, estão listadas 15 distribuições padrão de luminâncias relativas, que divididos em seis grupos (de I a VI) possuem parâmetros “a e b” para a função de graduação e parâmetros “c,d” e “e” para a função de espalhamento.

DARULA e KITTLER (2002) mostram como simular tipos de céu padrão, o que permite representar modelos mais verídicos possível para as luminâncias da abobada celeste permitindo a simulação, mesmo quando não ha dados medidos suficientes para que se conheçam as características luminosas locais. Com programas de simulação é possível diagnosticar as mudanças em função da luz solar direta e difusa. Os modelos podem considerar as horas de insolação, turbidez e poluição, que são determinantes para definir o tipo de céu e as luminâncias da abobada.

Tabela 3.3 - Tabela índices para classificação dos tipos de céu. Fonte: CIE 2004 - ISO 15469:2004

| Tipo | Gradação | Indicatrix | a | b | c | d | e | Descrição |
|------|----------|------------|------|-------|----|------|------|--|
| 1 | I | 1 | 4,0 | -0,7 | 0 | -1,0 | 0 | CIE Standard Overcast Sky Céu encoberto - Gradação de luminâncias ingremes em função da altura solar e uniformidade azimutal |
| 2 | I | 2 | 4,0 | -0,7 | 2 | -1,5 | 0,15 | Encoberto - Gradação de luminâncias ingremes em função da altura solar e brilho moderado ao redor do sol |
| 3 | II | 1 | 1,1 | -0,8 | 0 | -1,0 | 0 | Encoberto - Gradação de luminâncias moderada com uniformidade azimutal |
| 4 | II | 2 | 1,1 | -0,8 | 2 | -1,5 | 0,15 | Encoberto - Gradação de luminâncias moderada brilho moderado ao redor do sol |
| 5 | III | 1 | 0 | -1,0 | 0 | -1,0 | 0 | Sky of uniform luminance Céu de luminâncias uniformes |
| 6 | III | 2 | 0 | -1,0 | 2 | -1,5 | 0,15 | Parcialmente encoberto – Sem gradação em função da altura solar com brilho moderado ao redor do sol |
| 7 | III | 3 | 0 | -1,0 | 5 | -2,5 | 0,30 | Parcialmente encoberto – Sem gradação em função da altura solar e com uma região circumsolar brilhosa |
| 8 | III | 4 | 0 | -1,0 | 10 | -3,0 | 0,45 | Parcialmente encoberto – Sem gradação em função da altura solar e com uma coroa solar distinta |
| 9 | IV | 2 | -1,0 | -0,55 | 2 | -1,5 | 0,15 | Parcialmente encoberto - com obstrução |
| 10 | IV | 3 | -1,0 | -0,55 | 5 | -2,5 | 0,30 | Parcialmente encoberto – com uma região circunsolar brilhosa |
| 11 | IV | 4 | -1,0 | -0,55 | 10 | -3,0 | 0,45 | Céu branco-azul com coroa solar distinta |
| 12 | V | 4 | -1,0 | -0,32 | 10 | -3,0 | 0,45 | CIE Standard Clear sky low luminance turbidity CIE Padrão de Céu claro com baixa turbidez |
| 13 | V | 5 | -1,0 | -0,32 | 16 | -3,0 | 0,30 | CIE Standard Clear sky, polluted atmosphere CIE Padrão de Céu claro com atmosfera poluída |
| 14 | VI | 5 | -1,0 | -0,15 | 16 | -3,0 | 0,30 | Céu túrbido sem nuvens com ampla coroa solar |
| 15 | VI | 6 | -1,0 | -0,15 | 24 | -2,8 | 0,15 | Céu branco-azul túrbido com ampla coroa solar |

3.3.8 Determinação da Iluminância

Para determinar a iluminância num ponto P em um plano horizontal é conveniente visualizar o ponto envolvido por uma hemisfera de raio unitário, com seus círculos indicando a altitude e raios indicando azimute, ABNT 2005, Figura 3.26.

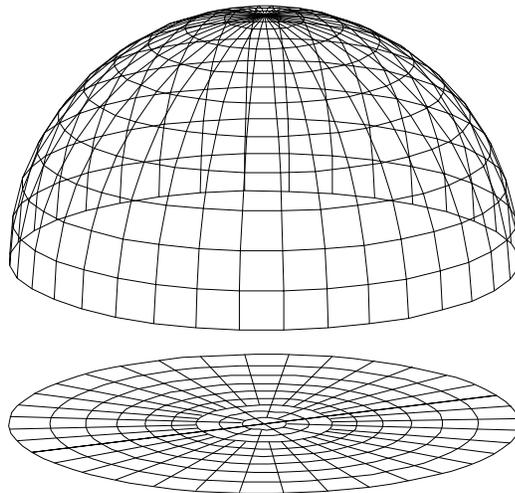


Figura 3.26- Hemisfera de raio unitário e sua projeção no plano horizontal
Fonte: ABNT 2005

Para o cálculo da iluminação produzida no ponto P por uma abertura, produz-se a projeção radial da abertura sobre uma hemisfera de raio unitário, centrada em P e obtêm-se dS , um elemento da hemisfera ABNT 2005. Em P a área dS vai cobrir o mesmo ângulo sólido que a abertura, como pode ser visto na Figura 3.27. Caso P esteja num plano horizontal e β seja o ângulo entre a vertical e a direção de dS e L é a luminância do céu, visível através da abertura, a iluminância em P será calculada pela seguinte expressão:

$$dE = L \, dS \, \cos \beta \quad (3.38)$$

Caso a projeção ortogonal de S no plano horizontal seja Q:

$$Q = dS \, \cos \beta \quad (3.39)$$

Substituindo tem-se que:

$$dE = L dQ \quad (3.40)$$

e integrando a expressão:

$$E = \int L dQ \quad (3.41)$$

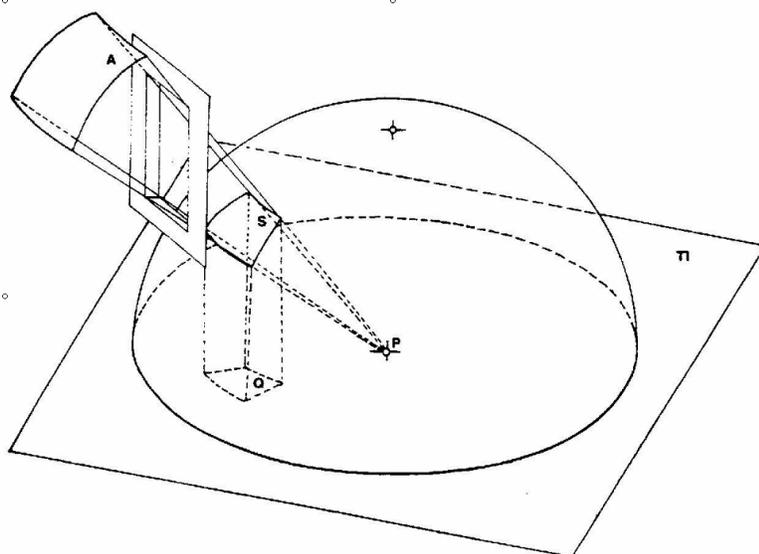


Figura 3.27 – Princípio do ângulo Sólido Projetado Fonte: ABNT 2005

Para se determinar a distribuição de luminâncias do céu, a abóbada celeste deve ser subdividida em zonas, assumindo-se um valor de luminância único para cada zona. A Figura 3.28 apresenta uma subdivisão com 220 zonas com variações angulares de altura e azimute múltiplas de 10º; esta é a subdivisão empregada no método gráfico apresentado no projeto 02:135.02-004. Observa-se que quanto maior a subdivisão maior a precisão atingida ABNT 2005.

Para determinação da luminância existem vários modelos que variam em função das características de nebulosidade insolação, turbidez e poluição, que são determinantes para definir o tipo de céu e as luminâncias da abobada.

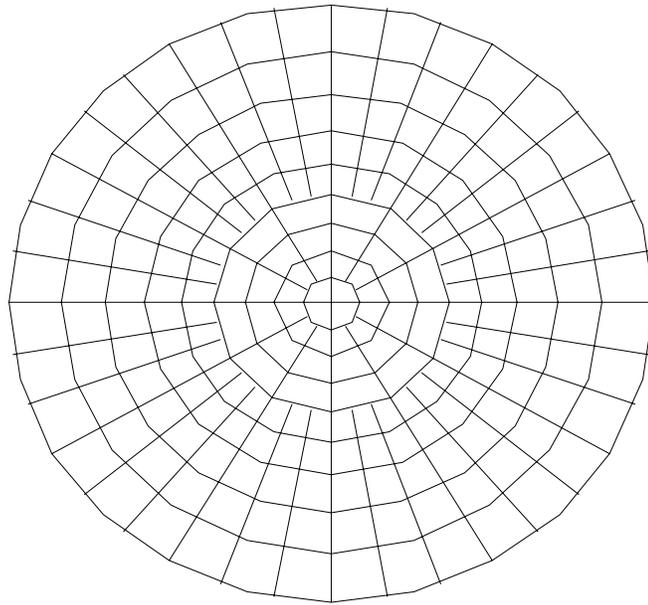


Figura 3.28 - Subdivisão da abóbada celeste em 220 zonas (projeção estereográfica).
Fonte: ABNT 2005

Para a adequada compreensão das expressões da luminância do céu, é necessário conhecer os ângulos de posição do sol e de posição do ponto P (centro da zona), definidos pelos ângulos de altura da zona (γ_p) e diferença azimutal ($\alpha_s - \alpha_p$) entre o sol e o ponto P, conforme mostrado na Figura 3.29.

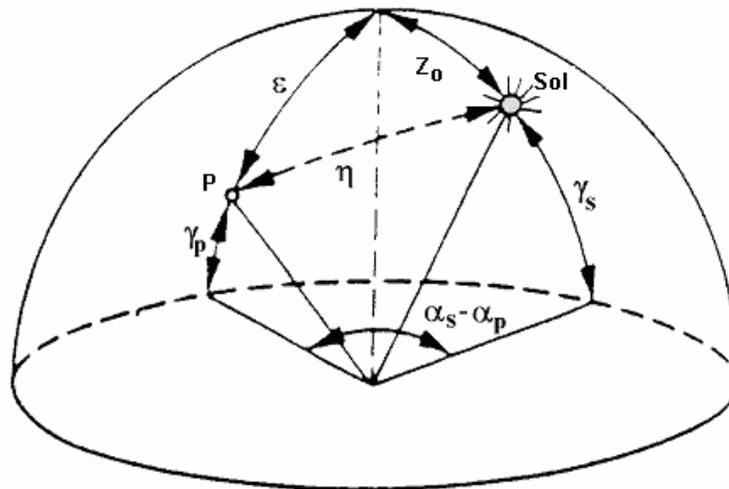


Figura 3.29 - Coordenadas do sol e de um ponto P no céu.
Fonte: ABNT 2005

$$E = \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{\gamma=0}^{\frac{\pi}{2}} L(\alpha, \gamma) \cos \gamma \cos \beta \, d\gamma \, d\alpha \quad (3.42)$$

Onde:

$L(\alpha, \gamma)$ é a distribuição de luminâncias em função do azimute α e da altura γ da zona P do céu e β é o ângulo entre as normais da zona do céu e da superfície iluminada (de incidência), em graus.

A equação 3.23 é válida quando tratamos de todos os pontos presentes dentro de uma determinada área, no entanto como assumimos a luminância para cada subdivisão a iluminância é dada por:

$$E = \sum_{i=1}^n \omega_i L(\alpha_i, \gamma_i) \cos \gamma_i \cos \beta_i \quad (3.43)$$

Onde n é o número de subdivisões da abobada celeste e ω_i é o ângulo sólido através do qual é vista a zona i , esterradiano (sr).

3.3.9 Análise dos Dados

Para analisar os dados das iluminância num dado ambiente sob condições de céu encoberto é possível calcular o fator pontual de luz diurna, quantidade que pode ser definida para cada ponto do espaço interno considerado. Se este cálculo for executado para um número considerável de pontos é possível representar a variação o fator de luz diurna com uma série de linhas que unem ponto a ponto os valores iguais do parâmetro (Um outro modo de representação de fácil compreensão é a sobreposição do diagrama

a secção transversal do ambiente onde é indicado o fator de luz diurna em relação a profundidade do ambiente. (Figura 3.30). No entanto como para céu claro este método não é eficiente, pois a distribuição da radiância varia continuamente em função da posição do sol (assim varia também a distribuição da iluminância produzida), a medição de valores absolutos, para cada ponto, em um específico momento do ano e para uma dada orientação, resulta superior para análises quantitativas, (TORRICELLI, SALA e SECCHI, 1995).

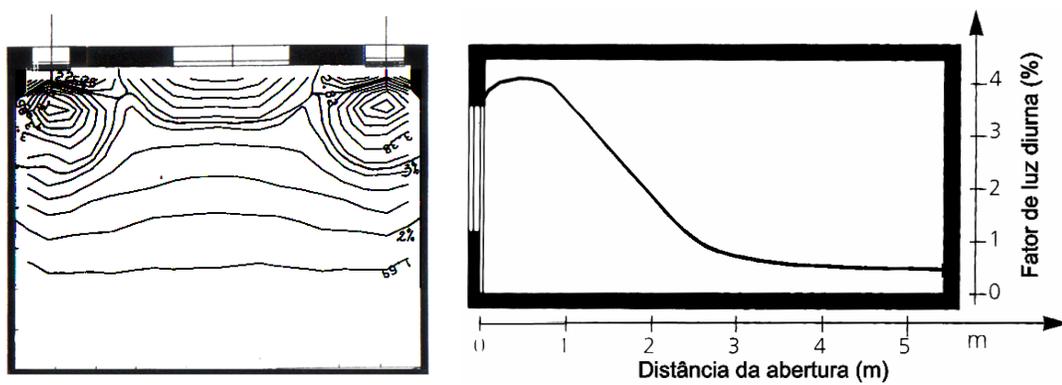


Figura 3.30 – Gráfico de Isoluminancias. Fonte: TORRICELLI, SALA e SECCHI, 1995

3.4 Função das Aberturas Laterais

O modo mais comum de se introduzir a luz natural dentro dos espaços é através das aberturas verticais normalmente posicionadas nas fachadas, de modo que a luz penetre lateralmente no ambiente e de cima para baixo. Portanto, a posição, a forma e o tamanho da abertura em uma sala tem influência determinante na distribuição da luz e nos níveis de iluminação natural dentro do ambiente. O maior problema neste tipo de abertura é que os níveis de iluminação decaem rapidamente, com o inverso do quadrado da distância, (a medida em que o observador se afasta da abertura. Isto se verifica porque a intensidade pode ser pensada como sendo espalhada uniformemente, num sentido para fora, sobre a superfície de uma esfera. Para distâncias maiores, a

esfera é maior, assim a mesma quantidade de luz é espalhada sobre uma área maior. (Figura 3.31) (BAKER e STEEMERS, 2002).

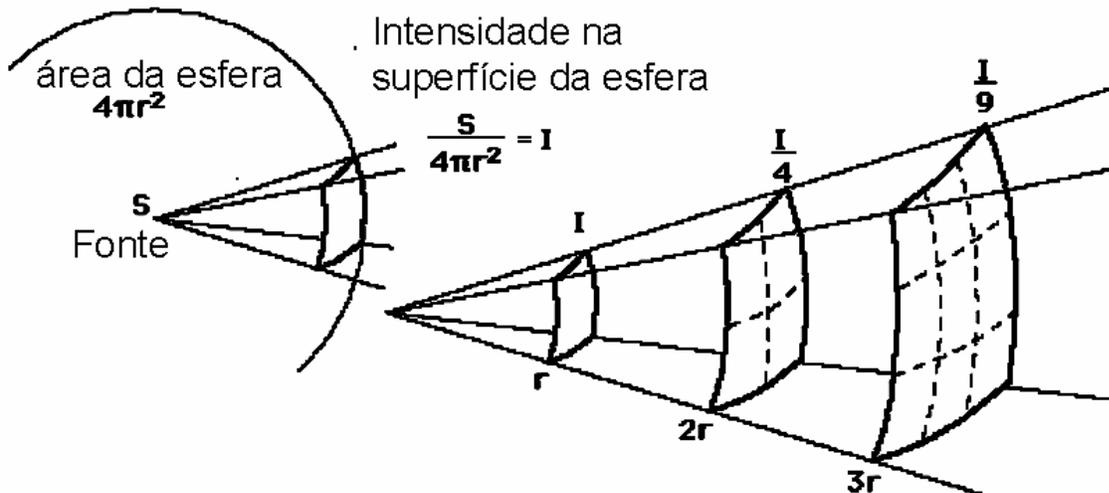


Figura 3.31 Lei do inverso do quadrado das distâncias

Estudos mostram o decaimento da iluminação num ambiente para três aberturas de mesmo tamanho, situadas na parte superior, na parte intermediária e na parte inferior da parede.

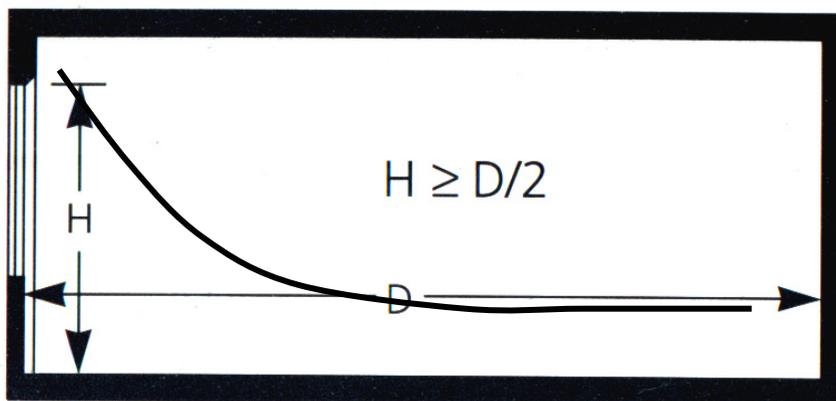


Figura 3.32 – Queda da iluminância com a distância da janela. Fonte: BAKER e STEEMERS, 2002

A definição de abertura que incorpora três funções contemporaneamente: responsável por iluminar, ventilar e permitir a vista para o exterior, com frequência apresenta problemas pois ou aquece o ambiente em excesso, devido aos extensos

panos de vidro; ou escurece-o excessivamente, em função das proteções contra a radiação solar direta. Assim, os DIN pretendem resolver este tipo de problema, muitas vezes separando estas três funções em porções diferentes da área da abertura. Outra vantagem deste tipo de sistema é que os DIN podem adaptar o desempenho da abertura de acordo com as condições do céu e transmitindo a luz para o interior, redirecionando os raios de forma adequada, ou refletindo a luz indesejada de volta para o exterior, isto, em função do ângulo de incidência dos raios solares. Por este motivo é importante que o sistema seja bem adaptado as condições luminosas da abobada onde está sendo utilizado. Além disto é importante saber se os princípios físicos pelos quais o dispositivo interage com a luz estão adequados á latitude local

As estratégias para melhorar a distribuição da luz solar num ambiente, utilizando os DIN, podem ser projetadas para trabalhar com a componente refletida interna, tanto para céus claros como para céus cobertos. Para climas ensolarados, a característica mais importante destes dispositivos é como eles trabalham com a componente solar direta. Para climas tropicais, em função da grande quantidade de radiação que normalmente incide nas aberturas, tornaram-se bem aceitos na arquitetura, sistemas fixos como brises com objetivo de bloquear a luz solar e reduzir a carga térmica da edificação mantendo níveis adequados de luminâncias no campo de visão. No entanto para países tropicais esta forma de “pensar” a luz, acabou criando edifícios com ambientes internos na penumbra, principalmente aqueles mais afastados das aberturas, assim um contraste dado pela abundancia de luz no ambiente externo e uma falta de iluminação natural no interno, que acaba por ser suprida pela luz artificial, (EDMONDS e GREENUP, 2002).

3.5 Dispositivos de Redirecionamento

O conceito de manipulação da luz sempre esteve fortemente ligado a arquitetura. Nos templos gregos utilizavam-se placas de mármore ou alabastro tão finas que o material tornava-se translúcido. No período Gótico paredes inteiras eram dissolvidas graças a utilização dos vitrais, conferindo um sentido místico ao espaço. A luz tem sido moldada desde a antiguidade, mesmo nas culturas orientais mediante uso das muquarnas e muxarabis, proteções entalhadas em pedra ou madeira, dependendo da região (STIERLIN, 1997).

Na arquitetura japonesa os painéis compostos de papel e madeira, possibilitam o acesso direto à natureza, se abertos, mas se fechados o papel torna-se translúcido ao ser atingido pela luz. Este conceito de espaço fluido parece ter influenciado consideravelmente a arquitetura a partir do séc. XX. Um exemplo disto são os projetos de Frank Lloyd Wright, com seus filtros, da luz para a escuridão e os projetos de Mies Van der Rohe que maximizando o conceito do fluxo, aniquilou a diferença entre interior e exterior, mediante a utilização do vidro (LADISLAO, 1995).

Assim, como tendência da desmaterialização do invólucro da edificação, a arquitetura, definida por Le Corbusier como “o jogo sábio, correto e magnífico das formas sob a luz” se transforma - na arquitetura contemporânea - no jogo da luz materializada, como componente do corpo desmaterializado da edificação. O tema da arquitetura na fachada deixa de ser a relação entre espaços abertos e fechados e torna-se a habilidade da estrutura de refletir e transmitir luz, ao mesmo tempo em que as estruturas dialogam com seu entorno. Com esta nova conotação que se une a tendência de minimizar os gastos energéticos da edificação, impulsionou-se o desenvolvimento de dispositivos inovadores que ao redirecionar a luz natural otimizam

seu uso na edificação, tornando-a mais econômica e ecologicamente correta. O intuito destes sistemas passa a ser a proteção da fachada do edifício contra ofuscamento e aquecimento e melhorar a distribuição iluminação natural presente nos espaços internos, influenciando na direção e na intensidade da luz incidente, com uma preocupação para a transparência do invólucro.

Deste modo, para controlar e modificar a quantidade e a qualidade da iluminação natural no interior de um edifício, diversos sistemas inovativos foram desenvolvidos, alguns fruto do progresso da tecnologia dos materiais, enquanto outros são resultantes da retomada de praticas construtivas mais antigas, aliadas e reestruturadas segundo os novos métodos e materiais, recentemente criados ou evoluídos (KALTENBACH, 2004).

A característica da superfície do material utilizado é o que determina o tipo de reflexão ou transmitância que ocorre. Em outras palavras, o que define como a luz incidente é direcionada e dispersa, é se o material é transparente, translúcido ou reflexivo. Se a luz for transmitida através de um painel, de forma semelhante, ela pode ser direcionada, ou por painéis de vidro ou por vidros estruturas internas desenvolvidas especialmente com esta função. O resultado normalmente é uma combinação da reflexão e da transmissão, tornando o efeito da luz direta, redirecionada, e da luz difusa, melhor transmitida. Normalmente o efeito conjunto destes fatores torna o sistema de redirecionamento mais eficiente.

As primeiras patentes, sobre dispositivos de iluminação natural podem ser encontradas no banco de patentes dos Estados Unidos entre 1890 e 1910, e no da Alemanha em 1930, sobre formas de se defletir a luz com espelhos (BARTENBACH, 1985; NEBHUTH, 1989)

3.5.1 Brises

O sistema convencional de brises fixos (sistema passivo) visa a exclusão da luz solar direta para que o ambiente não atinja temperaturas internas muito elevadas. São compostos de perfis, horizontais, verticais, inclinados ou múltiplos, que podem inclusive apresentar geometrias sofisticadas para adequar o funcionamento do perfil as eventuais necessidades de bloqueio dos feixes solares (Figura 3.33). Podem ser confeccionadas em aço galvanizado, anodizado ou pintado de alumínio, plástico (PVC), madeira, e concreto, dentre outros. Podem ser posicionados na parte exterior ou interior da abertura lateral ou zenital, ou entre dois panos de vidro.

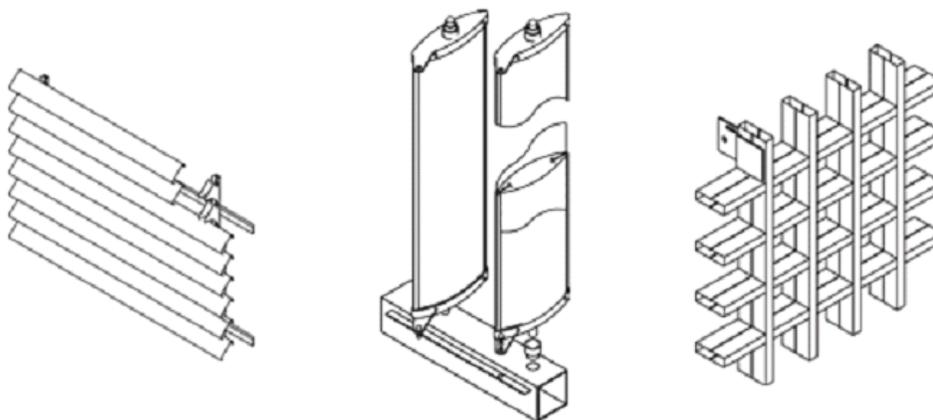


Figura 3.33 - Tipos convencionais de brises. Fonte: <http://www.luxalon.com.br/>

O formato das proteções dependerá da insolação recebida pela fachada, onde localizam-se as aberturas e da geometria destas. Para isso, instrumentos como a carta solar, que indica o percurso do sol e o transferidor auxiliam na determinação dos ângulos necessários para sombrear uma determinada região em determinados horários. Todos os procedimentos para cálculo das máscaras estão detalhados em FROTA (2004).

A desvantagem de projetar um sistema fixo convencional desta forma é que o mesmo é utilizado para evitar toda a luz vinda das possíveis trajetórias do sol. Isso resulta num bloqueador solar que limita o fluxo luminoso tornando, na maioria das circunstâncias, o ambiente escuro, principalmente nas partes mais distantes das janelas, tornando necessária a utilização de luz artificial durante o dia.

Dependendo da geometria e da angulação do perfil este tipo de sistema pode obstruir a vista externa. Enquanto os brises verticais permitem a vista da abobada celeste, os horizontais podem criar interferências na vista do exterior devido a escala reduzida dos perfis, que podem distorcer ou criar imagens virtuais na abertura. Sob condições de céu claro os brises podem produzir ao longo do perfil linhas de luz muito claras que podem causar ofuscamento. Rotacionando os brises para o interior é possível aumentar os níveis de iluminação, sendo necessários extremos cuidados para evitar que a luz, refletida pelas aletas, possa causar ofuscamento. De forma contrária, rotacionar os brises para o exterior exclui a luz solar direta, reduzindo o ofuscamento e diminuindo os níveis de iluminação no interior.

Para países tropicais esta forma de “pensar” a luz, acabou criando edifícios com ambientes internos na penumbra, principalmente aqueles mais afastados das aberturas, causando no ambiente um forte contraste, dado pela abundância de luz no exterior e uma falta de iluminação natural no interior, que acaba por ser suprida com o uso da luz artificial no período diurno (EDMONDS e GEENUP 2002). Atualmente, graças a incontáveis avanços na tecnologia os brises são propostos sob novas perspectivas, e mediante a modificação do material empregado e da geometria das aletas, os sistemas passaram também a redirecionar a luz com maior eficiência. Houve também o surgimento dos sistemas moveis (ativos), assim denominados por possuir um sistema computacional que acompanha a trajetória do sol movimentando os perfis de acordo com a angulação solar, como será mostrado a seguir.

3.5.1.1 Brises Fixos

O objetivo de um brise fixo é redirecionar a luz solar incidente, direta e/ou difusa, para o teto, com ângulos tais para atingir o fundo das salas, de forma a otimizar a distribuição de luz natural dentro do ambiente, sendo que podem também funcionar para exclusão de certas faixas angulares dos feixes, dependendo das necessidades climáticas locais. Em função disto a geometria dos perfis é elaborada; a superfície superior tem um tratamento especular, curvatura côncava, e pode receber perfurações. Os modelos mais recentes são posicionados entre vidros, para garantir a manutenção do sistema e os perfis tem dimensões entre 10 e 12mm de espessura para garantir a vista para exterior. (WILLFRIED, 2005)

Um pouco do desenvolvimento cronológico dos avanços que foram alcançados no desenho da geometria dos perfis que compõem os brises, encontram-se na Figura 3.34. No primeiro esboço está representada uma seção transversal de um sistema convencional. Os feixes incidentes, em vermelho mostram o desempenho do dispositivo, que permite a passagem de alguns feixes em função da angulação solar, da angulação das abas das lamelas e distância entre elas. A passagem destes feixes pode causar ofuscamento caso atinjam diretamente o plano de trabalho, ou caso atinjam diretamente o piso, em função do contraste de intensidade de luz que criam dentro do ambiente, assim olhando diretamente para a mancha de luz no piso ou ao receber feixes paralelos a linha de visão o observador pode ficar ofuscado.

Na Figura 3.34b, a utilização da parte inferior dos perfis (A_i), que tiveram um tratamento refletivo, aumenta o desempenho do dispositivo pois permite que uma maior quantidade de angulações de feixes sejam redirecionadas para cima, eliminando o problema da passagem direta dos feixes. Note que a simetria do perfil também foi alterada. O lado interno do perfil sofreu um rotação em função do eixo S. Esta mudança além de favorecer a difusão dos feixes, evita que a superfície refletiva inferior, dos perfis, ofusque os usuários. Por fim como será visto na próxima seção o dispositivo C, de seção triangular, que além de aumentar a distribuição possui uma faixa de aceitação

de feixes incidentes muito maior, principalmente graças a sua assimetria (WILLFRIED, 2005).

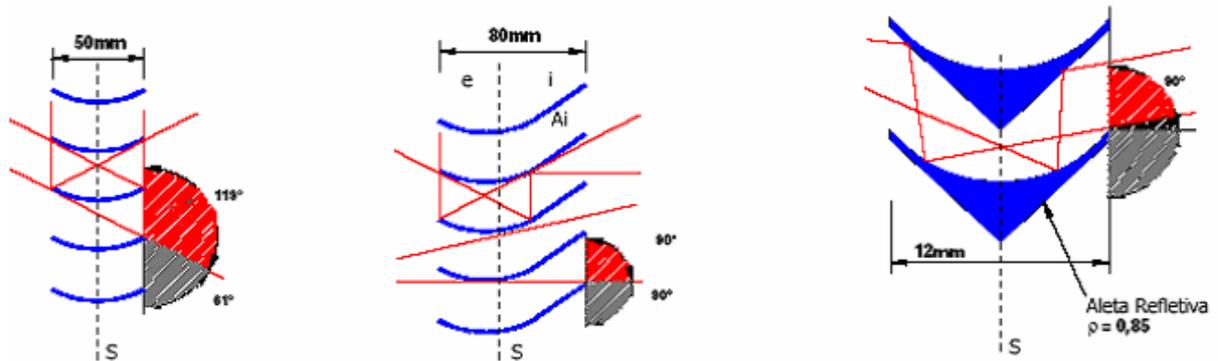


Figura 3.34 a) brise convencional (b)- Primeiras inovações (c) sistema triangular.
Fonte: WILLFRIED, 2005

3.5.1.2 Novos Perfis de Brises

Este sistema compreende uma série de perfis alinhados, fixos, cuja geometria triangular se compõe por um refletor superior côncavo, para permitir que a luz seja coletada e redirecionada para o teto e de dois refletores planos laterais que funcionam como fechamento do sistema. A luz que vem de baixas angulações é rejeitada pelo primeiro refletor plano, externo, sendo que ela é direcionada para baixo, para o refletor côncavo. A luz que incide na superfície côncava, que representa a maioria das angulações, será defletida para o interior com uma angulação tal que a luz atingirá o fundo do ambiente. O segundo refletor (parte inferior do brise) é plano, e servirá para auxiliar nesta distribuição, na medida em que refletirá os raios refletidos pelo perfil côncavo, Figura 3.35a.

Na Figura 3.35b é possível observar o comportamento de vários feixes em função da angulação com a qual atingem o perfil triangular (3) entre vidros (1 e 2). Para feixes incidentes paralelos ao vidro onde o ângulo de incidência é igual 0° (I_1) os ângulos serão defletidos com uma inclinação de 90° . Aqueles feixes que incidirem no refletor convexo serão redirecionados para o teto, enquanto aqueles feixes que

possuírem a angulação complementar (α) àquela dos perfis (β) incidirão primeiramente no refletor côncavo (R_{ci}) para em seguida atingirem o refletor plano interno (R_{pi}) e serem refletidos com uma angulação de 90° . Uma forma semelhante e com diferenças quase imperceptíveis desta forma para o observador a olho nu são capazes de proporcionar um controle mais efetivo e mais consciente da iluminação natural e da faixa angular solar que será aceita e redirecionada pelo dispositivo, de acordo com as diferenças de cada sitio em função da latitude.

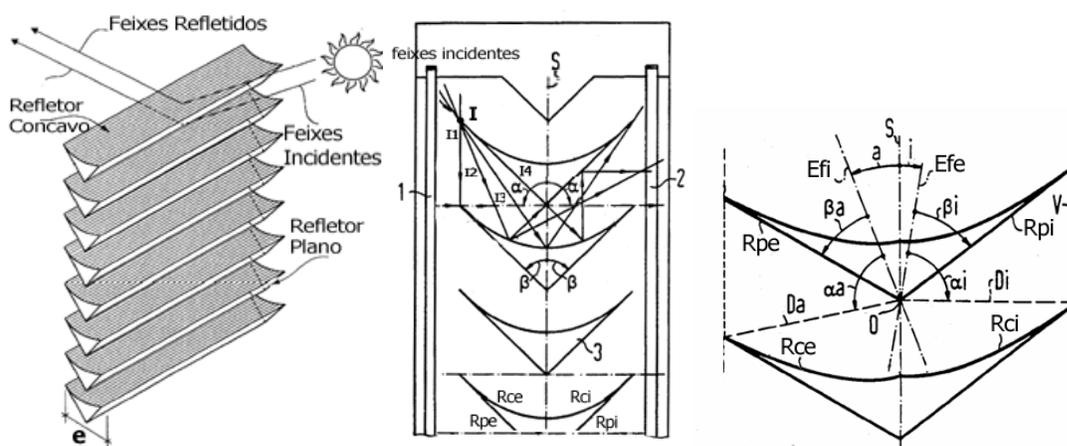


Figura 3.35 - Brise com perfil triangular (a) Perfis sobrepostos (b) Seção dos Perfis (c) Perfis Rotacionados em função do eixo de simetria (S). Fonte: BARTENBACH, 1987. DIGERT, 2001.

Na Figura 3.35c é mostrado este dispositivo que em contraste com o da Figura 3.34, não é simétrico a partir do eixo S. Neste, o eixo focal (E_{fi}) do refletor côncavo externo foi rotacionado em relação ao eixo de simetria (S) de um ângulo (α). A outra metade do perfil, o refletor côncavo interno, também foi rotacionado de um ângulo (i). É interessante notar que ao aumentar ou diminuir estes ângulos o efeito do sistema será diferente. Ao aumentar o ângulo (i) os feixes estarão sendo direcionados mais para o teto ou mais para a parede do fundo, por este motivo é preciso aumentar esta angulação com extremo cuidado para que não se verifique o ofuscamento. Ao aumentar o ângulo (α) a faixa angular solar aceita pelo dispositivo também será aumentada. Outra vantagem deste dispositivo é que mesmo os feixes vindos de baixas altitudes solares (D_a) são refletidos para o interior com uma angulação favorável, graças as superfícies planas internas e externas que tem um tratamento refletivo, o que possibilita uma

distribuição mais uniforme da iluminação natural durante períodos maiores durante o dia (BARTENBACH, 1987). É importante entender que a desvantagem da maioria destes equipamentos tipo venezianas, com lamelas altamente refletivas, principalmente aqueles localizados entre dois panos de vidro, é que a radiação solar retro-refletida na parte superior dos perfis é direcionada para um ângulo horizontal, paralelo à linha de visão para o interior, ofuscando o observador.

Particularmente em casos de vidros especiais duplos para isolamento térmico é vivenciado um indesejado efeito de ofuscamento gerado por este reflexo e que pode ser resolvido somente pela rotação dos eixos dos perfis que devem estar tão próximos de forma que o vidro quase não seja mais visualizado pelo observador, o que obstrui quase totalmente a vista para o exterior. Além disto, como desvantagem para o espaço exterior, a luz solar, que atinge os brises, é refletida pelas superfícies reflexivas. para fora , podendo ser direcionada para ruas e praças, gerado um extremo ofuscamento.

A Figura 3.36 mostra de maneira esquemática a trajetória dos feixes que incidem em brises com a superfície inferior dos perfis revestida por material reflexivo. Para feixes incidentes vindos de elevadas altitudes (A), enquanto uma porção é refletida para o exterior, a outra atinge o observador, o mesmo acontece para feixes vindos de altitudes mais baixas (B), que ao atingir um perfil, são refletidos para o perfil superior e em seguida direcionados para o plano de trabalho, assim a retro-reflexão (refletir de volta a luz incidente) nos dois casos causa ofuscamento.

Com o intuito de resolver este tipo de problema surge um tipo de brise fixo, de geometria elaborada criada pelo Dr. Eng. Helmut Köster (KÖSTER, 1997) e comercializadas inicialmente pela empresa Okalux e que visam controlar o ofuscamento, minimizando a quantidade de reflexões que devem ser de um ou duas vezes no máximo, na parte superior dos perfis, de modo que a retro-reflexão não seja refletida para o espaço interno. Principalmente para vidros duplos, normalmente os isolantes, ou com propriedades de tratamento térmico, cria-se um indesejado efeito de ofuscamento em função da porção de luz solar que depois de varias reflexões entre os

perfis se reflete nos panos de vidro e para os perfis novamente, chegando dentro do ambiente, concentrada com um ângulo plano e em direção ao olho do observador.

3.5.1.3 Primeiros Desenvolvimentos

Na Figura 3.36 é mostrada, mediante a representação do comportamento dos feixes, a causa do ofuscamento que se verifica normalmente nos brises convencionais localizados atrás de um sistema de envidraçamento com dois panos de vidro (1 e 2). Para facilitar a compreensão da análise da trajetória dos raios, (representados pelas áreas A, B, C, D, E, E1, F, F1, G) os mesmos foram separados e desenhados cada um em um perfil diferente (3 a 7), mas é necessário notar que todos os efeitos estão, na realidade, ocorrendo para o mesmo perfil, de acordo com a seqüência 3, 4, 5, 6, 7 da superfície inferior para a superior. Inicialmente os feixes incidentes (A) atingem a face serrilhada do perfil (3), sendo refletidos (B) para a superfície inferior do perfil (4). Ao atingir esta superfície (que agora é representada pela face superior do perfil 4) a luz será retro-refletida (porções C e D) (KÖSTER, 2002).

Uma parte da radiação (C) será dirigida para o exterior com apenas uma reflexão, enquanto uma outra porção (D) sofrerá varias reflexões entre os perfis 4 e 5 (B) até também ser refletida para o exterior. No entanto uma fração desta luz (fração de C e D) não irá para o exterior, será refletida pelos vidros (1 e 2). A porção refletida pelo vidro (1) é mostrada pelos raios (E) enquanto a porção refletida pelo vidro (2) é representada por (F). A reflexão da retro-reflexão pode ser vista pelos raios E1 e F1 e se verifica devido as reflexões que ocorrem na parte inferior dos perfis 6 e 7, são estes feixes que causam ofuscamento para um observador que esteja no interior do ambiente. (KÖSTER, 2002). A retro-reflexão surge então para evitar este tipo de feixe (E1 e F1) que sai do perfil do brise com uma direção paralela á linha de visão do observador.

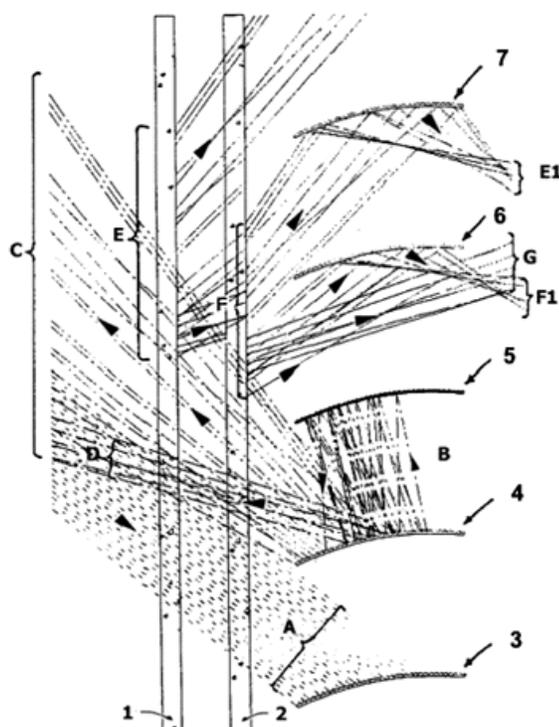


Figura 3.36 - Reflexões nos panos de vidro duplos, causadas pelos brises são fonte de ofuscamento. Fonte: -KÖSTER, 2001

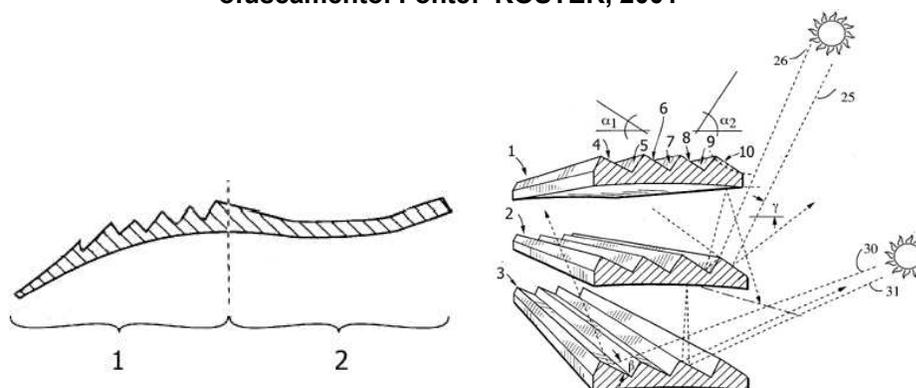


Figura 3.37 – Seção transversal de uma lamela. Comportamento dos feixes incidentes. Fonte: KÖSTER, 2002

As primeiras abordagens para solução deste tipo de problema aparecem na Figura 3.37 aparece um corte de um dos primeiros perfis desenhado segundo os princípios de construção aplicados pelo Dr. Eng. Helmut Köster. Esta veneziana difere das outras por refletir a luz por uma ou no máximo duas reflexões entre os perfis, graças a superfície dentada côncava (1). O perfil é composto de varias partes diferentes cada uma com um desenho próprio para desempenhar uma função especifica. Existem vários tipos de perfis, (KÖSTER, 2002) de maneira geral a vantagem, destes tipos de

formatos, reside no controle do comportamento dos feixes incidentes. Enquanto a primeira parte dentada do perfil (1) exclui a radiação solar vinda de elevadas altitudes, o formato da segunda superfície (2), composta por um material altamente refletivo, redireciona a luz para o teto, difundindo-a para o fundo do espaço.

A Figura 3.37 mostra o funcionamento da primeira porção do dispositivo. Os perfis 1, 2 e 3 com suas superfícies dentadas são compostos pelas faces de 4 a 10 (por serem voltadas para o sol faceiam o exterior, defletindo a radiação solar direta) que formam com a normal um ângulo α_1 e pelas faces sombreadas (faces voltadas para o interior) 5, 7 e 9, que formam com a normal um ângulo α_2 . As faces 4, 6, 8 e 10 podem ser curvas para que os raios sejam refletidos de forma que não se crie uma concentração de luz, assim não ocorrerá ofuscamento.

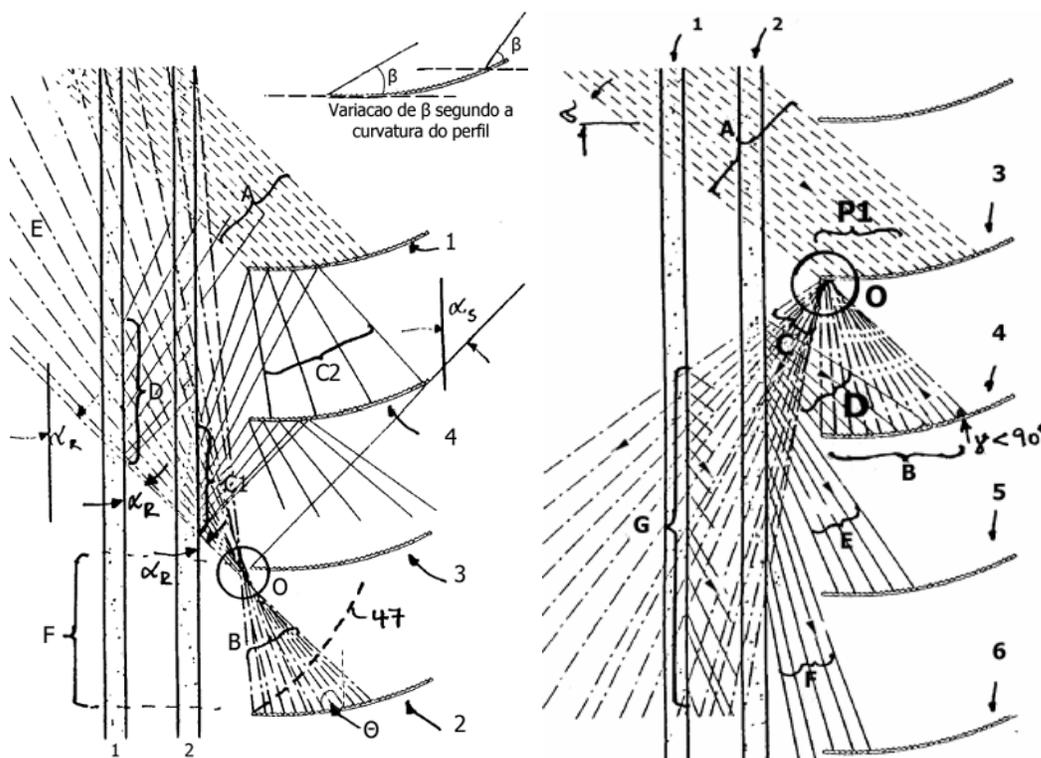


Figura 3.38 - Comportamento do perfil côncavo para alturas solares maiores (a) e menores (b).
Fonte: KÖSTER, 2001

Na Figura 3.38a o detalhe mostra o ângulo β - ângulo de inclinação das superfícies dentadas, voltadas para o exterior, com a normal - aumentando conforme a curvatura do perfil. A radiação (A) que incide com um ângulo β é retro-refletida com

uma única reflexão (B) em direção ao exterior de modo que se forme uma área de concentração. Isto se verifica porque os ângulos de incidência β do perfil aumentam segundo a parábola 47, cujo foco deve ser no ponto (O). Ao contrário do dispositivo inicial (Figura 3.36) aonde a luz é retro-refletida na porção inferior dos brises 6 e 7, atingindo o campo visual do observador, com o Köster louveres (Figura 3.38) a luz é guiada a porção inferior dos perfis 1 e 4 evitando o ofuscamento. Desta forma garantindo a condição $\alpha_R < \alpha_S$ não haverá ofuscamento direto por reflexão vinda os panos de vidro.

Pra ângulos de incidência mais baixos γ (Figura 3.38b) são necessários ajustes no perfil, colocando-os numa posição mais íngreme de forma que a área de concentração se mova para lado inferior do perfil de cima. Na figura 14 os feixes da radiação solar incidente (A) são refletidos por uma única reflexão pela parte superior do perfil (4) para a parte inferior do perfil (3). Os perfis devem possuir um ângulo tal que a área de concentração se localize no ponto (O) Se os ângulos de incidência do perfil 4 incidirem com um ângulo(γ) menor 90° a luz será guiada como o pacote de feixes C, sendo em seguida parcialmente refletida, como mostrado pelos feixes D, E e F no vidro 2 e G no vidro1. Desta forma as reflexões nos vidros 1 e 2 não causam ofuscamento, desde que as reflexões sejam refletidas para o interior pela parte inferior dos brises.

3.5.2 Okasolar

Maiores desenvolvimentos na área de sistemas de luz natural são os brises altamente refletivos, comercializados inicialmente pela empresa OKALUX conhecidos como OKASOLAR. Embora desenhados para redirecionar a luz, conseguem manter a transparência da fachada, tanto se utilizados em aberturas laterais como se em aberturas zenitais (Figura 3.39).



Figura 3.39 - Vista externa e interna do edifício sede da Empresa Schrodth, em Iserlohn, Alemanha, do arquiteto Martin Schrodth. Fonte: OKALUX, 2002

Hermeticamente selados entre dois panos de vidro, a unidade incorpora brises manufaturados de laminas de aço, banhados de alumínio reflexivo (que refletem todos os comprimentos de ondas no espectro visível) cuja geometria é especialmente projetada para evitar a entrada da luz solar direta nas proximidades da abertura, enquanto os próprios feixes, juntamente coma radiação difusa, são transportados para o teto em direção o fundo dos ambientes.

A seção das lamelas apresenta-se cocava e convexa de forma que a luz incidente é refletida e difundida pelos perfis, enquanto a reflexão que gera raios paralelos é minimizada. Portanto o direcionamento se dá de forma que os feixes não causem ofuscamento por feixes que incidam paralelos ao olho evitando ao mesmo tempo excessivo contraste no ambiente. Pelo fato dos painéis serem selados, as lamelas altamente refletivas são preservadas do desgaste e poeira, garantindo portanto a eficiência do dispositivo, independentemente da manutenção. Na Figura 3.40 é possível visualizar a diferença entre o redirecionamento dos feixes num brise convencional, colocado numa posição horizontal, causando ofuscamento pela incidência na parte inferior das aletas, o mesmo perfil racionado para rejeitar a radiação de ângulos solares mais elevados e o redirecionamento através do OKASOLAR.

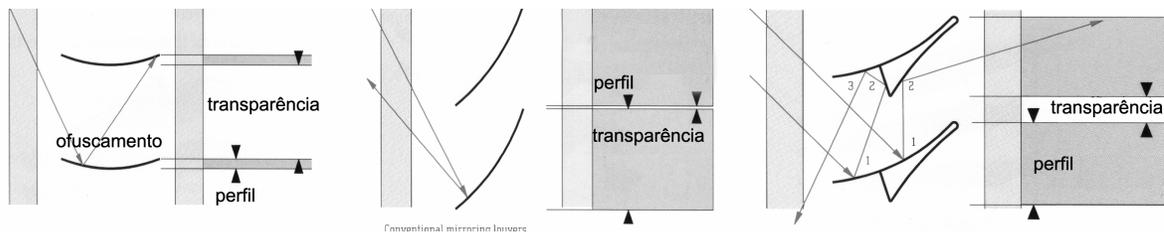


Figura 3.40 - (a) Brises convencionais geram ofuscamento se posicionados horizontalmente. (b) rotacionados para proteger da radiação solar do verão não permitem vista para o exterior. (c) o novo perfil Okasolar permite uma maior transparência, garantindo uma proteção solar, permitindo que os brises permaneçam abertos mesmo no verão. Fonte: KÖSTER, 2004

O sistema tem que ser adaptado para diferentes orientações e inclinações da fachada ou telhado no qual será instalado, assim a transparência depende do ângulo de visão e da distância do equipamento para os usuários que se encontrem no interior do ambiente, já para o exterior o equipamento é menos perceptível de qualquer forma a vista é preservada em ambas as direções. Na Figura 3.42 é possível visualizar o redirecionamento da luz para ângulos de incidência de 15, 25, 30 e 60 graus.

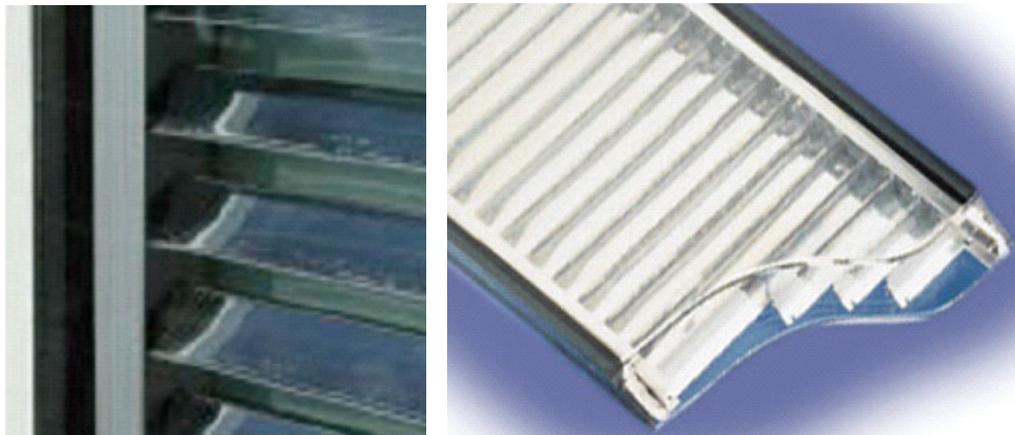


Figura 3.41 - Dispositivo OKASOLAR, da empresa OKALUX. Fonte: www.okalux.de

A empresa fornece quatro tipos de perfis diferentes para as lamelas, dois para fachadas: o OKASOLAR RETRO, o OKASOLAR W; e dois para aberturas zenitais: o OKASOLAR RETROFLEX e o OKASOLAR S. Ambos os sistemas são passivos, mas se tornados móveis (ativos) a empresa passa a denominar os produtos de OKAFLEX, em função do sistema de cordas que permite a movimentação das lamelas entre vidros, mediante o uso de motores elétricos. Alguns exemplos de edifícios onde esta técnica foi aplicada: o Banco de Bruxelles Lambert SA, em Geneva de Mario Botta; Mrs Tschumi

o Kunstmuseum, em Wolfsurg de Schweger e Partner. A aparência dos painéis depende do ângulo de visão e da distância do equipamento se considerarmos a vista interna, já no exterior o equipamento é menos perceptível. A vista é preservada em ambas as direções (LAAR, 2002).

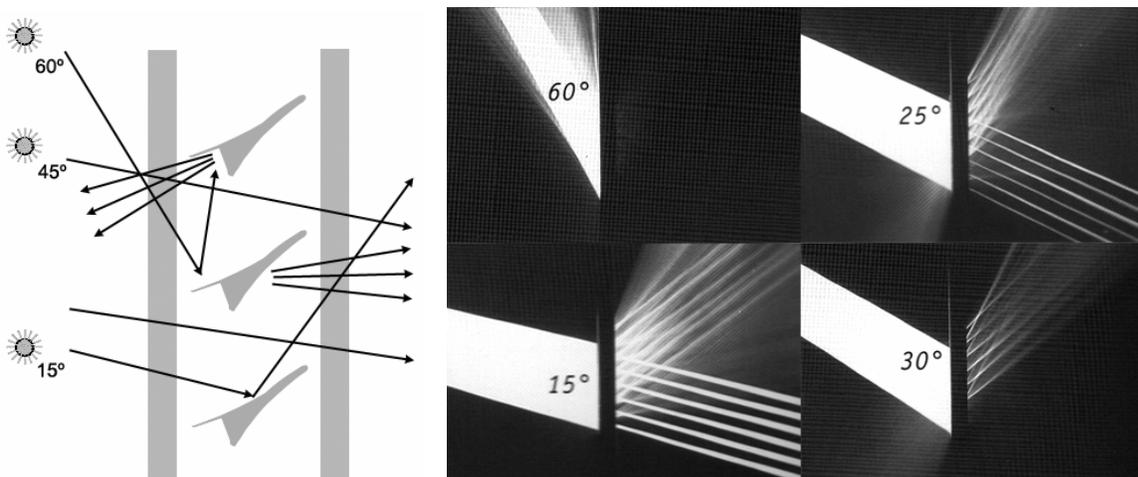


Figura 3.42 - Perfil do Okasolar, (a) desenho esquemático do redirecionamento da radiação solar direta. Fonte: OKALUX, 2002.

3.5.3 *Koster Louvres*

Brises brancos convencionais redirecionam a luz para o interior dos ambientes, no entanto para bloquear a radiação solar excessiva, vinda de maiores angulações solares, durante o verão, é necessário, em função da orientação da fachada, rotacioná-los, de forma que a visão através dos mesmos fica impedida (Figura 3.43). Estas observações levaram ao desenvolvimento de brises cujos perfis se dividem em duas porções, a primeira, exposta aos raios solares é capaz de retro-refletir a radiação solar no verão, e a segunda porção age como uma prateleira de luz melhorando a distribuição de luz defletida (KÖSTER, 2001, 2002).

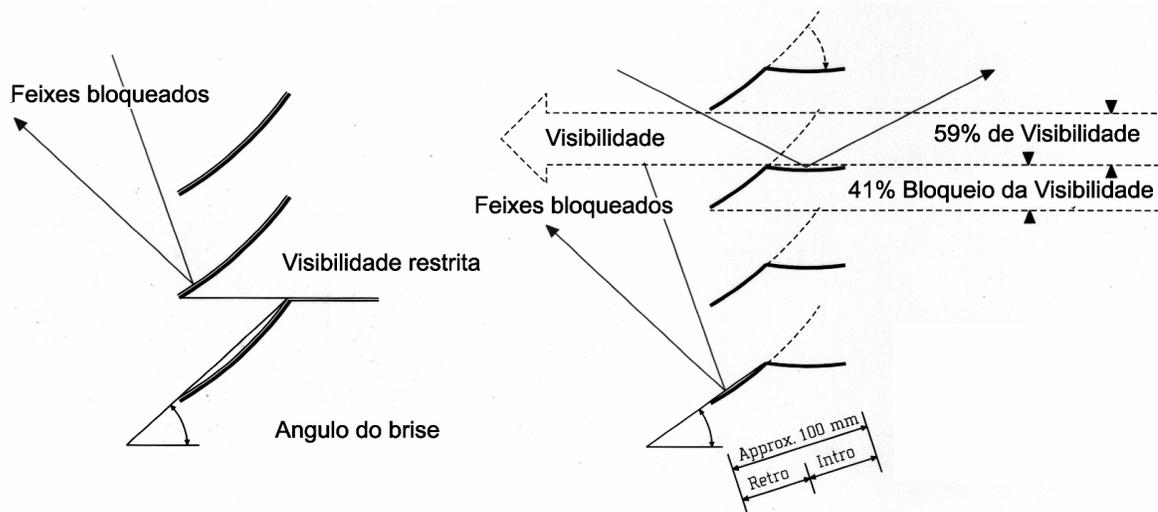


Figura 3.43 - Brises convencionais bloqueio da visão para garantir a proteção solar. Rotacionando obtêm-se maior proteção de maiores angulações, garantindo visibilidade. Fonte: KÖSTER, 2004

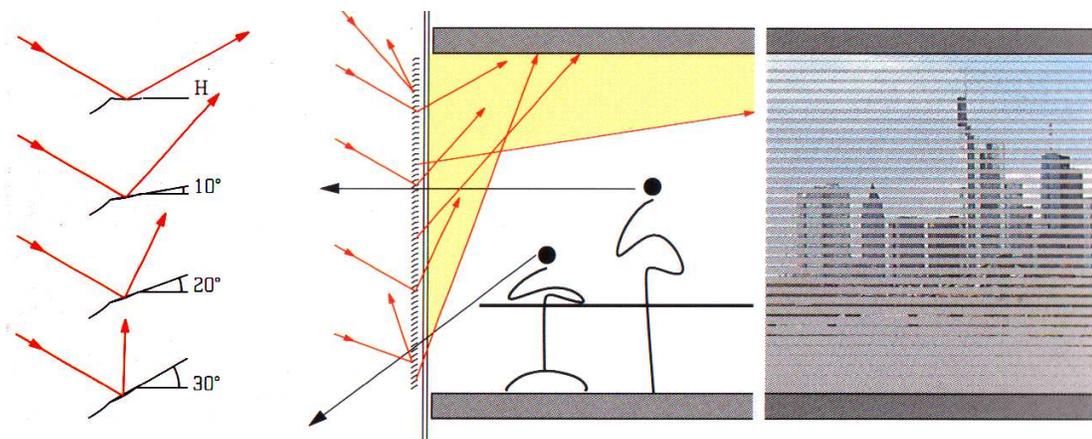


Figura 3.44 – RETROLux. A inclinação da segunda porção do perfil determina a visibilidade e o ângulo de reflexão. Fonte: KÖSTER, 2004

O ângulo de inclinação da segunda porção da lamela, determina a visibilidade através do conjunto (Figura 3.43). Assim surgiu o dispositivo denominado RETROLux Exterior. O conjunto possui vários perfis, cujo ângulo de inclinação da segunda porção é determinado de acordo com a altura do mesmo, em relação ao plano do observador. Os perfis melhoram a transmissão de luz para o interior principalmente nas áreas mais altas, enquanto melhoram o sombreamento das áreas mais próximas das aberturas. Pelo fato dos perfis serem de alumínio, altamente refletivo, evita-se o ofuscamento graças a cobertura cinza na parte inferior dos mesmos, (KÖSTER, 2004). Considere-se também que os perfis das porções mais baixas redirecionam a luz com ângulos próximos de 90°

evitando portanto reflexões indesejadas. No entanto este tipo de sistema pode ser utilizado somente para brises exteriores pois ao colocá-los entre panos de vidro, verifica-se um efeito de ofuscamento próprio dos sistemas entre vidros.

3.5.4 Perfis RETROLux

Posteriores estudos no sentido de colocar perfis diferentes na porção superior e inferior da abertura, levaram o Dr. Eng. Helmut Köster ao desenvolvimento de um perfil cuja primeira porção é serrilhada. Com esta geometria torna-se possível bloquear (retro-refletir) a radiação solar excessiva do verão (elevadas angulações solares), enquanto a segunda porção do perfil, semelhante á uma prateleira de luz, tem como objetivo refletir a luz em profundidade, graças reduzida melhorando a visibilidade e a transparência. Além disto a geometria evita á sua geometria “mais chata” (Figura 3.45). Além disto a altura de cada lamela é o efeito de ofuscamento entre vidros que normalmente ocorre com brises convencionais (vide seção 3.5.1.3)

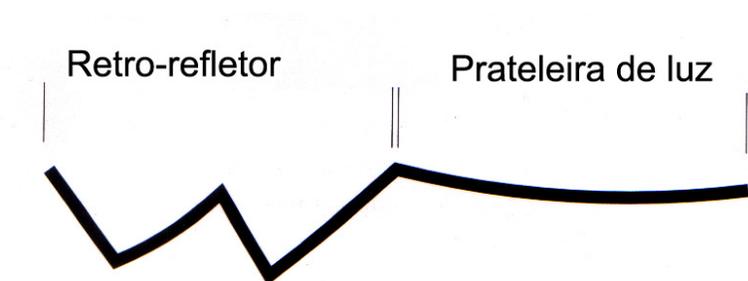


Figura 3.45 - Seção lateral do brise. Fonte: KÖSTER, 2001

A vantagem deste dispositivo é que os perfis são capazes de bloquear a radiação vinda de elevadas angulações solares mesmo na posição horizontal, por isso permitem uma ótima transparência além de garantir nas partes mais profundas dos ambientes, uma boa iluminação difusa. Portanto o problema de ter que fechar os brises

convencionais para poder proteger a fachada da forte radiação solar, causando também a perda da transparência da edificação pode ser resolvido com o uso da retro-tecnologia. A transmissão direta entre as lamelas ocorrerá somente quando o ângulos de incidência é menor que 25° .

Do objetivo de proteger o interior de uma iluminação excessiva e do ofuscamento, mas garantindo ao mesmo tempo uma boa distribuição da iluminação no ambiente surgiu a idéia de criar dois perfis diferentes, em O e em U (Figura 3.47b), denominação esta, atribuída em função da geometria da segunda porção das lamelas. Caso o perfil seja em O a lamela é quase chata, e objetivo é direcionar os raios com uma inclinação próxima da horizontal. Por este motivo este perfil deve ser utilizado para alturas superiores a 1,90, desta forma os raios incidentes entrarão no ambiente em profundidade iluminando os espaços mais distantes da abertura. Note-se que se posicionados na altura do olho do observador, irão causar ofuscamento. O segundo tipo de perfil, U, possui sua segunda porção com uma dobra (Figura 3.47c), de forma que a radiação incidente, que deve ser entre 50° e 85° , seja redirecionada para ângulos próximos da normal da fachada, o que vai redirecionar a luz para cima, sem atingir o ângulo de visão do observador. Note-se que a primeira porção do perfil, a dentada, serve para excluir do ambiente feixes incidentes vindos de ângulos solares maiores que 45° (Figura 3.47a).

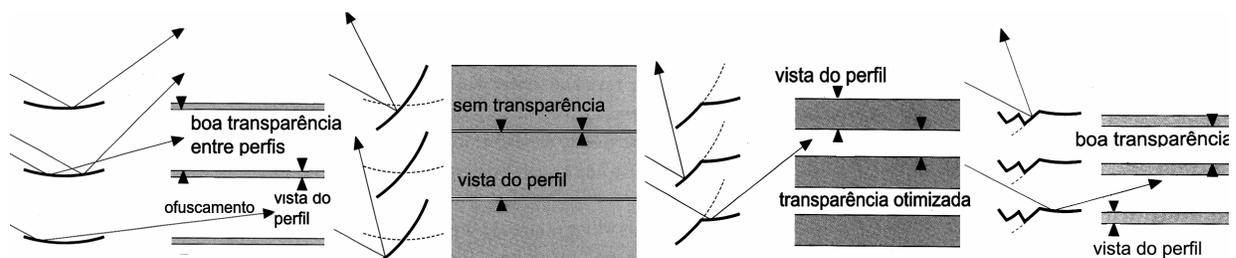


Figura 3.46 - (a) perfil convencional possui boa visibilidade, mas cria ofuscamento. (b) Ao rotacionar o perfil convencional reduz-se a transparência e os níveis de iluminação (c) Ao dividir o perfil em duas porções melhora-se a transparência (d) Com a geometria elaborada aumenta-se a transparência ao mesmo tempo que garante-se a proteção da radiação para maiores angulações solares Fonte: KÖSTER, 2004.

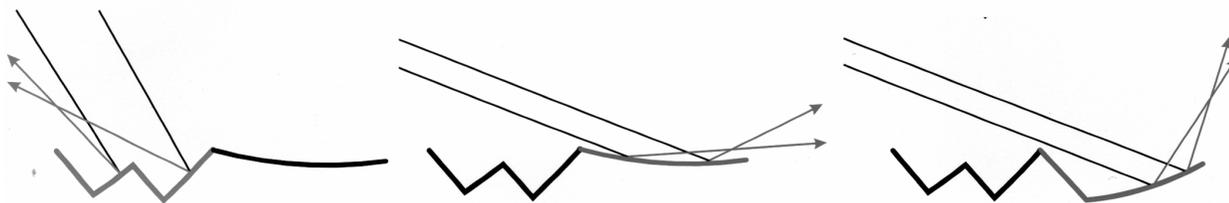


Figura 3.47 - Figura lamelas (a) a porção dentada do perfil, retro-reflete feixes de angulações solares maiores que 45°. (b) Perfil O, reflete a radiação para ângulos próximos da horizontal, como resultado os feixes penetram no ambiente em profundidade. (c) Perfil U reflete a radiação para ângulos próximos da normal, evitando o ofuscamento em alturas inferiores a 1,90m. Fonte: KÖSTER, 2004

A Figura 3.48 mostra o posicionamento das diferentes lamelas em função da posição na fachada, tendo portanto maiores níveis de iluminação na parte superior do ambiente (perfil O) enquanto na parte inferior o observador tem um ótimo ângulo de visibilidade (maior que aquele do perfil da OKALUX) com ausência de ofuscamento e protegido da radiação solar direta, com ângulos muito elevados, graças ao princípio da retro-reflexão.

Na Figura 3.49 é possível observar como cada um dos perfis, O e U, redireciona os feixes em função do ângulo de incidência solar na fachada. Esta estratégia adotada além de garantir uma melhor distribuição da luz, também diminui as cargas térmicas do edifício, pois é capaz de retro-refletir a luz com uma única reflexão, diferentemente dos perfis tipo Okasolar, que dependendo da incidência dos raios, precisam de duas ou três reflexões na lamela antes de serem direcionados de volta para o exterior. Restaria saber se estas angulações do perfil, também são ideais para a nossa latitude, ou se estas poderiam ser modificadas para se adaptar de forma mais adequada à nossa disponibilidade luminosa. Por exemplo, para aceitar o redirecionamento para o interior de feixes incidentes vindos de angulações maiores do que 45° o perfil dentado poderia ter seus ângulos modificados.

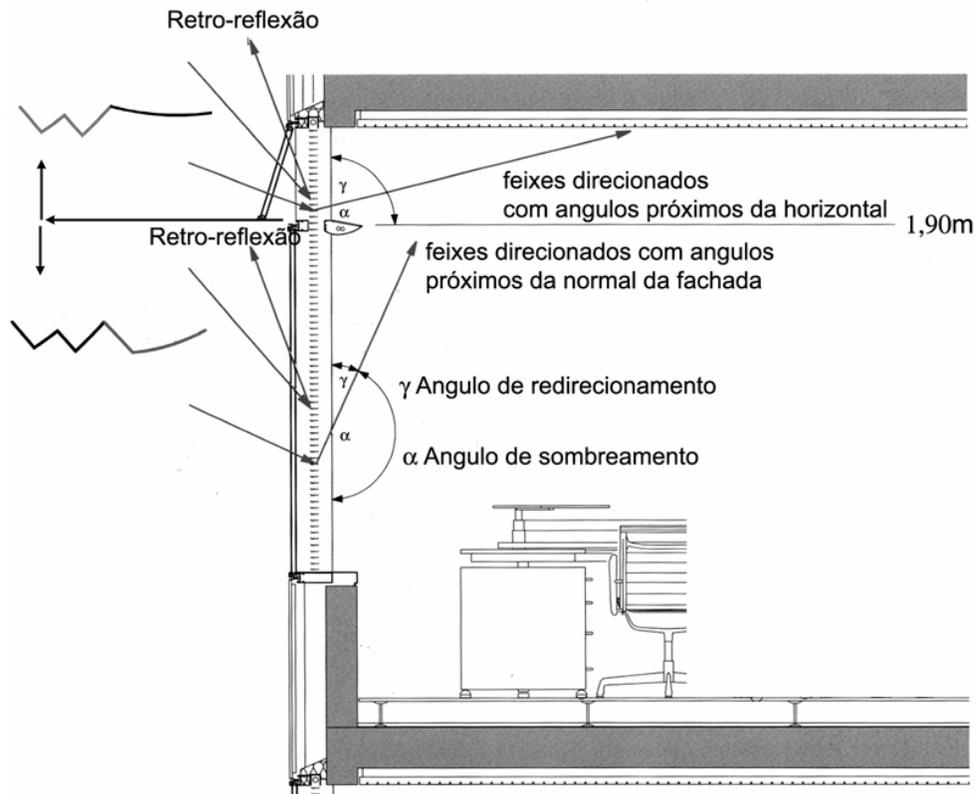


Figura 3.48 - Esquema explicativo do funcionamento combinado dos perfis O e W.
 Fonte: KÖSTER, 2004

Estudos sobre o desempenho deste painel descrevem o comportamento visual e ótico utilizando curvas de distribuição da intensidade, tanto para a luz retro-refletida como para a luz refletida para o interior (KÖSTER, 2004). A título ilustrativo é reportado um dos gráficos que mostra o desempenho de um perfil O, para altura solar de 30° com azimute 0° (Figura 3.50) e mesma altura solar com azimute de 30° (Figura 3.51).

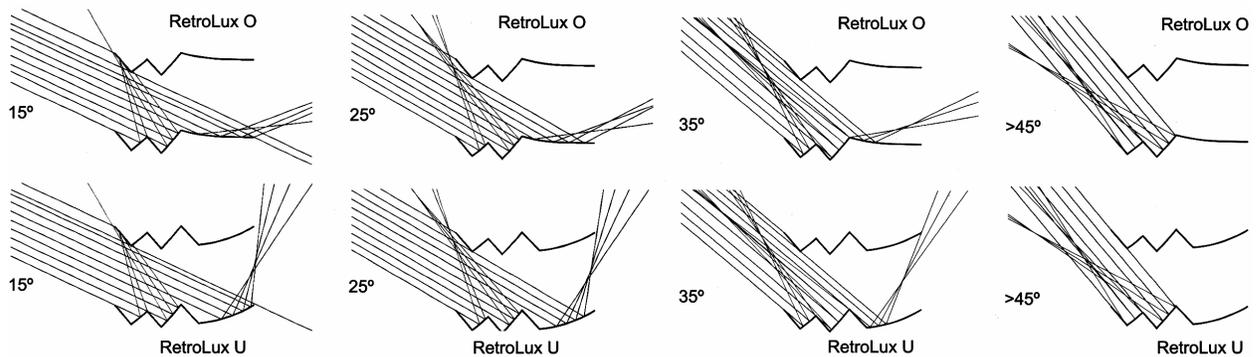


Figura 3.49 - Redirecionamento dos feixes com os diferentes perfis. Fonte: KÖSTER, 2004

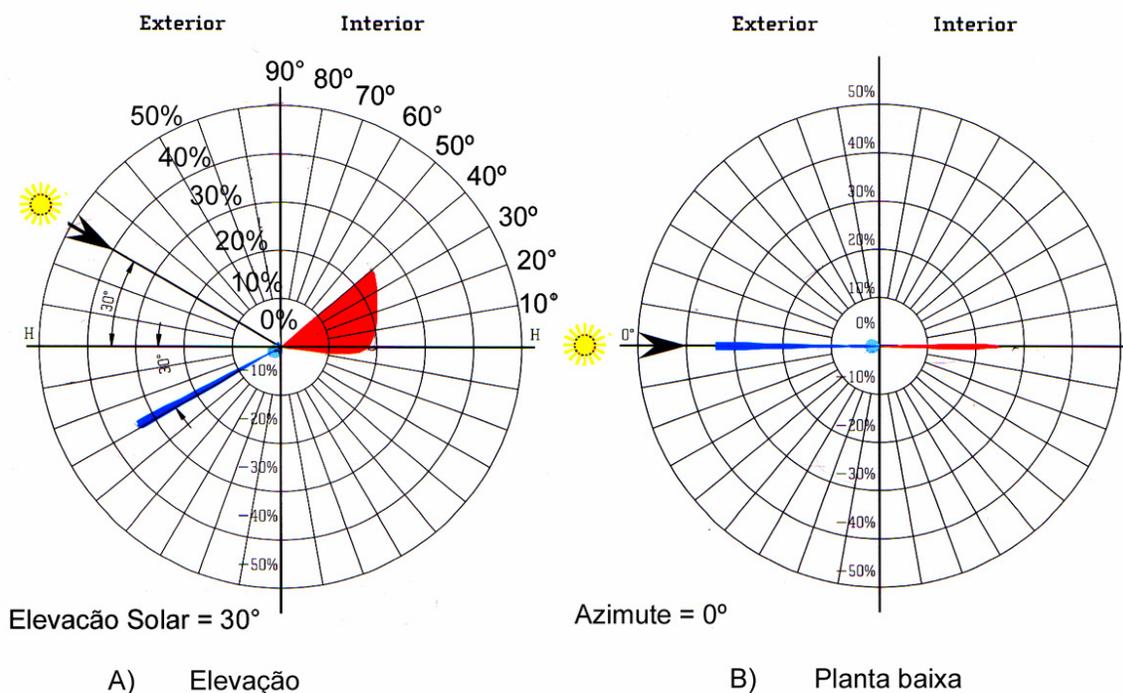


Figura 3.50 - Curvas de distribuição da intensidade para um RetroLux O para uma altura solar de 30° e Azimute 0°. Em (A) a elevação. Em (B) a planta baixa. Fonte: KÖSTER, 2004

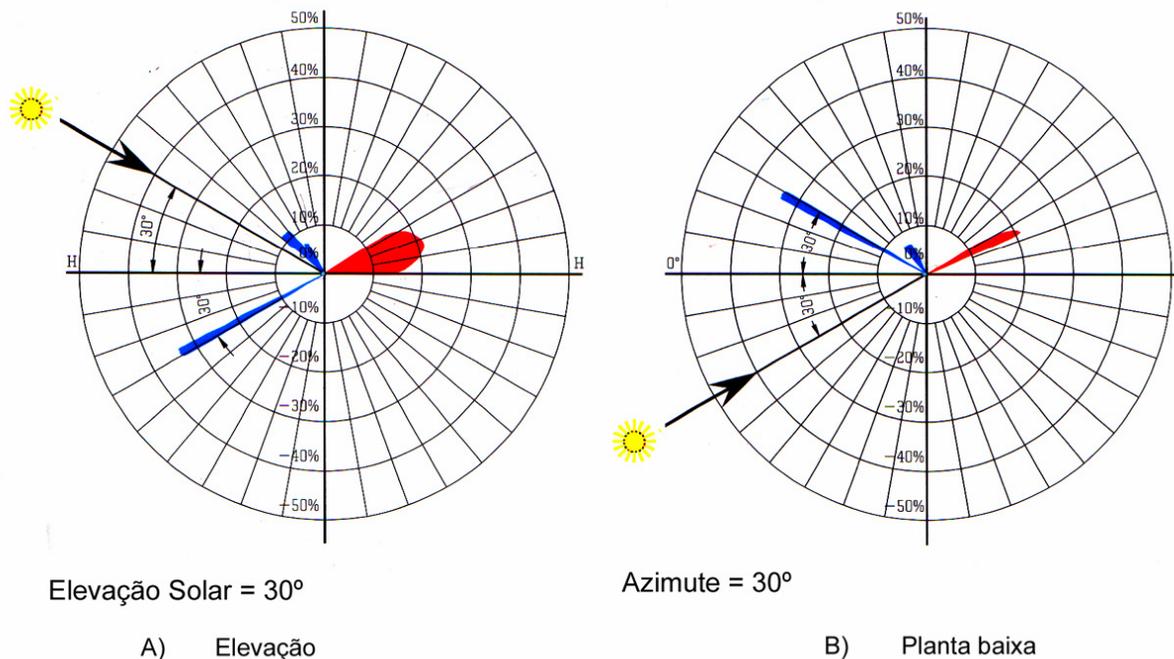


Figura 3.51 - Curvas de distribuição da intensidade para um RetroLux O para uma altura solar de 30° e Azimute 30°. Em (A) a elevação. Em (B) a planta baixa. Fonte: KÖSTER, 2004

Assim para uma elevação de 30° (Figura 3.50 A) e Azimute 0° é possível observar, pelos limites da mancha vermelha, que 25% da luz estará sendo redirecionada para o interior com um ângulo de 40° . De acordo com a Figura 3.50 B, ao incidir nas lamelas a luz se manterá na mesma angulação, não divergindo portanto o feixe, no máximo cerca de 20% da luz chegará a abrir o ângulo em cerca de 2° (KÖSTER, 2004).

Já para um azimute de 30° (Figura 3.51 A) apenas 20% dos feixes chegarão a divergir 20° , sendo que uma parte da radiação já estará sendo retrofletida com um ângulo de 30° . Para um azimute de 30° percebe-se que a luz não se difunde com um grande ângulo, chegando a divergir cerca de 10° num ângulo compreendido entre 20° e 30° (Figura 3.51B).

3.5.5 RETROLuxTherm

O RETROLuxTherm segue a tradição do OKASOLAR, o primeiro sistema de deflexão da luz a utilizar lamelas refletoras integradas a painéis de vidros duplos, isolantes, portanto é instalado na cavidade existente entre os dois panos de vidro. O perfil RETROLuxTherm possui uma primeira porção da lamela, formato em “v”, que retro-reflete a radiação e serve para bloquear os raios solares no verão com uma reflexão única, minimizando portanto os ganhos térmicos. Raios incidentes com angulações menores incidem na segunda porção da lamela, semelhante a uma prateleira de luz e são portanto defletidos para o fundo do ambiente, em direção ao teto (Figura 3.52A) e possui uma transparência de 56% (KÖSTER, 2004).

Existem dois tipos de perfis, em O e em U, (Figura 3.52 A e B). O primeiro deflete a luz vinda de ângulos solares baixos e deve ser posicionado acima de 1,90 de altura pois para ângulos incidentes menores que 27° o sistema deixa a luz solar direta passar através dos perfis, o que pode gerar incomodo. O segundo perfil tem na segunda porção um componente mais inclinado e por isso a luz é defletida com maiores

ângulos. Este perfil deve ser posicionado abaixo de 1,90 de altura. O redirecionamento pelos perfis cria um cone de luz que ilumina o ambiente quando os ângulos de incidência são maiores que 50°. Quando os ângulos incidentes são menores que 26° uma quantidade maior de luz cai nas áreas próximas das aberturas (KÖSTER, 2004).

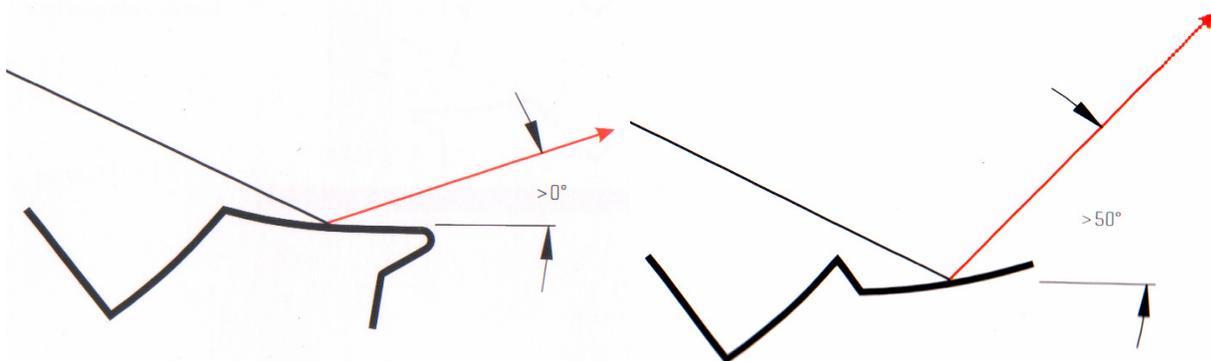


Figura 3.52 – Perfis de Retroluxtherm, O e U, respectivamente. Fonte: KÖSTER, 2004

Com este perfil surge a proposta de deixar vãos livres na altura do plano de trabalho para não obstruir a vista (Figura 3.53 e Figura 3.55).

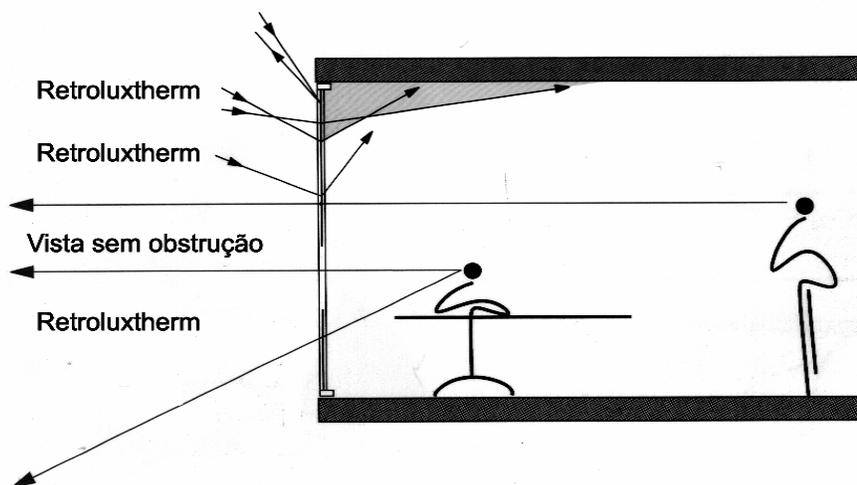


Figura 3.53 - Painéis na parte superior e inferior da abertura, com um espaço livre na altura do observador. Fonte: KÖSTER, 2004



Figura 3.54 – Office for monument preservation em Esslingen do arquiteto Odilo Reutter..
Fonte: KÖSTER, 2004.

Note-se, pela Figura 3.55, que comparando-se o redirecionamento dos dois perfis que são utilizados na parte inferior da abertura (RETROLux U e RETROLuxTherm U) o segundo tende a redirecionar os raios mais para o fundo que o primeiro, (KÖSTER, 2004), o que poderia significar que este segundo seria mais eficiente ao redirecionar a luz aumentando de forma mais significativa as iluminâncias no fundo das salas, o que será verificado depois na etapa experimental.

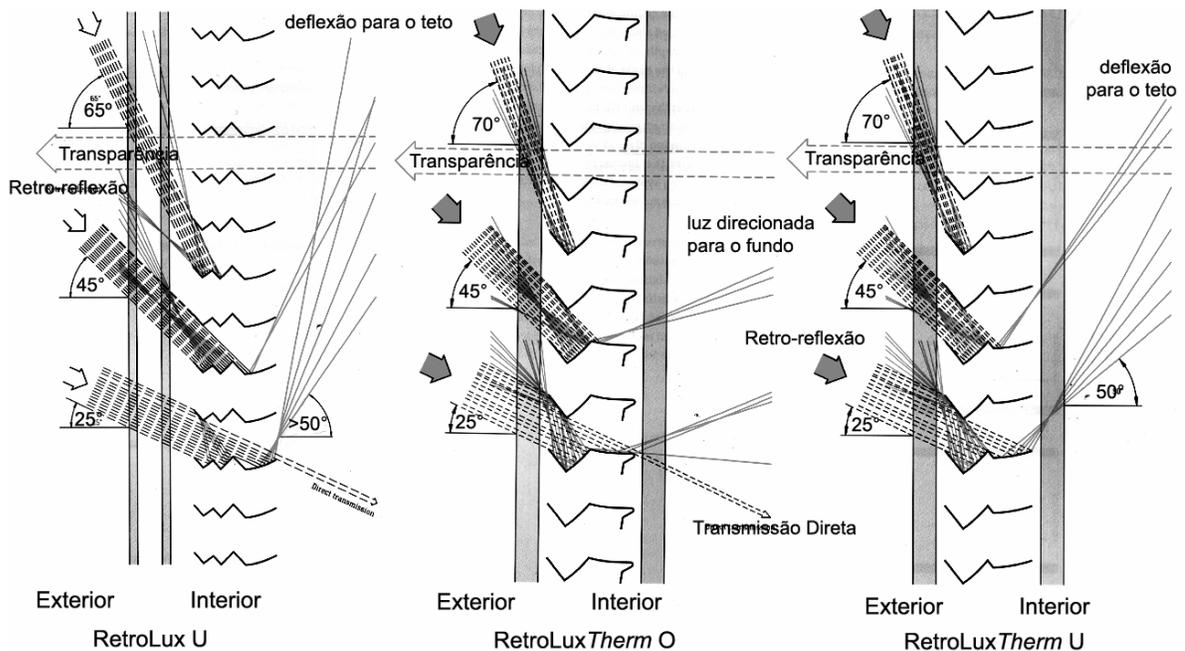


Figura 3.55 - (a) Redirecionamento dos feixes incidentes para os perfis RETROLux U (b) RETROLuxTherm O e (c) RETROLuxTherm U. Fonte: KÖSTER, 2004

Na Figura 3.57 é possível visualizar a radiação incidente, a deflexão da luz no interior de um ambiente, para duas fachadas diferentes, compostas por painéis RETROLux e painéis RETROLuxTherm. Estes dados são referentes aos painéis medidos sem os vidros. Nota-se que a retro-reflexão é máxima (80%) para ângulos maiores ou iguais a 50°, a porcentagem decai para ambos os tipos e para 10° de incidência o RETROLux retro-reflete 30% da radiação, enquanto o RETROLuxTherm consegue retro-refletir uma porcentagem um pouco maior, de 40%. A distribuição de luz também é um pouco mais suave para o painel RETROLux (KÖSTER, 2004). Enfim o RETROLux e o RETROLuxTherm bloqueiam a radiação direta num ângulo de visão de cerca 30° sendo que a radiação é fortemente defletida para ângulos de incidência inferiores a 45°.

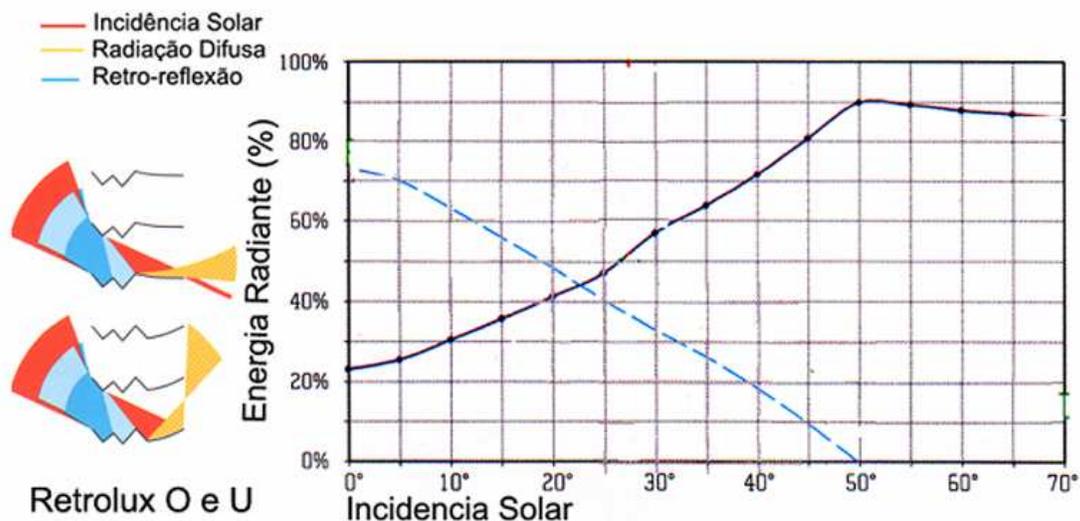


Figura 3.56 - Simulação mostra o comportamento de dois conjuntos de brises RETROLux, O e U perfil O e U, no gráfico são mostrados a incidência solar, a radiação difundida para o interior e a radiação retro-refletida. Nos gráficos aparece a porcentagem da energia radiante transmitida em função do ângulo de incidência, Fonte: KÖSTER 2004.

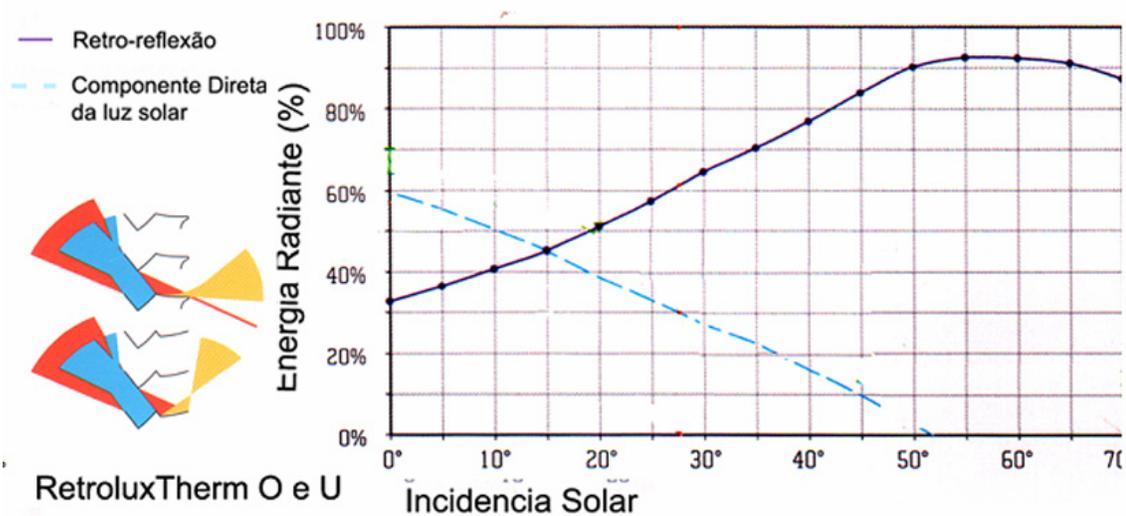


Figura 3.57 - Simulação mostra o comportamento de dois conjuntos de brises RETROLuxTherm perfil O e U, no gráfico são mostrados a incidência solar, a radiação difundida para o interior e a radiação retro-refletida. Nos gráficos aparece a porcentagem da energia radiante transmitida em função do ângulo de incidência, Fonte: KÖSTER 2004.

3.5.6 RETROFLEX

O RETROFLEX pode ser caracterizado como um brise côncavo/convexo, cuja superfície superior é caracterizada por uma micro-estrutura prismática espelhada. Os micro-prismas formam diversas parábolas que retro-refletem a luz solar incidente, com diferentes focos em direção ao exterior. Pode ser encontrado em dois tamanhos, 80mm se utilizado para cobrir grandes áreas de fachadas, ou 25mm para janelas individuais. De acordo com a estratégia de diversificação do posicionamento das lamelas em função de sua altura na fachada, recomenda-se que os brises sejam instalados na horizontal para alturas superiores a 1,90m e com ângulos um pouco mais inclinados para menores alturas. A parte inferior tem um acabamento opaco que garante que a luz retro-refletida seja livre de ofuscamento mesmo para o exterior.

Além de aumentar a transparência (88%) e portanto o contato com o exterior, é sua eficiência no redirecionamento da luz que garante uma excelente penetração da luz nos

espaços, aumentando os níveis da iluminação, em profundidade. Além disto, não produz efeitos de reflexão intensa concentrados em alguns pontos, nem difusão de cores. As micro estruturas são prensadas, com um rolo, num substrato de alumínio utilizando as mais avançadas técnicas de prensa. Em seguida são anodizados e modelados com extrema precisão por equipamentos especializados de alta precisão. Em 2000 foram instalados no projeto do Mombino high-rise dos arquitetos Heinz Zimmerman e Rolf Lauppi em Zurique (Figura 3.58).

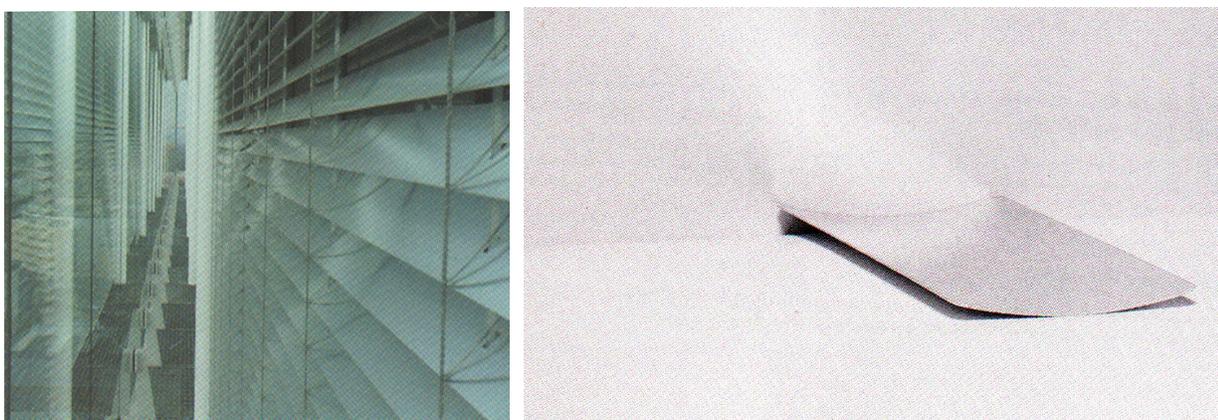


Figura 3.58 - (a) Mombino high-rise Zurique Arquitetos Heinz Zimmerman e Rolf Lauppi. (b) perfil RETROFLEX. Fonte: KÖSTER, 2004

A vantagem deste perfil em relação a um convencional côncavo é o fato de que este reflete a luz incidente ou para o interior ou para a parte inferior da lamela superior, mesmo quando os perfis estão inclinados, com o RETROFLEX, os raios vindo de baixas elevações solares são refletidos para o exterior com uma única reflexão, evitando aquecimento, ofuscamento e excesso de iluminação, especialmente no verão, quando posicionados na horizontal (Figura 3.60) (KOSTER 2004).

Brises horizontais são recomendados para fachada norte, no entanto para fachadas leste e oeste a radiação solar incidente é mais acentuada para as direções nordeste e noroeste, por isso os brises são mais eficientes se forem instalados de forma perpendicular à abertura (Figura 3.59) (KÖSTER, 2004).

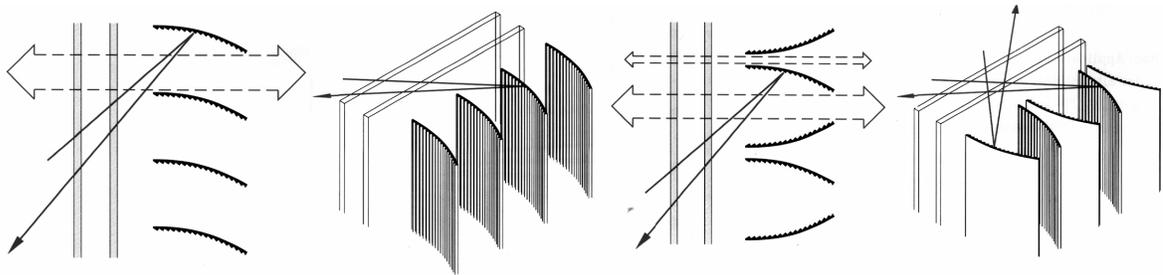


Figura 3.59 - Figura (a) planta baixa e vista de perfis verticais para fachadas leste e oeste. (b) planta baixa e vista de perfis verticais duplos, para fachada norte. Fonte: KÖSTER, 2004

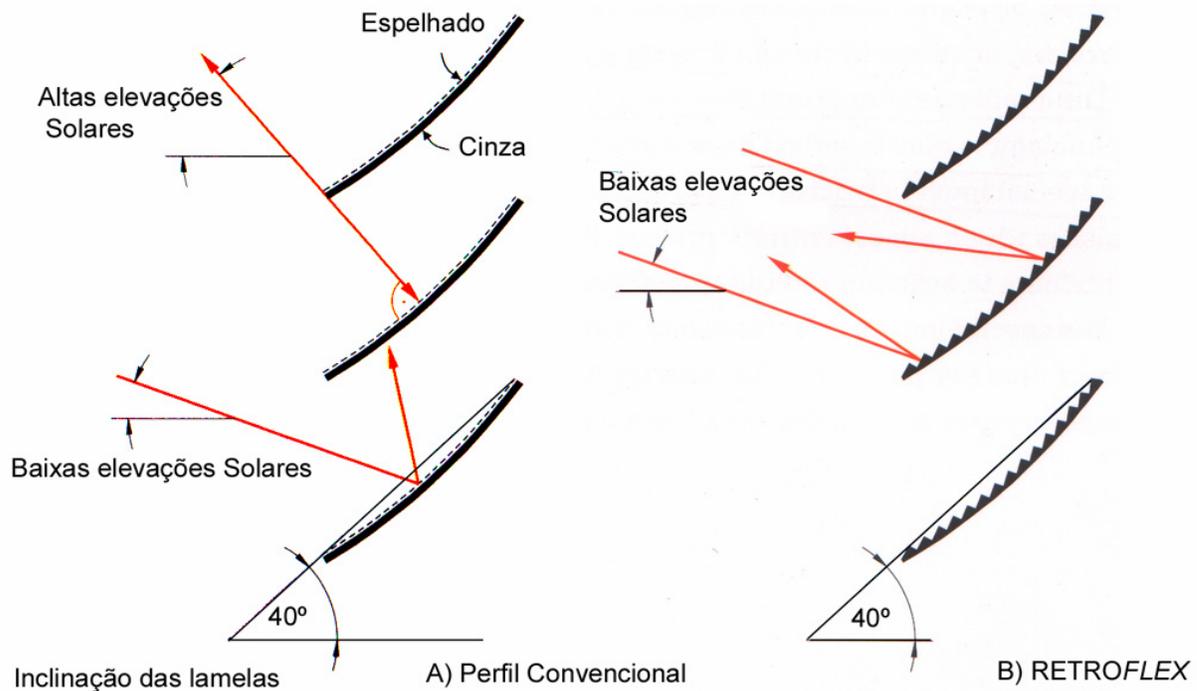


Figura 3.60 - Desenho esquemático de um perfil convencional e do RETROFLEX. Fonte: KÖSTER, 2004

Testes realizados em laboratório mostraram que impressões digitais ou depósito de poeira, na quantidade normalmente encontrada em escritórios, reduz a eficiência do dispositivo em apenas 1%. (KOSTER 2004). Simulações são realizadas para prever a entrada de radiação dentro do ambiente em função da incidência solar e a retro-reflexão, Note-se que se os brises estiverem na horizontal, radiação vinda de elevadas angulações solares (70°) ainda consegue entrar no ambiente (KOSTER 2004).

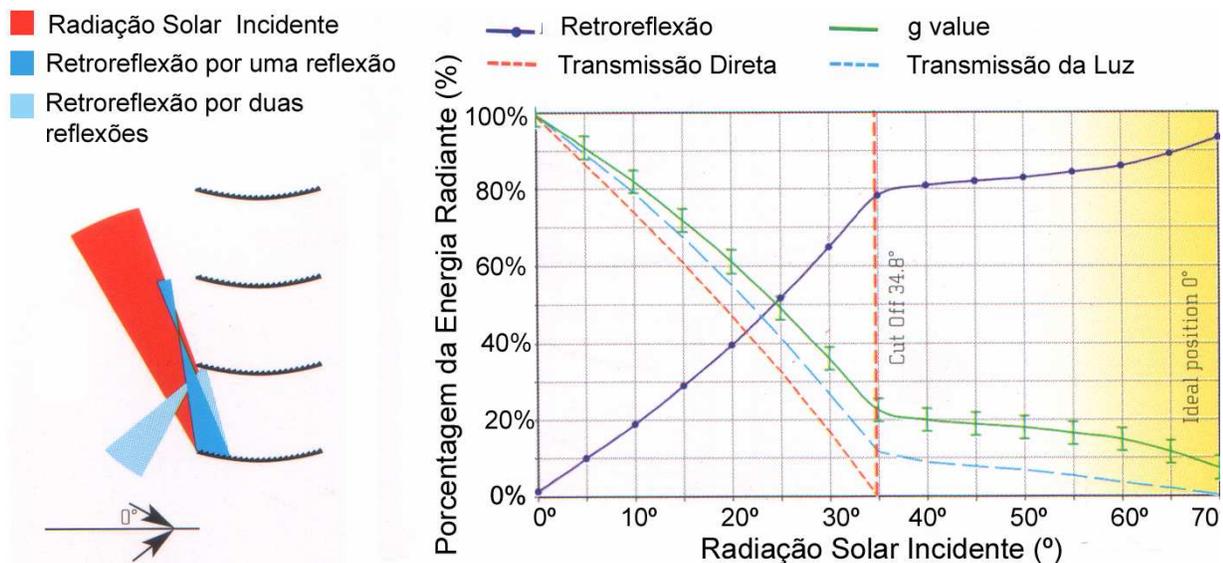


Figura 3.61 –Retro-reflexão para um RETROFLEX na posição Horizontal. Fonte: KÖSTER, 2004

Na Figura 3.60 o gráfico mostra a transmissão de energia numa abertura com RETROFLEX, na posição horizontal, sem vidro (KOSTER 2004).

3.5.7 Materiais Transparentes Isolantes

Sistemas de deflexão da luz na forma de painéis isolantes (Figura 3.62) surgiram em 1979, quando ainda o mercado estava voltado para elaboração de sistemas móveis. Esta classe de materiais deve o seu nome à característica de ter propriedades térmicas semelhantes àquelas dos componentes opacos, conservando um alto valor de transmitância luminosa. Por isso são utilizados para evitar as dispersões térmicas devidas à convecção e radiação. Na prática é um material plástico, normalmente uma estrutura capilar, de diâmetro de 2,5mm, e comprimento 1 cm, posicionada verticalmente entre dois panos de vidro. Estas estruturas são construídas sobrepondo um grande numero de pequenos tubos de plástico ou vidro, altamente translúcidos que proporcionam uma transmissão e dispersão da luz com mínima transmissão térmica pois o material é transparente para radiação visível e no

infravermelho próximo, mas opaco no infravermelho longínquo (Figura 3.63). Desta forma é possível criar paredes divisórias com o objetivo de bloquear a troca de radiação. Ou seja, duas lâminas de vidro que contém um material isolante, sólido de baixa intensidade, com uma estrutura capilar, extremamente frágil, que fica protegida entre duas lamina de vidro ou de algum material transparente (ARCHITECTS COUNSIL OF EUROPE, 1999)

A luz solar que incide nestas estruturas é refratada e difundida diversas vezes garantindo assim um espaço livre de ofuscamento e de sombras e uma distribuição mais uniforme da iluminação. A elevada transmissão de luz baseia-se na função da condução da luz dos capilares orientados e portanto não está relacionada com a espessura dos tubos. De acordo com as necessidades a transmissão da luz pode ser ajustada numa faixa entre 12 a 45% de acordo com a inclinação dos capilares.

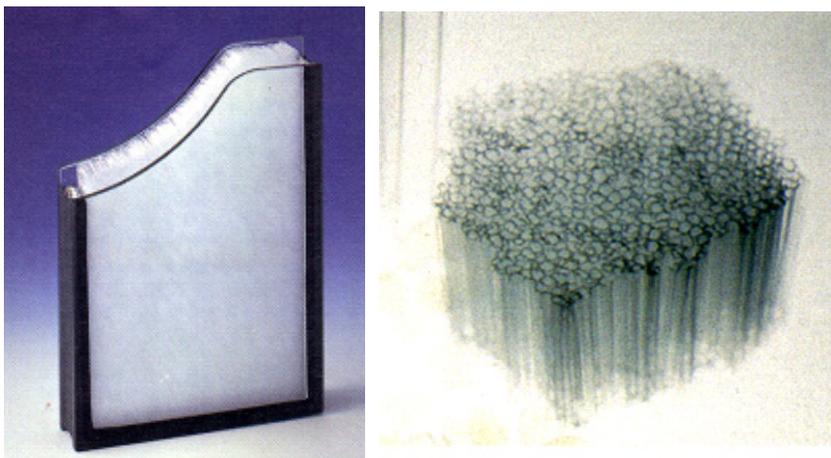


Figura 3.62 - Painel de OKALUX entre vidros. Fonte: KALTENBACH, 2004.

Nas versões Okalux O é inserida uma folha de alumínio entre os capilares e o tecido de fibra d vidro, que torna o painel completamente opaco (impermeável a luz). A versão Okalux U, utilizado para áreas onde não é necessária a proteção térmica podem ser utilizados apenas os capilares, sem a fibra de vidro. Desta forma é possível obter painéis transparentes. (OKALUX, 2002b)

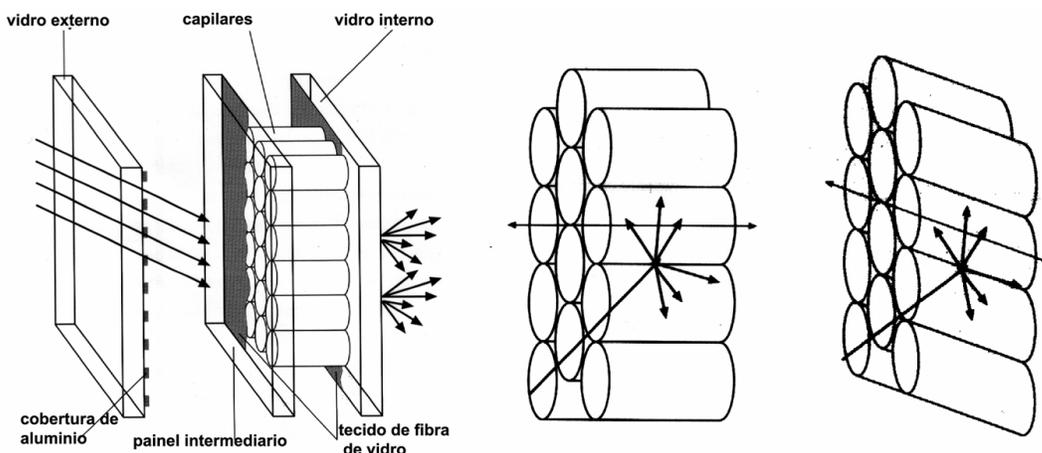


Figura 3.63 - (a) esquema de funcionamento. (b) detalhe do funcionamento para capilares retos e inclinados (c). Fonte: OKALUX, 2002b

A proteção solar é determinada pelo tecido de fibra de vidro que cobre os capilares e pode ser controlada mediante o uso de varias camadas deste tecido. Ao mesmo tempo o painel reduz, dentro do ambiente, a proporção de UV contida no espectro solar. O desempenho do painel para transmissão dos comprimentos de onda e porcentagem de iluminâncias dentro de um ambiente, para elevados ângulos solares pode ser observado na Figura 3.64. O painel pode ser aplicado em aberturas laterais e zenitais aonde não seja necessária uma transparência do painel. Possui uma excelente reprodução de cores. Os capilares também proporcionam um isolamento acústico na faixa de 40 a 44dB (OKALUX, 2002).

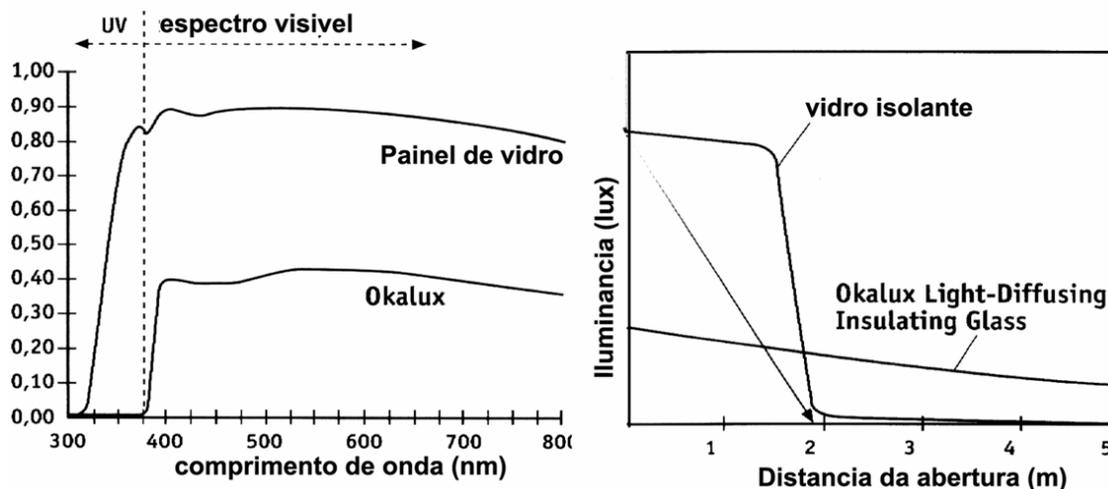


Figura 3.64 - (a) permeabilidade ao UV. (b) Decaimento das iluminâncias em função da distância da abertura para um painel Okalux, do tipo difusor de luz. Fonte: OKALUX, 2002b

Este dispositivo possui uma alta resistência à transmissão de calor mas permitem bem a difusão dos raios solares, eliminando os efeitos de ofuscamento, dadas as suas características direcionais de reflexão da radiação solar. A desvantagem é que podem fornecer luz mas não visão para o exterior em função de o material ser opaco. Enfim diminuem a dispersão de calor através da superfície envidraçada reduzindo a condutância da janela, assim além de melhorar a luminosidade do ambiente, são capazes de preservar as características climáticas deste último. Existem muitas categorias de TIM, e a transmissão da luz vai de 45% a 80%. Abaixo alguns exemplos de arquitetura onde foram utilizados estes painéis (ARCHITECTS COUNCIL OF EUROPE, 1999).



Figura 3.65 - Politechnic Temasek. Fonte: OKALUX, 2002b

3.5.8 Painéis Prismáticos

Painéis prismáticos são placas de acrílico, vidro ou policarbonato, planas, utilizadas para redirecionar ou refratar a luz solar. Possuem duas funções bem distintas: proteção solar, refratando a luz solar direta e redirecionamento da luz, transmitindo a luz solar difusa da abobada celeste para o interior. Podem ser utilizados fixos ou móveis, internos ou externos a fachada, para iluminação lateral e zenital (Figura 3.66). Um painel prismático consiste na junção de vários prismas de acrílico sendo que enquanto numa superfície ficam as saliências dos prismas a outra face fica lisa. O

sistema refrata os raios solares através da combinação de refração entre dois ângulos. Normalmente o sistema é posicionado entre duas lâminas de vidro para evitar o desgaste das superfícies ópticas e para evitar a manutenção.

Atualmente existem duas formas de se obter painéis prismáticos. O primeiro é pelo corte de prismas em placas de acrílico e é encontrado no mercado com vários ângulos diferentes de refração. Alguns são cobertos com uma película de alumínio com alta refletância especular em uma superfície de cada prisma. O segundo é obtido por um processo de corte particular, que produz prismas espaçados a menos de 1mm. Desta forma é possível obter uma película com cortes prismáticos que também possui boas qualidades ópticas, esta película prismática deve ser utilizada entre duas laminas de vidro, para evitar desgaste.

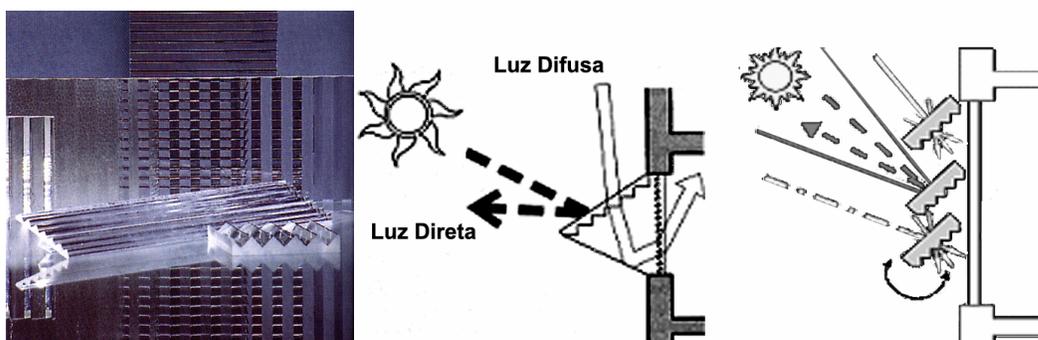


Figura 3.66 - (a) Painéis prismáticos. (b) Sistema triangular de painéis prismáticos. (c) Painéis prismáticos dispostos em forma de brises. Fonte: www.bominsolar.com

Este tipo de painéis, utilizados para redirecionar a luz solar direta podem causar ofuscamento e dispersão de cores no espaço, por isso é necessária a correta angulação e sua rotação segundo a altitude solar. Em certas ocasiões torna-se adequado o acoplamento a elementos suplementares para evitar a dispersão de cores, por exemplo, um vidro translúcido atrás do sistema, se utilizado para redirecionamento dos raios pode haver deflexão da luz para baixo para algumas altitudes solares, causando ofuscamento os usuários (LAAR, 1998).

Análises por computação mostram que para painéis fixos é inevitável que isso aconteça em algumas épocas do ano. No entanto isso pode ser evitado com sistemas

móveis que mantêm sempre a inclinação ideal em relação a posição do sol, e apesar de serem transparentes distorcem a vista do exterior. A principal função dos painéis prismáticos é aumentar o alcance da luz dentro dos espaços. Para alcançar este objetivo reflexão e refração são utilizados. O sistema pode ser desenhado para refletir a luz vinda de determinadas altitudes solares enquanto transmite a luz vinda de outros ângulos. Refração e reflexão interna total podem ser utilizados para mudar a direção dos raios emitidos. A fração da luz refletida e da luz refratada dependem do ângulo de incidência, dos índices de refração e da polarização da luz incidente.

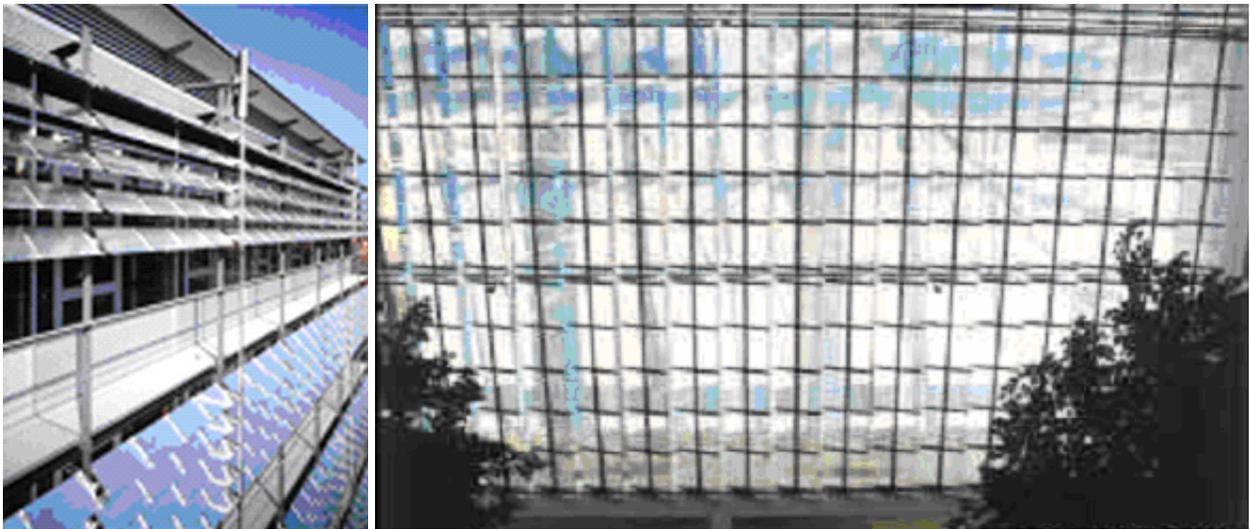


Figura 3.67 - (a) Painéis Prismáticos para iluminação lateral. (b) A painéis para iluminação zenital.
Fonte: www.bomin solar.de

Para a entrada mais profunda da luz solar o painel prismático precisa ter uma aceitação de uma faixa larga de altitudes solares. A luz refratada precisa emergir num ângulo não inferior a 15° acima da horizontal para obter uma penetração máxima sem gerar raios que sejam descendentes e que causem ofuscamento. A eficiência do painel é determinada por uma configuração apropriada dos ângulos de refração. Para otimizar o desempenho do dispositivo uma configuração específica pra os perfis prismáticos deve ser calculada, para cada situação geográfica e geométrica, com objetivo de alcançar altos níveis de iluminância nos espaço mais profundos do ambiente. Além disto, é necessária, uma superfície com elevadas refletâncias para o ambiente interno, especialmente na área próxima a abertura e por aproximadamente um terço da

profundidade do teto. Quando os painéis são moveis existe um eixo automático que comanda todo o sistema, os ajustes necessários são feitos a cada estação de acordo com a altitude solar, os painéis também podem ser utilizados para iluminação zenital (Figura 3.67).

Estudos mostram (IEA, 2000) que para painéis da empresa Siteco (nome comercial Siemens) cortados a 45°, localizados na fachada oeste e posicionados verticalmente na parte superior da janela, o desempenho do dispositivo é ótimo para céu claro, distribuindo a luz de maneira mais uniforme no ambiente, aumentando a iluminância das zonas intermediárias de 30%, aumentando a média de iluminação na espaço em 14%. No entanto o mesmo não aconteceu para céu encoberto, reduzindo a iluminância de 20 a 35% , contribuindo no entanto com a diminuição do brilho. Testes de prismas realizados na Áustria, pelo laboratório do Bartenbach LichLabor, Innsburg, avaliaram 3 tipos de painéis da empresa Siemens:

- 48/5, (refletir luz direta para aumentar os níveis de iluminância nos espaços mais profundos através da superfície do teto. Utilizado em aberturas verticais acima do nível do olho, com a estrutura orientada para fora. A media de transmitância da luz difusa através do painel é 48%.
- 45/45 – Utilizado em sistemas moveis. A média de transmitância da luz difusa através do painel é 56%, no entanto o painel deve ser ajustado diariamente e a cada estação.
- 62/28- Utilizado em sistemas fixos.

A aplicabilidade dos sistemas prismáticos, para controle da entrada de raios solares no verão e para otimizar a distribuição de luz nos ambientes, assim como as bases teóricas e a descrição geométrica foram estudadas por diversos autores (Figura 3.68) (BARTENBACH 1985; LORENZ, 1998, 2001).

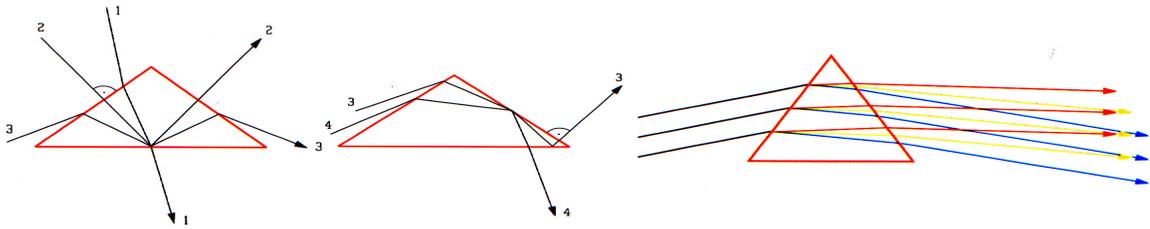


Figura 3.68 - Comportamento do feixes ao incidirem no prisma. (a) 1- Refração dos feixes na passagem de meios com índices de refração diferentes (ar/acrílico e acrílico/ ar). 2 - Reflexão interna total, com ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão. 3-Refração, reflexão interna total e nova refração nas superfícies do prisma mudam a direção do feixe. (b) 4- Raios sofrem diversas refrações no interior do prisma e reflexão interna total. (c) Ao incidirem no prisma os feixes sofrem dispersão, assim os diferentes comprimentos de ondas são refratados com ângulos diferentes. Fonte: KÖSTER, 2004

3.5.8.1 Bases Teóricas

Na Figura 3.69 a representação de um painel prismático que exhibe a face lisa voltada para o interior e a face prismática voltada para o exterior. A seção do painel prismático é determinada pelos ângulos θ , (ângulo formado pela face superior com o plano vertical), Ω (ângulo formado pela face inferior com o plano vertical) e ω (ângulo formado pelo eixo longitudinal dos prismas, P, com o plano horizontal, H). Na Figura 3.69 os eixos P e H se sobrepõem; caso o eixo longitudinal dos painéis P, seja diferente de 0° e portanto da horizontal H, os prismas aparecerão inclinados em relação a abertura. O ângulo ω é determinado pela equação:

$$\tan g\omega = -\frac{\text{sen } \alpha}{\tan g\lambda} \quad (3.44)$$

Aonde α é o azimute da abertura, isto é, o ângulo que identifica o quanto a abertura está deslocada em relação ao Norte (para o hemisfério Sul), composto por uma componente normal em relação à abertura e por outra componente horizontal que indica a direção Norte e o ângulo λ relativo a latitude geográfica. Desta forma o eixo longitudinal dos prismas, (Figura 3.69) fica paralelo ao plano do equador. É importante que esta condição seja respeitada para garantir que os raios solares incidentes tenham sempre uma área de contato ideal com a superfície dos prismas, de modo que os

mesmos sejam defletidos para o interior, em direção ao fundo do espaço e não para suas laterais.

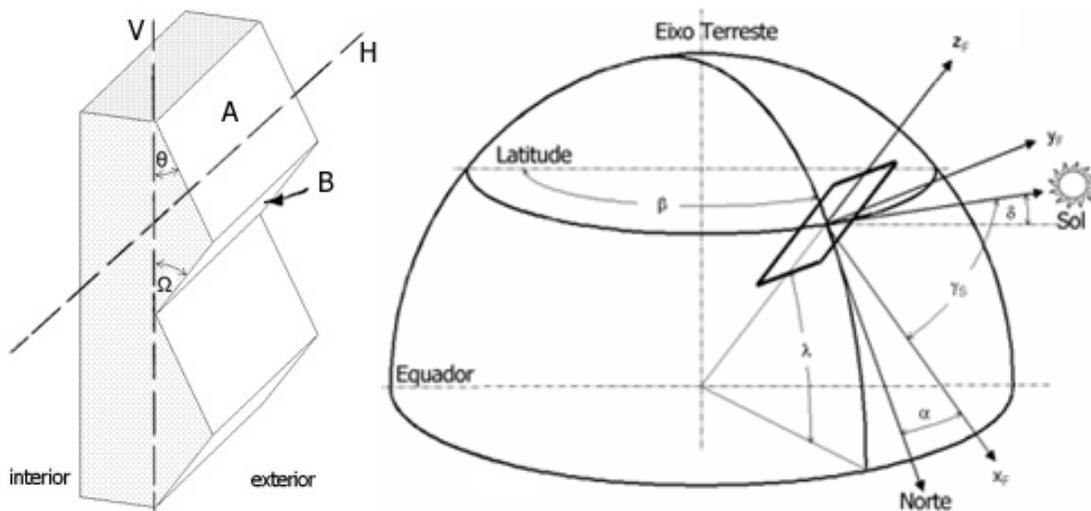


Figura 3.69 - À esquerda, painel prismático, a direita, desenho esquemático do posicionamento dos painéis prismáticos (LORENZ 1998).

Fonte: <http://we.lorenz.bei.t-online.de/en/einprien/basis.htm>

Desta forma o eixo longitudinal dos prismas, (Figura 3.70) fica paralelo ao plano do equador. É importante que esta condição seja respeitada para garantir que os raios solares incidentes tenham sempre uma área de contato ideal com a superfície dos prismas, de modo que os mesmos sejam defletidos para o interior, em direção ao fundo do espaço e não para suas laterais. A Figura 3.70 mostra qual deve ser o ângulo de rotação (ω) do painel prismático em função da latitude (λ) e do azimute (α -ângulo de rotação da fachada em relação ao sul) da abertura

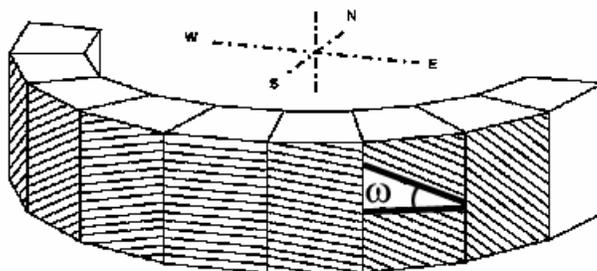


Figura 3.70 Inclinação do eixo longitudinal dos prismas em relação ao eixo horizontal, em função da latitude azimute da abertura. Fonte: LORENZ, 2001

A Figura 3.71 mostra o funcionamento de um painel prismático voltado para o norte, para luz solar direta e difusa. A maior fração da radiação solar incidente atinge primeiro as faces superiores A (Figura 3.69) enquanto uma fração menor atinge primeiro a face inferior B (Figura 3.69). Os raios incidentes vindos de altitudes solares maiores 1a e 1b, compreendidos numa faixa angular entre o zênite e a angulação da superfície prismática B (área com ranhuras) atingem a face superior do prisma e são totalmente refletidos em R (por reflexão interna total) pela face lisa do painel.

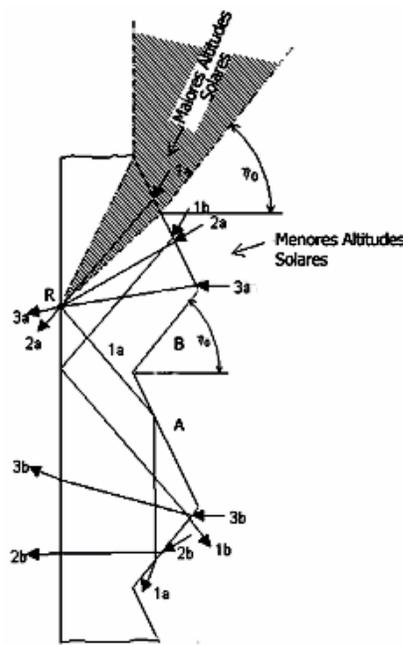


Figura 3.71 - Trajetória dos feixes incidindo sobre o painel prismático. Fonte: LORENZ, 2001

Em seguida os feixes que seguem a trajetória (1a) incidem na face superior do prisma, pelo lado interno, posicionado abaixo (A), são totalmente refletidos e penetram na superfície inferior (B) pelo lado interno para serem refletidos para o exterior. No entanto, em função do ângulo, os feixes entrarão novamente no prisma, e somente depois de sofrer reflexão interna total na face lisa serão direcionados para a parte inferior interna da face B alcançando finalmente o exterior. Os raios com trajetória 1b, ao sofrerem reflexão interna total (ponto R) incidem diretamente na superfície interna inferior (B) até alcançar o exterior. Os raios de altitudes maiores (2a) que entram pelas faces superiores e são direcionados para baixo não criam ofuscamento. Os raios (2b)

que entram pelas superfícies inferiores (B) são direcionados para cima, mas devido a sua pequena proporção estes não criam um ofuscamento que seja perturbador. Os raios com ângulos praticamente horizontais (3a e 3b) que entram pelas faces superior e inferior dos prismas são enfraquecidos pela absorção na atmosfera e, portanto também não criam ofuscamento.

Todas as altitudes solares possíveis, dos raios incidentes relativas a horizontal no plano da seção do prisma, são designados pelo ângulo η . A borda mais baixa da faixa angular dos ângulos η com a qual os raios incidentes tem que ser refletidos, escurecida na Figura 3.71, é limitada pelo ângulo η_G (que representa o ângulo limite inferior; toda a faixa angular acima deste valor deve ser excluída do ambiente, portanto refletida para o exterior). Para projetar o desenho ideal do prisma para as nossas latitudes o primeiro passo é determinar o ângulo prismático θ que é calculado pela equação (LORENZ, 2001):

$$\tan \theta = \frac{(1 - \text{sen } \eta_G)}{\left[(\eta^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \cos \eta_G \right]} \quad (3.45)$$

Para isso é necessário encontrar o η fornecido pela equação:

$$\delta_G = \delta_M \cos \left(\frac{2\pi p_G}{p_j} \right) \quad (3.46)$$

Onde :

$\delta_M = 23.45^\circ$ o ângulo máximo da declinação solar no solstício de verão,

$p_G =$ dias de bloqueio solar (tantos dias antes e tantos dias depois do solstício) período escolhido pelo projetista para que a radiação seja excluída.

$p_j = 365,25$ período do ano em dias

$\delta_G =$ o ângulo da declinação solar para o qual a radiação solar será transmitida para o interior.

Isto significa que para o projeto do prisma é necessário escolher qual o período, em dias, para o qual a radiação solar incidente deve ser transmitida para o interior (ex:

20 dias antes e depois do solstício a radiação deve ser excluída). É importante notar que o ângulo δ_G refere-se à declinação solar, enquanto o ângulo η_G refere-se a incidência solar sobre o pano do prisma. Desta forma ângulos com altitude maior que η_G devem ser refletidos para o exterior. A equação para calcular η_G é dada por:

$$\eta_G = \delta_G + \eta_o \tag{3.47}$$

Sendo

$$\eta_o = \arcsin\left(\frac{\cos \beta_n \cos \lambda}{\cos \omega}\right) \tag{3.48}$$

Onde: λ = latitude e ω =azimute e $\beta_n = -\arctan\left(\frac{\tan \alpha}{\text{sen } \lambda}\right)$

Para entender o η_o é necessário antes entender a posição solar dos feixes dado pelo ângulo β (Figura 3.19). Considerando que para um específico ângulo η , o subscrito “o” (η_o) indica que ele abrange um ângulo β_n e a declinação solar $\delta=0^\circ$.

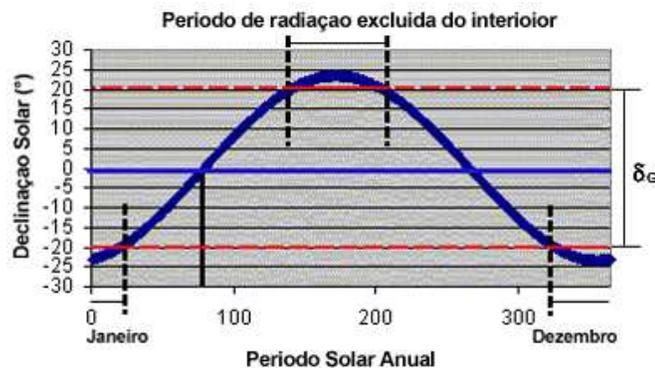


Figura 3.72 - Período de radiação excluído do interior em função da declinação solar δ_G .
Fonte:www.siteco.de

Em função do modelo geocêntrico pelo qual estudamos os fenômenos, considera-se que existe um ângulo β que indica o deslocamento longitudinal solar a partir de um eixo de referencia (o equador) e que indica a posição solar para cada hora do dia. Então β é o ângulo horário relativo a principal posição solar $\beta=\pi/12\text{hour}\cdot t$ (onde t

representa uma hora do dia) aonde a principal posição solar t é a posição solar verdadeira, negligenciando a correção pela equação do tempo, que deve ser feita em função da latitude e ao azimute da abertura, por isto o β_n é um ângulo que indica a posição dos feixes, corrigido pela latitude e azimute.

Assim para um específico ângulo de hora β_0 subscrito “n”, (β_n) indica que o vetor da radiação solar é posicionado no plano de secção dos primas e é normal ao eixo longitudinal dos prismas. Para um específico ângulo η_0 subscrito “0” indica que ele abrange um ângulo β_n e a declinação solar $\delta=0^\circ$.

$$\eta_0 = -\arcsen\left(\frac{\cos \beta_n \cos \lambda}{\cos \varpi}\right) \quad (3.49)$$

O valor limite do ângulo η para um ângulo hora β_n , respectivamente o correspondente tempo solar local t_n . No correspondente tempo solar local t_n , os raios solares incidentes em ângulos $\eta > \eta_G$ são rejeitados e respectivamente ângulos solares $\eta < \eta_G$ são transmitidos. Para $\delta = \delta_G$ e $t \neq t_n$ os raios incidentes são rejeitados. A variação de tempo do período Δt durante a qual os raios solares incidentes são transmitidos aumenta (para declinações solares decrescentes) e começa no dia do ano para o qual $\delta = \delta_G$ abrange de 0 a 100% do período de insolação diário possível, com uma transição de aproximadamente 50 dias. O valor máximo possível, para o ângulo η , entre o vetor da radiação solar e a linha que intercepta o plano horizontal e o plano da seção do prisma para um ângulo horário β_n no solstício de verão é:

$$\eta_M = \delta_M + \eta_0 \quad (3.50)$$

O ângulo Ω (Figura 3.69) é escolhido de tal forma que nenhum feixe (η) com angulação $\eta > \eta_G$ (intervalo angular de aceitação de radiação para o interior- determinado no passo 1) possa incidir na superfície inferior (B) do painel prismático. Neste caso Ω tem que ser um ângulo com um valor no mínimo igual ou superior ao complementar de η_G

$$\Omega \geq \Omega_{\text{LIMITE}} = \frac{\pi}{2} - \eta_g \quad (3.51)$$

Se esta equação não for respeitada então os raios 1a e 1b da faixa angular $\eta_g \leq \eta \leq \pi/2 - \Omega$ incidirão na superfície inferior (B) com um pequeno ângulo de rotação φ que pode causar ofuscamento. Neste caso uma fração E_{LIMITE} da radiação solar total incidente no painel será admitida para o interior (LAAR, 2001). Diminuindo φ , evita-se que a luz incidente na parte inferior do prisma atravesse o painel. A fração E_I é determinada por

$$E_I = (1 - \rho) \frac{Z_a}{Z_c} \quad (3.52)$$

Onde: ρ é a refletância da superfície do painel que para raios incidentes muito chatos é fortemente dependente do ângulo de incidência e z_a/z_c onde z_c é a distância entre os prismas e z_a . A razão z_a/z_c é determinada por :

$$\frac{Z_a}{Z_c} = \cos \frac{\left(\frac{\eta + \Omega}{\cos \eta} \right)}{\frac{\sin \Omega}{\tan \theta + \cos \Omega}} \quad (3.53)$$

$(1-\rho)$ pode ser determinado pelas equações de Fresnel para painéis de material dielétrico, para ângulos de incidência $\gamma = \pi/2$.

$$1 - \rho = 2\varphi \frac{(\eta^2 + 1)}{(\eta^2 - 1)^{\frac{1}{2}} + 2\varphi\eta^2} \quad (3.54)$$

Sendo:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \gamma = \frac{\pi}{2} - \eta - \Omega \quad (3.55)$$

3.5.9 Filmes Prismáticos

Os filmes prismáticos são películas na quais são aplicados tratamentos para que o filme adquira propriedades ópticas especiais. Com características semelhantes aos prismas , mas com espessuras mínimas, os filmes podem ter incisões a laser ou partículas metálicas espalhadas. A *Building Research Establishment* (BRE) testou (AIZZLEWOOD, 1993) um sistema de filme prismático e um painel prismático redirecionador de luz (com ângulos de 45° e 90°). Para luz direta incidente (solstício de verão e equinócio) o filme prismático refratou a luz solar e iluminou o teto no centro do quarto. Comparado com outro modelo de referência com vidro comum houve um aumento nas iluminâncias no centro e no fundo, de 10 a 20%. Para baixas elevações solares (inverno) houve partes brilhosas no teto nas proximidades da abertura. Sob condições de céu coberto o painel prismático redirecionador de luz reduz os níveis de iluminância de 35 a 40% .

3.5.10 Sistema Huppe

O sistema Huppe consiste na sobreposição de painéis prismáticos e persianas semi-perfuradas. Medidas para painéis prismáticos da Siteco 45/45 combinados com sistemas de venezianas foram feitas pela Technical University de Berlim, Alemanha. O modelo em escala real foi equipado com um sistema desenvolvido pelo Huppe que consiste de uma primeira camada de painéis prismáticos para proteção solar e de uma segunda camada composta de venezianas perfuradas para redirecionar a luz difusa (Figura 3.73), com ambos os sistemas posicionados no interior da fachada, cobrindo toda a extensão da abertura (venezianas com 80mm de largura em ângulo de 45°). (KÖSTER, 2004)

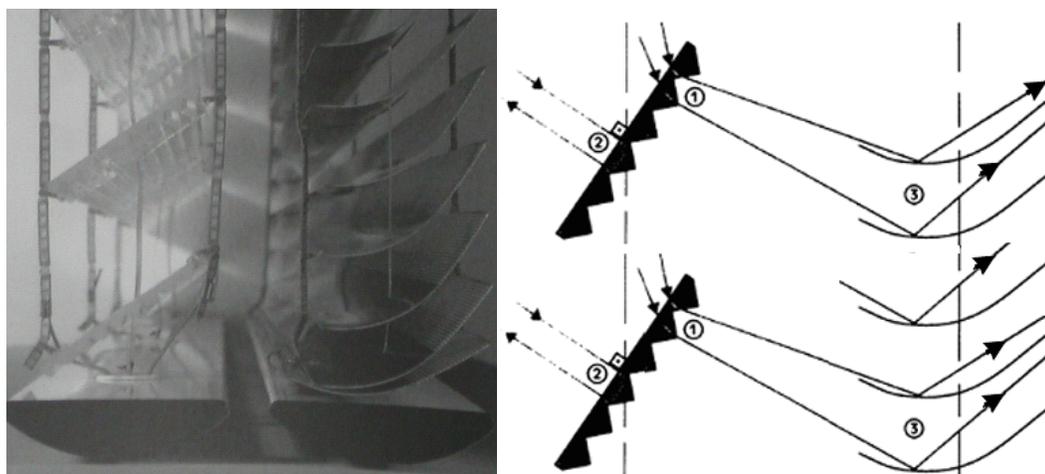


Figura 3.73 - Foto e esquema do Sistema Huppe. Fonte: KOSTER, 2004.

Sob condições de céu claro o sistema do Huppe aumenta os níveis de iluminância na maioria dos casos. O sistema também funciona como proteção solar mas devido a posição dos prismas o fator de sombreamento foi relativamente baixo, com o problema do sistema permitir uma vista extremamente reduzida do exterior. Para céu coberto a iluminância fica muito reduzida para este sistema, neste caso um sensor automático que ajuste as venezianas ou os prismas seria muito vantajoso. (KOSTER, 2004)

3.5.11 Laser Cut Panel

Em edifícios modernos normalmente não se verifica uma distribuição adequada de luz natural devido á configuração dos espaços cujos ambientes são muito profundos se comparados ás aberturas, desta forma o fluxo de luz vindo de uma única direção, de cima para baixo, que atinge as aberturas laterais não penetra efetivamente nas estruturas, sendo necessário o uso da luz elétrica durante o dia. O *Laser Cut Panel* (LCP) é um elemento de fechamento inovador, que combina as propriedades de deflexão da luz, sem perder excessivamente a transparência das aberturas, utilizando

princípios semelhantes aos dos prismas, e promete direcionar o fluxo de luz solar, de forma que a luz natural seja distribuída de forma mais eficiente. Projetado pelo Dr. Ian R. Edmonds, na Austrália, este elemento, de espessura semelhante à do vidro convencional, é produzido cortando-se uma placa de acrílico, com um laser especial de dióxido de carbono. O laser promove cortes finos fundindo o material e produzindo superfícies internas altamente refletivas que mediante a refração e reflexão interna total redirecionam a luz solar direta, otimizando sua distribuição, Figura 3.74a.

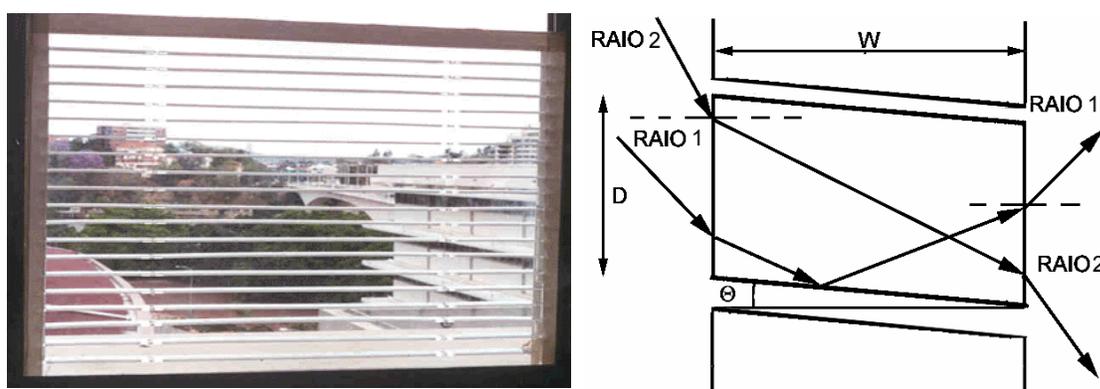


Figura 3.74 – (a) Vista de um Painel de Corte a Laser em instalação tipo veneziana.
(b) Secção de um LCP. Fonte: EDMONDS, 1991

Existem duas possibilidades para os feixes de luz que atravessam um LCP, (Figura 3.74b) eles podem ser defletidos (raio 1) ou podem ter um comportamento semelhante aos feixes que atravessam um vidro comum (raio 2). Ao projetar um LCP, portanto, a condição ótima seria se 100% da luz que atravessa o painel tivesse o comportamento do raio 1.

A luz que entra pelo paralelepípedo retangular com um ângulo (i_1) pode sofrer reflexão interna total na face adjacente e ser defletida com um ângulo menor (r_2), conferindo portanto a luz um alcance maior para interior. A quantidade de luz defletida para o interior depende da inclinação dos cortes na placa (θ), da profundidade dos mesmos (W), da distância que haverá entre eles (D) e do índice de refração do material (n) Figura 3.75. A análise destes parâmetros é fundamental para determinar a geometria capaz de defletir a luz da forma mais eficiente para uma dada latitude, garantindo um ambiente livre de ofuscamento.

3.5.11.1 Elevação da Fração Defletida para cada Ângulo de Incidência

Implementar este tipo de dispositivo numa abertura significa potencializar a utilização da luz natural. A técnica de controle solar, consiste na mudança da trajetória dos raios solares que mediante a passagem pelo LCP invertem sua direção e atingem o teto, espalhando-se de forma difusa pela sala. As propriedades ópticas relevantes do LCP são o ângulo de deflexão da luz, a fração da luz defletida para um dado ângulo de incidência, e a divergência dos feixes que dependem da geometria do painel utilizado, suas dimensões (D e W , distância entre os cortes e espessura da placa acrílica), inclinação do cortes (θ) e n , o índice de refração do material (Figura 3.75a), (EDMONDS, 1991a).

Para evitar que algum impacto negativo, como o ofuscamento, possa ocorrer, o LCP deve ser projetado acuradamente. A metodologia necessária para calcular os ângulos de deflexão e a quantidade de luz defletida pode ser encontrada na patente do LCP (EDMONDS, 1991a, EDMONDS, 1991b;) e as equações de destaque são reportadas a seguir.

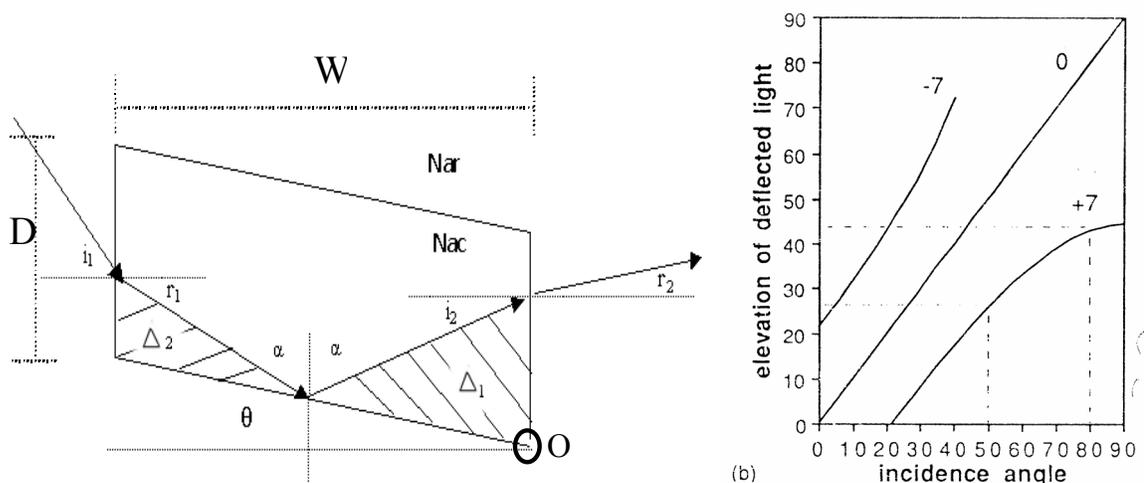


Figura 3.75- (a) Corte transversal de um LCP. (b) Elevação da luz defletida em função do ângulo de incidência. Fonte: EDMONDS, 1991

Se considerarmos um feixe de luz que incida perpendicularmente ao LCP (i_1), ou seja no plano onde foi realizada a secção, o raio incidente na segunda face (i_2) é dado por,

$$i_2 = r_1 - 2\theta \quad (3.56)$$

Assim o raio defletido, r_2 , é dado por,

$$r_2 = \arcsen (n \sen (r_1 - 2\theta)) \quad (3.57)$$

Na Figura 3.75 b, a variação de r_2 é mostrada para três painéis com diferentes ângulos de corte ($\theta=-7^\circ$, $\theta=0^\circ$, $\theta=+7^\circ$). Comparativamente, valores positivos de θ , (os cortes rotacionados para baixo dentro do ambiente) resultam numa deflexão da luz mais profunda no ambiente como pode ser visto pelas linhas tracejadas

3.5.11.2 Fração Defletida para cada Ângulo de Incidência

Existe um intervalo angular, de ângulos de incidência, para o qual 100% da luz é defletida de forma que os raios se comportam como o raio 1 da Figura 3.74b. Se, como mostrado na **Figura 3.76** a, a luz incidir no canto superior do paralelepípedo, com um ângulo, i_{\min} , de fora que os raios refratados atinjam o canto inferior, toda a luz incidente para este ângulo de incidência, será defletido

Os ângulos i_{\min} e r_{\min} são respectivamente os ângulos de incidência mínimo e de refração mínimo, para os quais toda a luz incidente (100%) é defletida pelo elemento para um determinado ângulo, para o interior. De acordo com a **Figura 3.76a** vem que,

$$\tan r_{\min} = \frac{D + W \tan \theta}{W} = \frac{D}{W} = \tan \theta \quad (3.58)$$

Como o ângulo de incidência aumenta, toda a luz incidente é defletida até que o raio incidente no canto inferior do elemento de acrílico seja refratada e refletida

internamente para o canto superior do elemento como mostrado na **Figura 3.76b**. Assim, é possível definir o ângulo máximo de refração, r_{\max} e utilizando a Lei de Snell o ângulo máximo de incidência i_{\max} , para o qual toda a luz é defletida.

$$\frac{(D - W \tan \theta)}{W} = \tan i_2 = \tan (r_{\max} - 2\theta) \quad (3.59)$$

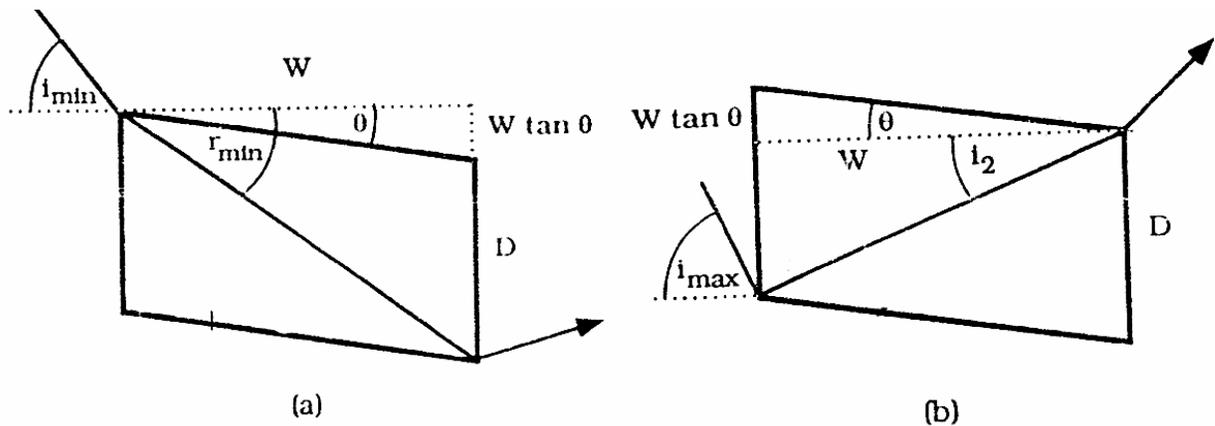


Figura 3.76– Direção dos feixes que determina os ângulos máximos e mínimos da faixa angular para a qual toda a luz é defletida. Fonte: EDMONDS 1991a.

Para $i < i_{\min}$ a fração defletida é dada por:

$$fd = \frac{(W \tan r_1 - W \tan \theta)}{D} = \frac{(\tan r_1 - \tan \theta)W}{D} \quad (3.60)$$

e para $i > i_{\max}$ a fração defletida é dada por:

$$fd = 1 - \frac{\{W[\tan(r_1 - 2\theta) + \tan \theta] - D\} \cos(r_1 - 2\theta)}{D \cos r_1} \quad (3.61)$$

Quando $\theta = 0^\circ$ a fração defletida se $i < i_{\min}$ se torna:

$$fd = \frac{W \tan r_1}{D} \quad (3.62)$$

e se $i > i_{\max}$ a fração defletida pode ser obtida por:

$$fd = 2 - \frac{W \tan r_1}{D} \tag{3.63}$$

A variação da fração defletida devido á relação da espessura com a altura dos cortes do painel (D/W) é mostrada em função do ângulo de incidência para $\theta=0^\circ$ (Figura 3.77a) e $\theta=7^\circ$ (Figura 3.77b). Assim para um painel com $\theta=0^\circ$ um painel de razão 0.3 será capaz de defletir 100% da luz quando o ângulo de incidência for de aproximadamente 25° , para um painel de razão $D/W= 0,5$ apenas ângulos de incidência de 45° serão defletidos em sua totalidade e para razão $D/W=0,7$ o mesmo acontecerá apenas para ângulos de incidência de 60° (Figura 3.77 a). No caso de um LCP com $\theta=7^\circ$ é possível notar que existe um intervalo de ângulos para os quais a luz será 100% defletida, sendo que o intervalo varia de acordo com a razão das dimensões do painel. Assim para uma razão $D/W=0,3$ o intervalo reside entre 35° e 38° , para $D/W= 0,5$ o intervalo varia de 50 a 60° e para $D/W= 0,7$ todos os ângulos incidentes acima de 70° serão 100% defletidos

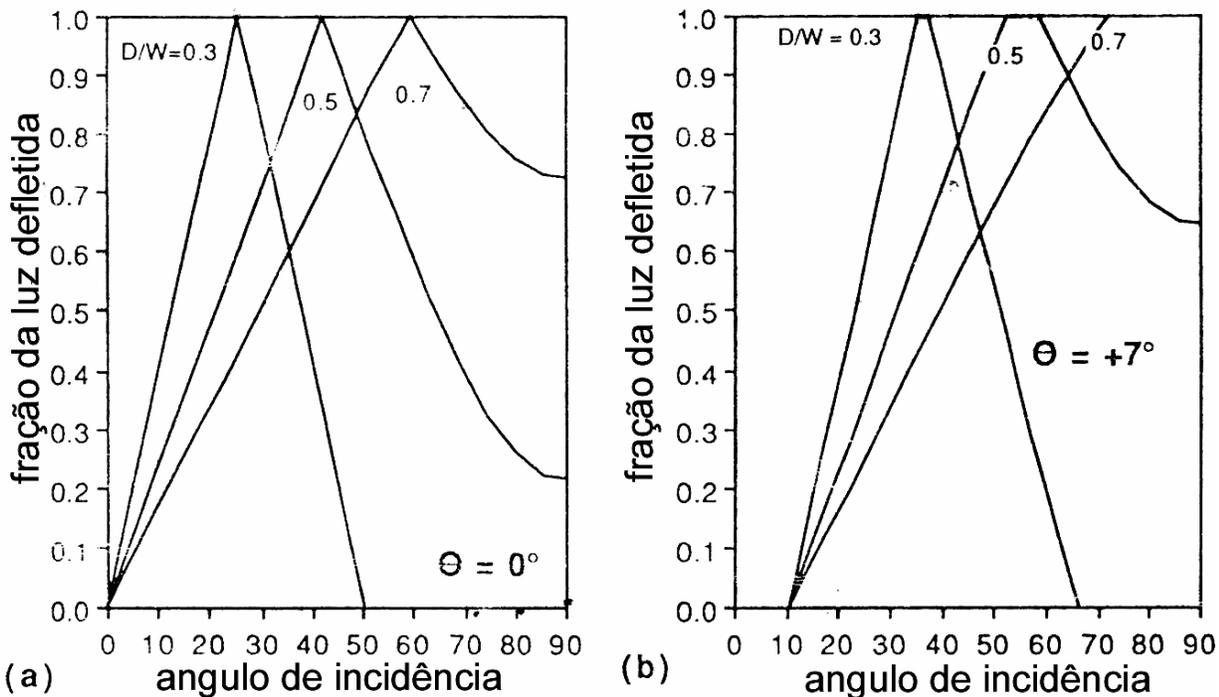


Figura 3.77 Fração da luz defletida para o um elemento retangular $\theta=0^\circ$ e para inclinadas $\theta=7^\circ$, para diferentes padrões geométricos de altura e espessura do painel (D/W). Fonte: Edmonds, 1991

Com o uso da planilha foi possível observar que para um $\theta=0^\circ$ existe somente um ângulo de incidência solar ($i=35^\circ$) aonde 100% da radiação solar é defletida para o interior, para outros ângulos de corte (θ), existirá um intervalo no qual 100% da radiação estará sendo refletida para o interior, com um ângulo de incidência mínimo (i_{\min}) e máximo (i_{\max}) de aceitação (Figura 3.78). Por exemplo, como pode ser observado pela Figura 3.78, para um LCP, $\theta=10^\circ$, ângulos de incidência solar no intervalo entre 48° e 55° estarão sendo defletidos para o interior em sua totalidade.

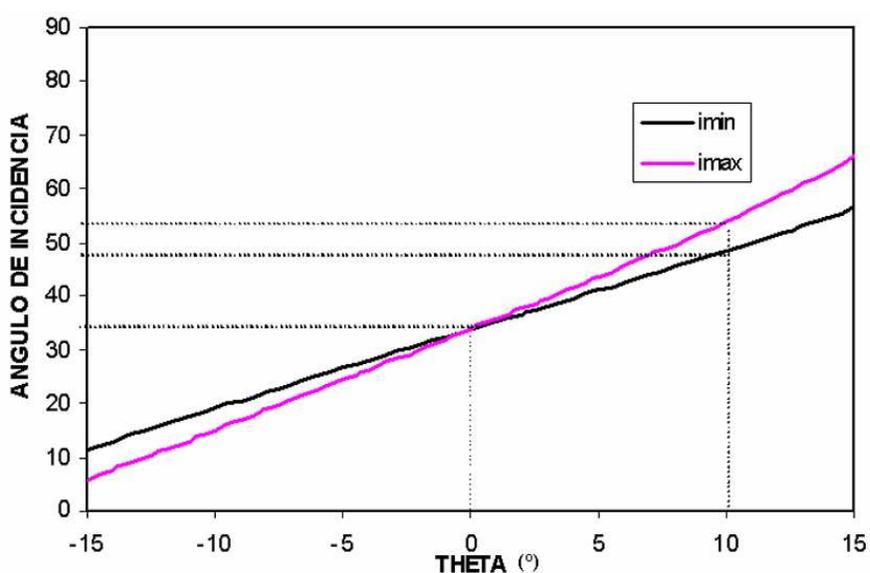


Figura 3.78 - Intervalo angular para o qual 100% da radiação é defletida para o interior do ambiente com $D=4\text{mm}$ e $W=10\text{mm}$. Fonte: do autor.

3.5.12 Channel Panel

Este dispositivo, criado pelo Dr. Ian R. Edmonds, ainda em desenvolvimento, representa um outro desdobramento da teoria do Laser Cut Panel. O novo sistema, composto por duas placas de LCP justapostas, tem como vantagem que os cortes das placas fica em ambas as direções (thetas positivos e negativos) portanto o painel seria eficiente tanto para alturas solares maiores como para alturas solares menores.

O *Channel Panel* permite a passagem da luz através do painel de forma que os feixes provenientes de elevadas alturas solares são redirecionados para o fundo do ambiente. Para baixas alturas solares a luz também é redirecionada, no entanto possui menor alcance, neste caso o funcionamento torna-se vantajoso pois os feixes que normalmente ofuscariam observador são redirecionados para o teto, nas proximidades da abertura.

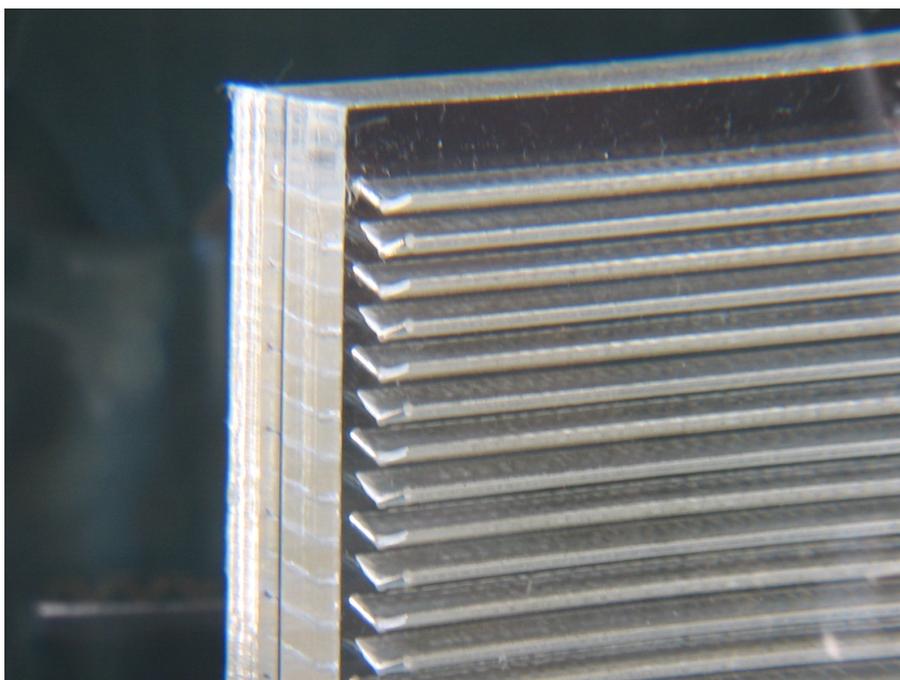


Figura 3.79 – Vista de um canto do Channel Panel, mostrando as duas placas de acrílico sobrepostas, com suas respectivas lamelas reflexiva

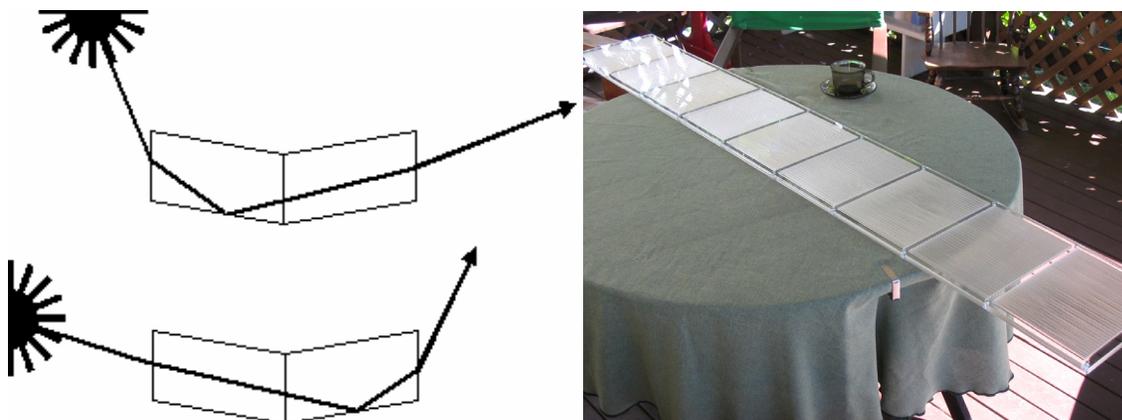


Figura 3.80 – Funcionamento do Channel Panel para diferentes alturas solares

3.5.13 *Light Guiding Shade*

O “Light Guiding Shade” (LGS), consiste em um brise externo com uma abertura na borda exterior da face superior, cujo fechamento é um vidro difusor. O brise é composto de um refletor planar na parte superior interna, e um refletor parabólico na parte mais baixa, desenhado para direcionar a luz difusa vinda da abertura de entrada, Figura 3.81. Este refletor côncavo segue os mesmos princípios dos refletores anidólicos (EDMONDS, 1990), que servem para concentrar a luz difusa da abobada e concentrá-la para que esta seja direcionada num determinado sentido. A luz passa então através do corpo do brise e se espalha para dentro do edifício de forma que a luz que sai do dispositivo obtenha uma faixa angular específica e predeterminada, (EDMONDS e GREENUP, 2002).

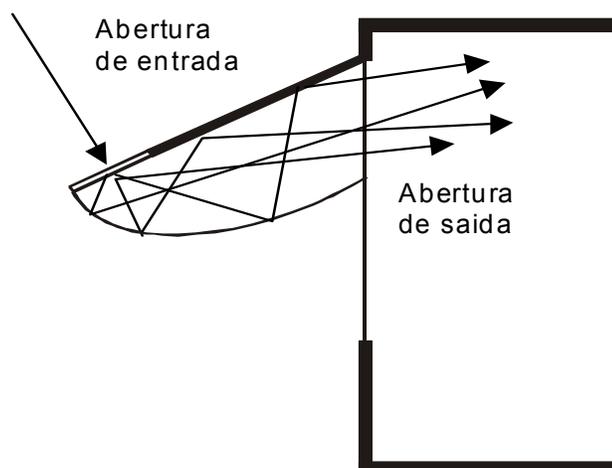


Figura 3.81 - Light Guiding Shade. Fonte: EDMONDS e GREENUP, 2002

Normalmente a faixa angular é desenhada com o objetivo de estender raios vindos da horizontal para uma elevação de 60°. A mais baixa elevação é estabelecida como sendo a horizontal para evitar que qualquer tipo de ofuscamento atinja os usuários (se o sistema fica acima da linha da visão). Deste modo para os ocupantes a abertura superior do LGS parece escura. O LGS é fixado sobre a abertura da mesma forma que um brise externo convencional e age tanto como sendo um brise que reduz o ganho de calor radiante quanto um dispositivo de distribuição de luz natural. A luz solar

incide sobre o LGS numa ampla faixa de angulações. No entanto como a abertura de entrada está difundindo, não existe dependência da direção da luz de entrada que por sua vez não é transferida para a luz de saída, que permanece constante. Como a luz que entra através da abertura de entrada é difusa, é possível usar os princípios da non-imaging optics (WELFORD AND WINSTON, 1978) para desenhar os refletores que guiam a luz de forma que a luz que sai seja direcionada para uma faixa de ângulos predeterminada (EDMONDS, 1992).

Este dispositivo acopla os princípios dos sistemas anidólicos com aqueles referentes a placa acrílica LCP. A faixa angular de saída pode ser menos ou mais larga de acordo com o desejado. No entanto as restrições da termodinâmica implicam que a faixa angular de saída requer um guia de luz refletor longo e uma pequena abertura de entrada para porcentagem de abertura e saída. Por isto para uma faixa de saída estreita que direciona a luz precisamente e profundamente para o interior do espaço o sistema fica restrito a coletar somente uma pequena fração da luz incidente no brise e o potencial para uma maior contribuição para distribuição da luz solar fica limitada. É necessário um compromisso entre a precisão com a qual a luz é direcionada para dentro do espaço e a quantidade e luz que é redirecionada. Contudo que a contribuição da luz natural seja mínima, em espaços severamente sombreados, o melhor compromisso é direcionar a luz para uma faixa angular de saída relativamente larga e utilizar a mais larga abertura de entrada possível para a proporção de abertura de saída aproximadamente de 1 para 2, para maximizar a entrada de luz (EDMONDS, 1990).

3.5.14 Filmes Holográficos

Os filmes holográficos, desenvolvidos na Alemanha por Helmut Muller, diferentemente dos filmes prismáticos, mudam a direção dos raios da luz incidentes

pelo princípio de difração. Por ser sensível ao comprimento de onda da radiação incidente este filme plástico permite bloquear a radiação ultra-violeta e, dependendo do tratamento que recebe também pode evitar a entrada de infra-vermelhos. O filme Holográfico funciona bem na presença de radiação solar direta e para elevados ângulos de irradiação como mostram estudos realizados pela Harvard University de Cambridge (TORRICELLI, SALA e SECCHI, 1995). A desvantagem deste sistema está ligada principalmente a decomposição do espectro da luz que proporciona a reflexão de manchas de cor no teto e nas paredes. Parece, no entanto que a sobreposição de vários filmes possa acabar com este efeito, ainda não são produzidos em grande escala no mercado internacional.



Figura 3.82 - Brise de vidro com filme holográfico “Daylight Guidance Systems”, David Carter Society of Light and Lighting, East Anglia Region 2004. Fonte: KOSTER, 2004

Uma equipe de arquitetos do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Gerd Ackermann’s desenvolveu um dispositivo de deflexão da luz, semelhante a uma prateleira externa, que consiste em uma serie de painéis horizontais largos, um estilo de brise mais largo, feito de vidro e cobertos com um filme reflexivo semi-transparente. Este dispositivo pode ser rotacionado ou pode ser acoplado a um processador para que os brises acompanhem a trajetória solar. Aparentemente de vidro e portanto transparentes em quase sua totalidade, estes brises tem uma transmissão elevada da luz para radiação solar direta e portanto são necessárias outra proteções para evitar o ofuscamento e desta forma o efeito de redirecionamento da luz torna-se reduzido se o painel for instalado em toda a fachada (Figura 3.82). Testes mostraram que sob

condições de céu coberto e na posição horizontal os brises alcançam o seu maior desempenho (KÖSTER, 2004).

3.5.15 Serraglaze

O Serraglaze (Figura 3.83) é um painel acrílico que possui em seu interior uma serie de prateleiras de luz microscópicas que melhoram o desempenho luminoso da abertura, embora conservem a vista para o exterior. Esse painel aumenta os níveis de iluminação naqueles espaços mais profundos do ambiente, reduzindo o ofuscamento nas proximidades das janelas e distribuindo de maneira mais uniforme a luz solar. (MILNER, 2001)

Este processo óptico envolve refração e reflexão é extremamente eficiente por não apresentar dispersão de cores, o que pode se verificar com outros dispositivos de iluminação natural. O painel é transparente e suas lamelas microscópicas direcionam a luz para o teto, de acordo com o desenho do próprio painel, com um efeito que pode ser simulado e predito por um software de “Ray-tracing” que foi desenvolvido para tal simulação.

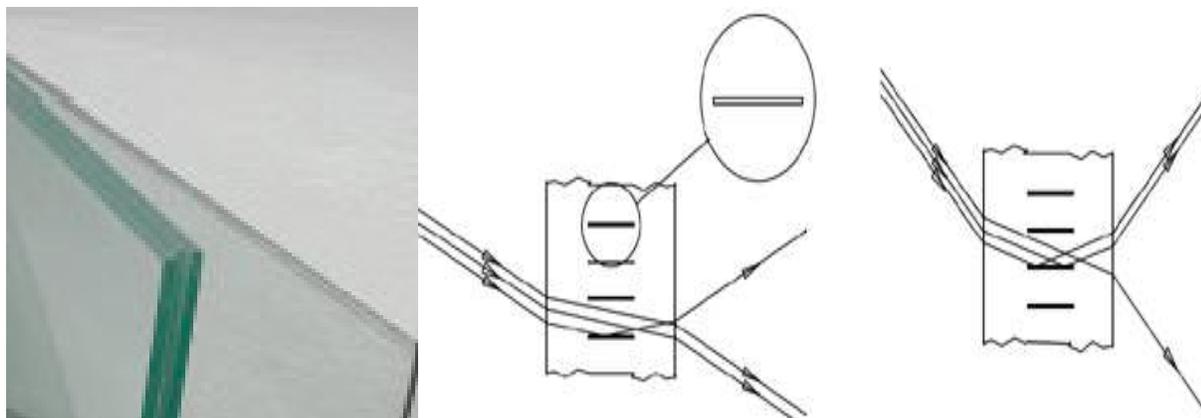


Figura 3.83 - A esquerda sistema Serraglaze. “High-Performance Commercial Building Façades”. A direita, corte esquemático do funcionamento dos vazios

A luz vinda de angulações solares mais baixas, portanto mais horizontais, que normalmente já penetram mais profundamente no ambiente, passa através do painel sem ser redirecionada, em contraste, a luz vinda de angulações maiores, que normalmente é desperdiçada por incidir apenas no chão logo abaixo da abertura, causando freqüentemente ofuscamento, é interceptada e redirecionada para o interior do espaço aonde a luz é mais necessária, Figura 3.83.

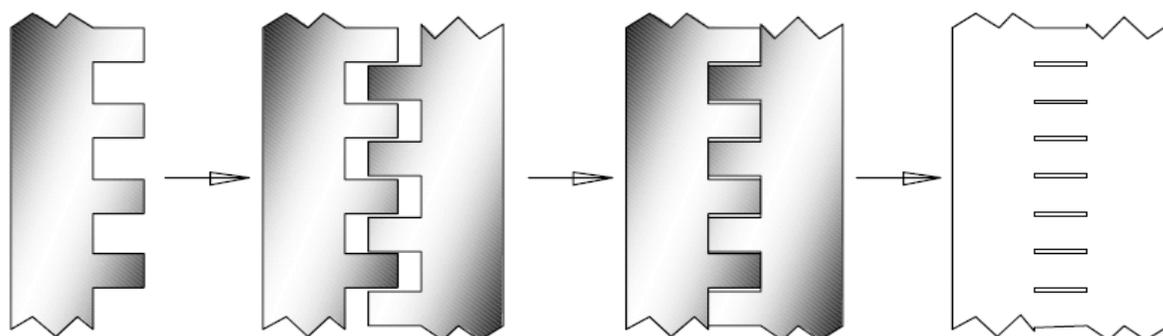


Figura 3.84 - Esquema de montagem de placas acrílicas sobrepostas, formando o dispositivo.
 Fonte: <http://www.serraglaze.redbus.co.uk>

O SERRAGLAZE é um painel que contém uma série de vazios microscópicos em seu interior graças à junção de duas placas, Figura 3.84. As facetas internas ao redor do vazio interceptam e redirecionam uma parte da luz incidente no painel, por reflexão interna total, sem precisar, portanto de nenhum tratamento com prata para alcançar as propriedades de reflexão. Os vazios possuem 10microns de espessura e 0,3mm de comprimento. A folha prismática que compõe o SERRAGLAZE é produzida por uma técnica de manufatura conhecida como micro-replication. Com esta técnica um modelo piloto é inicialmente preparado utilizando-se uma ferramenta de corte com ponta de diamante utilizada em função da alta precisão. O protótipo modelo é então usado para criar replicas que servem como dispositivos para a manufatura das folhas prismáticas de SERRAGLAZE.

O processo de manufatura em si pode ser um tipo de compressão modular que limita o tamanho à 1m². Este painel deve ser utilizado entre vidros e tem bom desempenho tanto se utilizado em toda a abertura quanto se utilizado somente na parte

superior, permitindo vista para o exterior. Para redirecionar de forma ótima a luz solar direta, expor o coletor solar, inclinando-o para fora do plano da fachada aumentará os níveis de iluminação no interior do espaço. Para fachadas leste e oeste é recomendável a utilização de venezianas acopladas ao SERRAGLAZE, pois este elemento transforma a performance das venezianas que normalmente tornam o ambiente escuro. Os painéis podem ser projetados com vários desenhos e angulações para atender as necessidades de cada espaço, Figura 3.85 (BUILDING TECHNOLOGIES PROGRAM, 2002).

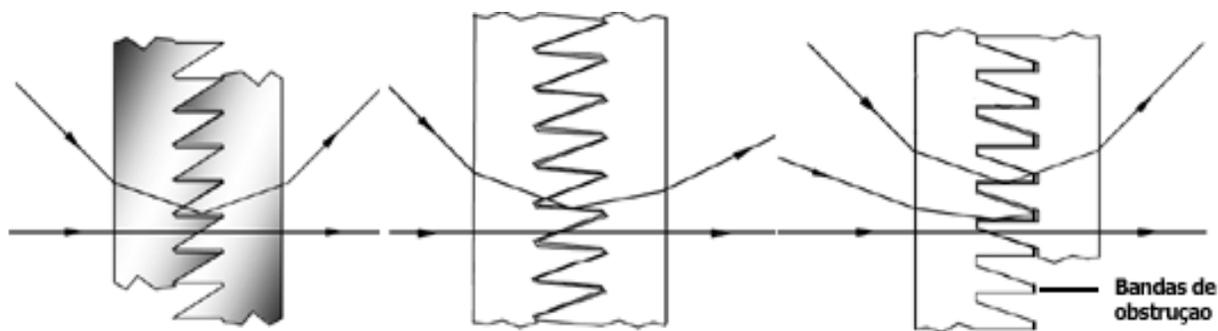


Figura 3.85 - Possíveis desenhos do dispositivo em função dos diferentes desempenhos luminosos a serem alcançados. Fonte: <http://www.serraglaze.redbus.co.uk>

3.5.15.1 Bases Teóricas

O SERRAGLAZE (MILNER, 2002) é um componente óptico composto por dois painéis acrílicos posicionados face a face, (Figura 3.86), cada um possuindo uma face lisa (1) e outra com ranhuras (2), onde se encontram reentrâncias (4) e saliências (3), cujo formato permite que os painéis se toquem em algumas facetas (5, 6, 7) e não em outras (9, 10) de forma que se crie uma cavidade (11) entre a junção das faces horizontais dos painéis. É mediante a reflexão nas facetas destas cavidades que acontece a reflexão interna total, para alguns ângulos, devido aos diferentes índices de refração dos materiais (acrílico e ar).

A Figura 3.86 mostra um corte representativo, sendo que a espessura da placa é de apenas alguns milímetros e a distância entre uma saliência e uma reentrância (P_p)

é da ordem de grandeza da pupila humana (1mm), podendo ser menor. Também é possível observar como a reentrância (4) e ranhura (2) de dois painéis diferentes (A e B) se encaixam criando o sistema óptico. Cada reentrância (4) é definida por duas faces paralelas (9,10) e duas faces inclinadas (7 e 8) sendo que enquanto uma face (7) possui uma leve inclinação em relação a face lisa do painel (1) e a face (8) é mais inclinada (cerca de 45°). As faces (5,6) (que representam as angulações das ranhuras (3) e, portanto a porção saliente do encaixe) possuem as mesmas angulações das faces das reentrâncias (5B, 6B), no entanto, pelo fato da espessura das ranhuras (3) ser levemente menor que a espessura das reentrâncias (4), forma-se uma bolsa de ar entre elas, na junção de duas placas (A e B) que é responsável pela reflexão interna total.

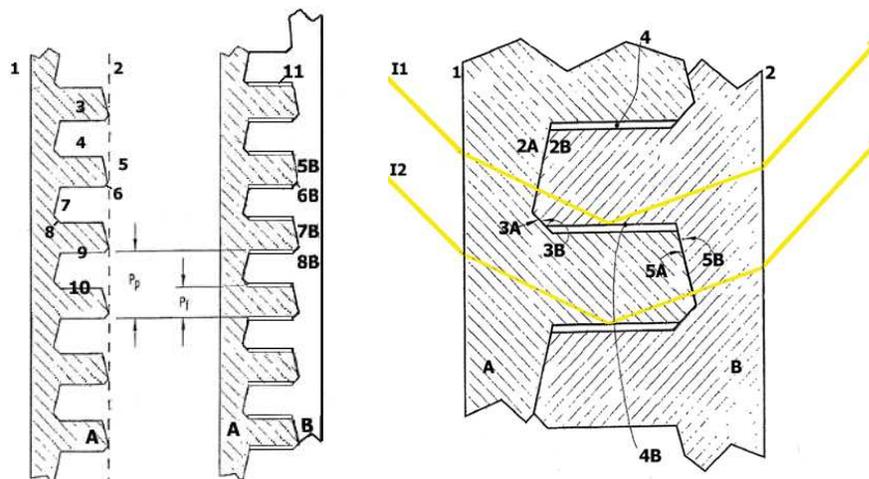


Figura 3.86 - A esquerda, Corte de um painel simples e sobreposição de dois painéis, formando o dispositivo de iluminação natural. A direita, Detalhe em escala aumentada do SERRAGLAZE.

Fonte: MILNER, 2002

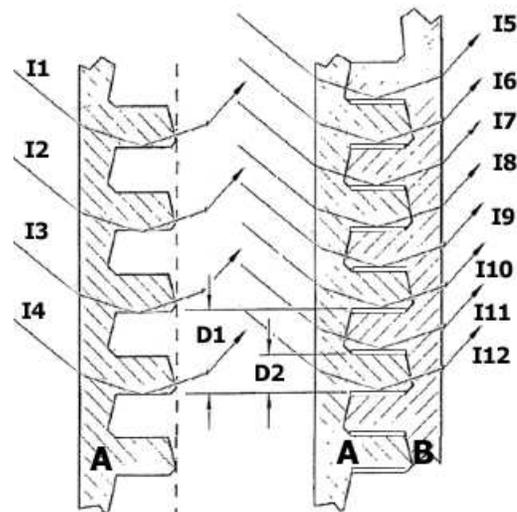


Figura 3.87 - Representação dos feixes incidentes no painel para uma placa simples e para uma placa composta. Fonte: MILNER, 2002

A Figura 3.87 apresenta um detalhe em escala aumentada que mostra o comportamento dos feixes de luz (I1 e I2) que incidem no SERRAGLAZE. Como pode ser visto os feixes de luz I1 e I2 incidentes na face maior (1) do componente óptico (A) são refratados nesta face ao atingir o dispositivo. Prosseguem sua trajetória sem ser desviados, passando através da interface definida pelas superfícies inclinadas (2A) e (2B) para somente então sofrer reflexão interna total na interface definida pela superfície (4B) que delimita o vazio entre os elementos, a cavidade interna (4). Em seguida o feixe continua para a face (2) do corpo (B) onde é refratada novamente para uma direção de saída representada pela seta. Note-se que o feixe I2 também não sofre deflexão ao passar pelas faces (5A) e (5B).

Esta forma de acoplamento dos painéis torna possível aumentar o desempenho de um painel que possua ranhuras e reentrâncias de uma determinada altura D1. Isto se verifica porque a reflexão interna total, indispensável para o redirecionamento dos raios acontece somente quando o feixe passar de um meio com índice de refração maior (acrílico) para um meio com índice de refração menor (ar). Portanto o encaixe das placas permite que a reflexão ocorra em cada cavidade, devido ao espaço preenchido de ar que se forma quando os dois painéis são sobrepostos. Conseqüentemente enquanto para um painel simples (A) somente uma superfície da cavidade forma

efetivamente a interface refletora, (I1, I2, I3, I4) para o painel composto (A e B) todas as faces horizontais se tornam refletoras. Como pode ser visto na Figura 3.87, se o painel for simples, haverá deflexão de quatro raios enquanto para um painel composto, de mesmas dimensões, oito feixes serão redirecionados (I5, I6, I7, I8, I9, I10, I11, I12).

Na Figura 3.86 as faces (9,10) das reentrâncias (4) são paralelas, no entanto estas podem possuir outros formatos ou outras angulações (Figura 3.88). A inclinação das faces faz com que os raios cheguem no interior com angulações diferentes, isto quer dizer que os feixes ao invés de saírem paralelos como na Figura 3.87 (I1, I2) sairão com trajetórias diferentes, o que não compromete o desempenho do dispositivo enquanto a luz refletida é difundida em uma área maior.

Em todas as formas mostradas existe uma porção da luz incidente que pode passar através do componente óptico e criar imagens ou formas distorcidas. O problema maior se verifica se esta imagem for a do sol refletida pelo painel, pois isto criaria ofuscamento dentro do ambiente. Principalmente para formatos que tenham uma faceta (f) como aquela que apresenta na Figura 3.88, pois a luz incidente neste ponto poderia ser defletida para o interior com uma angulação não desejada. Esta figura também apresenta (à direita) um formato mais suave para as faces internas que diminuiria este efeito. Outra forma de mitigar o problema é assegurando que pelo menos algumas das superfícies elementares do componente não sejam transparentes de modo a inibir a transmissão da luz que esteja dentro de uma certa faixa angular. É possível se alcançar esta meta tratando as superfícies de modo que estas fiquem translúcidas ou opacas mediante certo polimento ou ainda é possível aplicar coberturas ou películas. No entanto desta forma o painel poderia deixar de ser transparente, sendo portanto a solução aplicar em diferentes densidades as coberturas para cada faceta.

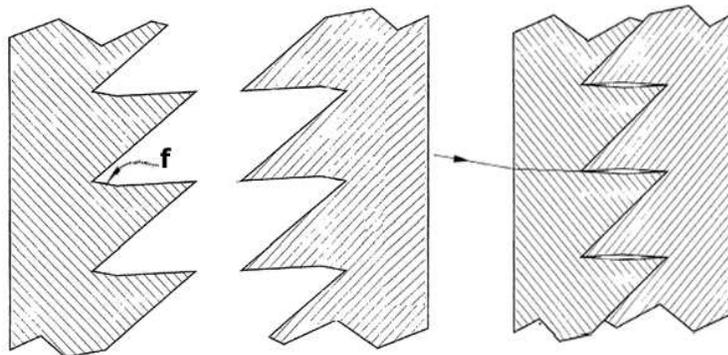


Figura 3.88 - Placas com encaixe triangular. Fonte: MILNER, 2002

Na Figura 3.89, uma seção transversal de uma abertura de um edifício onde algumas aplicações dos painéis e seus efeitos são relatadas. Na figura 4.53 A, o perfil baseia-se num muro (12) com uma abertura (13) onde um painel SERRAGLAZE (14) foi rotacionado com um ângulo α e o fechamento inferior (15) da abertura foi realizado com um painel de vidro simples. Nesta configuração a luz representada pelo feixe I_D passaria através do painel sem ser defletida numa determinada faixa angular (feixe tracejado), para ser defletida para o teto, se em angulações maiores (I_e). Esta configuração precisaria ser incorporada à estrutura do edifício e portanto ser estabelecida na etapa inicial de projeto.

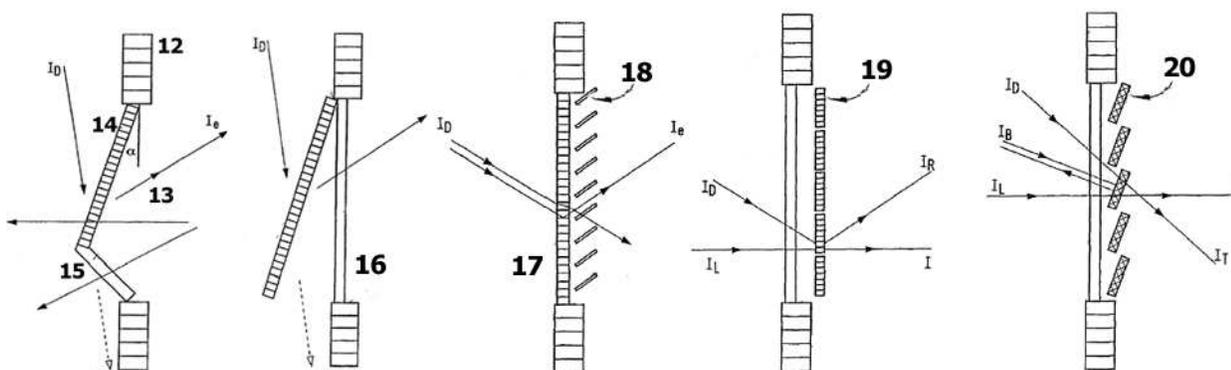


Figura 3.89 -A, B, C, D, E – Diferentes formas de aplicação para os painéis de SERRAGLAZE. Fonte: MILNER, 2002

Um efeito similar pode ser obtido, como mostrado na Figura 3.89 B, suspendendo o painel na frente da abertura, neste caso fechada por um vidro plano, convencional (16). Este formato é ideal caso seja necessário adaptar um painel a um

edifício já existente desde que o objetivo seja coletar o máximo de luz disponível para o interior do edifício. Os feixes (ID) vindos de elevadas altitudes solares que atingem o painel são redirecionados para o fundo do ambiente. Em circunstâncias onde há excesso de luz podem ser incorporadas venezianas (18) para barrar os raios que vierem de angulações indesejadas, (ID). A desvantagem de usar as venezianas é a redução dos níveis de iluminação no interior devido à perda de uma quantidade de luz que será excluída pela propia veneziana. Se ao invés de usar uma placa fixa e continua (17) forem utilizados painéis pivotantes no eixo horizontal (19) a direção da luz transmitida pode ser variada de acordo com as necessidades ao rotacionar os painéis. Se houver necessidade também podem ser utilizados os painéis com coberturas ou películas nas cavidades (20) que poderão excluir certos ângulos solares (IB) e admitir outros.

3.5.16 Prateleira de Luz

A utilização deste componente na fachada (para impedir o acesso da luz solar direta e para redirecionar os raios solares incidentes para o teto) representa um dos sistemas mais difusos para controle da iluminação natural. O princípio de base é a utilização do teto e das paredes laterais dos ambientes como superfícies difusoras da luz vinda do exterior. Os feixes são refletidos pela parte superior de uma lamina plana ou curvada; de forma a obter, no interior, maior uniformidade luminosa, reduzindo ao mesmo tempo os problemas de superaquecimento e de ofuscamento, este ultimo causado pelo contraste entre o ambiente e pelo excesso de luminosidade que banha as superfícies iluminadas diretamente pelos raios solares.

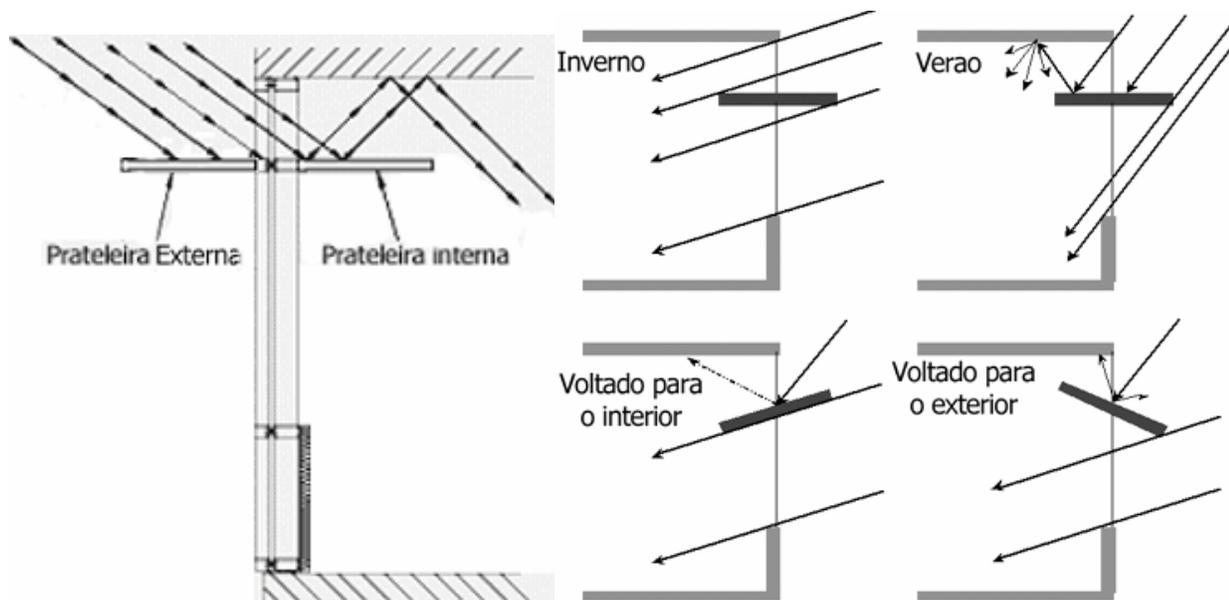


Figura 3.90 - (a) Corte esquemático de uma Prateleira. (b) Tipologias de prateleiras de luz.
Fonte: IEA, 2000

A prateleira de luz pode ser rotacionada e posicionada no exterior ou no interior do ambiente ou em ambas as partes (Figura 3.90a). Normalmente é posicionada acima do nível do olho, dividindo desta maneira a abertura em duas partes que podem ser tratadas de diferentes maneiras, adquirindo assim funções diferentes. Enquanto a parte superior trata da iluminação, a parte inferior pode ser utilizada para ventilação ou para manter o contato com o exterior, sendo que várias combinações podem ser feitas tendo este conceito em mãos (LITTLEFAIR, 1995).

Prateleiras rotacionadas para baixo (Figura 3.90b) sombreiam as áreas aos arredores da abertura e reduzem a quantidade de luz refletida para o teto. Prateleiras rotacionadas para cima melhoram a penetração da luz, mas reduzem o efeito de sombreamento. Prateleiras externas a fachada reduzem a carga térmica que o edifício adquire devido ao maior sombreamento que proporcionam. Com prateleiras internas haverá um aumento na transmissão da luz solar através da parte superior da prateleira que irá produzir uma iluminação no ambiente melhor que aquela dada por um dispositivo de sombreamento que cubra toda a abertura tais como brises. Como desvantagem das prateleiras comuns aparece a necessidade de manutenção constante, devido a depósito de poeira, neve ou eventuais animais ou insetos que

possam ali se instalar. Isto em função da necessidade de se manter as propriedades refletoras das superfícies (IEA, 2004).

Uma prateleira convencional tem aplicações limitadas para altas latitudes pois são necessários outros dispositivos de sombreamento durante a maior parte do ano. Para climas ensolarados ou baixas latitudes, a prateleira irá proteger as áreas próximas a abertura com apenas uma leve queda na distribuição da luz, no entanto é importante ressaltar que mesmo aquelas com películas especulares não atinge 60% de refletância. Com a finalidade de reduzir a carga térmica a prateleira externa é o melhor compromisso entre as necessidades de sombreamento e de iluminação (BAKER e STEEMERS, 2002).

As prateleiras internas tanto com superfícies semi-reflexivas como com superfícies semitransparentes, não aumentam a uniformidade da distribuição da luz natural e não protegem a área próxima a abertura da radiação direta. Para baixas altitudes solares são necessárias proteções adicionais para evitar o ofuscamento (BAKER e STEEMERS, 2002).

O desempenho das prateleiras no que diz respeito a luz solar direta para elevadas altitudes solares depende do tamanho e da forma das prateleiras de luz. Um formato convexo irá rejeitar a maioria da luz incidente vinda de levadas altitudes solares e irá admitir a luz vinda de baixos ângulos. O efeito geral da prateleira externa é reduzir os níveis de iluminação nas proximidades da janela em função do sombreamento que esta causa, diminuindo portanto o contraste entre a primeira e a segunda metade do espaço. Esta redução está concentrada na área próxima a abertura sendo que no fundo do ambiente os níveis quase não sofrem alteração, mesmo se forem utilizadas prateleiras de 2m de profundidade (LITTLEFAIR, 1995).

As prateleiras também podem se valer de sistemas ópticos avançados para redirecionar a luz para as partes mais profundas do ambiente onde, com uma abertura convencional, a luz natural não alcançaria. Por afetarem a estrutura e a arquitetura do edifício é preferível que sejam desenhadas numa fase inicial do projeto principalmente porque necessitam de um pé-direito relativamente alto para desempenhar sua função

de maneira eficiente. Como todo dispositivo de iluminação natural, precisam ser projetadas de acordo com a latitude, a orientação da fachada e as configurações específicas do edifício e de suas obstruções vizinhas. Para este princípio inicial, funcionam de forma eficiente se utilizadas para redirecionar a luz solar direta, no entanto tem pouca eficiência para climas onde ha predominantemente céus encobertos. Também devem ser utilizadas preferencialmente para fachadas leste e oeste de forma a funcionar durante a maioria das horas do dia, em função da trajetória do sol.

A orientação, a posição na fachada e a profundidade da prateleira devem ser um compromisso entre a necessidade de luz natural e a necessidade de sombreamento. Se a prateleira for interna ao ambiente a quantidade de luz natural será reduzida. Para orientação sul (no hemisfério norte) recomenda-se que a profundidade da prateleira interna seja aproximadamente igual a altura da abertura acima da prateleira. Ao mover a prateleira para o exterior cria-se uma área sombreada abaixo da abertura o que reduz os níveis de iluminação nas proximidades da janela melhorando no entanto a uniformidade da luz dentro do espaço. A profundidade recomendada para uma prateleira externa deve ser igual a sua própria altura acima do plano de trabalho (LITTLEFAIR, 1985).

Para baixas latitudes a profundidade da prateleira pode ser estendida no intuito de se bloquear os raios solares. Se posicionada nas fachadas este ou oeste a prateleira pode permitir a entrada de raios solares diretos, entre a prateleira e o teto, sendo necessário desta maneira complementar o equipamento com algum dispositivo de sombreamento. Para este caso seria possível aumentar a profundidade da prateleira, mas como consequência haveria a diminuição nos níveis de iluminação dentro do ambiente. Uma outra possibilidade seria inclinar a prateleira para baixo o que no entanto iria diminuir a quantidade de luz refletida para o teto. Rotacionando o dispositivo para cima otimizará a penetração da luz ao mesmo tempo com que reduzira o sombreamento. A prateleira horizontal é aquela que apresenta o melhor compromisso entre a distribuição da luz e o sombreamento.

O teto é a segunda variável de grande importância para o funcionamento do dispositivo, pois é através dele, que a luz vinda da prateleira irá se difundir pelo ambiente. As características do teto que influenciam são o seu acabamento, a rugosidade e a forma. Embora uma superfície especular possa parecer interessante por refletir mais luz dentro do ambiente, é preciso tomar uma série de cuidados para evitar o ofuscamento, desta forma normalmente o acabamento é uma pintura branca. A penetração da luz vinda da prateleira também depende da inclinação do teto. Uma forma que aumente a altura a medida que se afasta da abertura e se aproxima do centro do edifício terá suas propriedades maximizadas. Para um teto plano a prateleira de luz possui um desempenho mais modesto.

Apesar de todas estas possibilidades as prateleiras são normalmente sistemas fixos, estudos mostram que seu acabamento pode influenciar na eficiência e na direção dos raios redirecionados (CLAROS, 2002). Uma superfície branca ou de alumínio produz uma luz difusa em controle direcional, já uma superfície especular (espelhada, ou de metacrilato) permite que o ângulo de incidência dos raios seja praticamente igual ao de reflexão, desempenhando um papel mais efetivo na distribuição da luz solar. No entanto pode haver reflexão de imagens exteriores no teto, comprometendo a qualidade da iluminação no ambiente.

3.5.16.1 Prateleira de Luz com Filme Refletivo

Um avanço na tecnologia para as prateleiras de luz, que funcionavam basicamente para iluminação solar direta, foi o surgimento das prateleiras tratadas com filmes ópticos “Optically treated light shelf” (BELTRAN, 1994), Figura 3.91. Este dispositivo, idealizado para receber radiação direta na parte da manhã e radiação solar difusa, em todos nos períodos do dia, tem duas vantagens em relação sa prateleiras comuns: sua geometria é curva e o perfil é segmentado para refletir a luz solar para altitudes solares específicas. São encontradas no mercado tanto altamente refletivas, semi-especulares com filmes ópticos para aumentar sua eficiência. Os objetivos são

evitar a entrada de luz solar direta durante o dia, aumentar os níveis de iluminância até 10m da abertura, minimizar o ganho de calor, e melhorar a uniformidade da luz no ambiente.

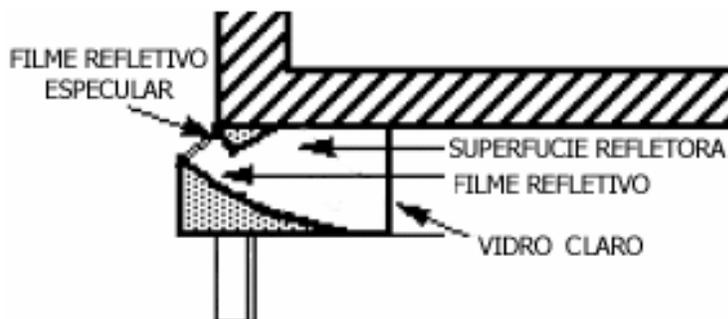


Figura 3.91 - Prateleira de luz com filme refletivo. Fonte: BOER, 1995

O design da “optically treated light shelf” baseia-se em dois refletores inclinados, o principal refletor consiste em uma superfície curva segmentada para melhor redirecionar a luz solar direta para as varias altitudes solares. Esta superfície do refletor é coberta com um filme altamente refletivo (88%) que gera uma componente luminosa (vinda da reflexão especular) de longo alcance. Este filme possui ranhuras lineares que redirecionam os raios com um ângulo de saída de 12° a 15°. Um refletor secundário com um filme especular altamente refletivo (95%) é posicionado acima do refletor principal, no teto, com objetivo de interceptar ângulos solares baixos, principalmente no inverno, e direcionar os mesmo para o refletor inferior. A abertura de saída da prateleira de luz é pequena, aproximadamente 20 cm. A abertura externa é selada com um vidro seletivo, alem de evitar a entrada de calor sela o equipamento evitando a entrada de água da chuva e poeira, sendo, portanto seladas estão protegidas de interferências.

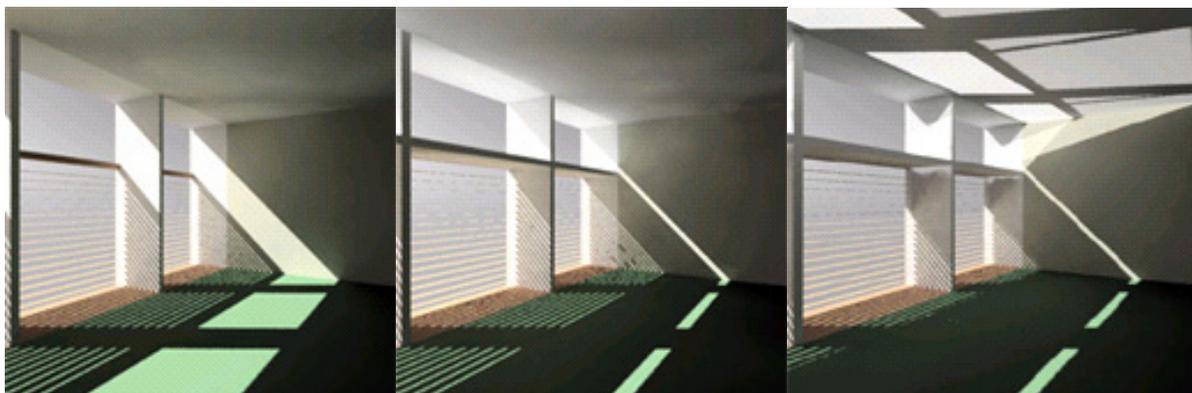


Figura 3.92 - Vista de uma abertura sem prateleira de luz, com uma prateleira pintada em branco e com um película refletiva. Fonte: BELTRAN, 1994

Estudos mostram (BELTRAN, 1994) que as prateleiras tradicionais não produzem altos níveis de iluminância para espaços muito profundos, enquanto aquelas tratadas com filme óptico, “optically treated light shelf”, podem fornecer níveis de iluminação ideais para escritórios até 10m da abertura sob condições de céu claro, Figura 3.92. Como conclusões dos estudos as prateleiras não resultam em grandes aumentos de iluminâncias para espaços profundos. Os melhores resultados (12 a 20% de aumento nos níveis de iluminação) são obtidos em situações onde se verificam fortes obstruções da abobada celeste. Apesar de não terem um grande desempenho são úteis pois melhoram a uniformidade das iluminâncias reduzindo os níveis próximos as aberturas e permitem um bom sombreamento para os raios solares diretos para elevados ângulos solares. Uma prateleira externa sombreia áreas próximas a abertura enquanto uma prateleira interna sombreia áreas mais profundas do espaço. No entanto para tamanhos de prateleiras razoáveis fica impossível bloquear os ângulos solares baixos, a não ser que existam grandes obstruções. Venezianas ou outros dispositivos de sombreamento serão necessários para complementar a ação das prateleiras. Funcionam melhor com pés-direitos elevados, sendo 3 metros o recomendado.

3.5.17 Sistemas Anidólicos

Este sistema é baseado nos princípios da óptica sem imagem “nonimaging optics”, iniciada com o Prof. Roland Winston (WELFORD, WINSTON, 1989) e aplicada inicialmente para obtenção de concentradores solares que buscam alcançar uma concentração máxima (ideal) da luz, mediante concentradores parabólicos. Este sistema coleta a luz solar incidente numa abertura de entrada e a concentra aonde é posicionada a outra placa receptora, alcançando um fator de concentração próximo ao limite termodinâmico. Para distinguir os concentradores solares, daqueles utilizados especialmente como sistemas de aproveitamento de luz natural, estes últimos foram denominados de sistemas anidólicos, em função da etimologia grega da palavra anidólico que significa sem imagem “nonimaging optics” (JENKINS, 1996). A base para o desenho do refletor é como os feixes se refletem geometricamente em uma curva dada em coordenadas polares.



Figura 3.93 - Sistemas anidólicos no Aeroporto Internacional de Zurique. Fonte: do autor.

O princípio dos concentradores pode ser utilizado para as aberturas zenitais, (Figura 3.93), aberturas laterais e brises. É utilizado para concentrar a luz difusa vinda de uma porção do céu, evitando ao mesmo tempo a entrada da radiação solar direta que também é difundida no dispositivo, graças a sua superfície de alumínio anodizado com refletância especular de 90%.

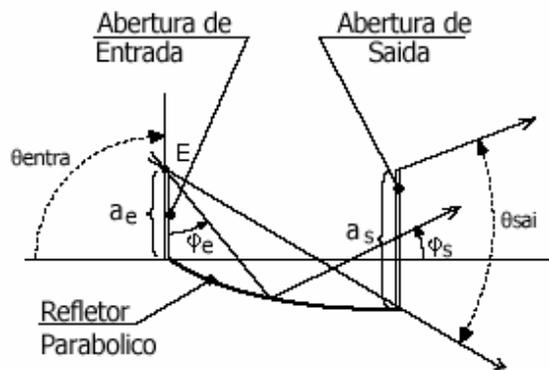


Figura 3.94 - Corte esquemático de um sistema anidólico. Fonte: WELFORD e WINSTON, 1989

A Figura 3.94 mostra o funcionamento básico de um sistema anidólico. A luz da abobada celeste numa faixa angular igual a θ_{entra} , incide numa abertura externa e desviará os feixes mediante um refletor, em direção à uma abertura de saída. Para assegurar que todos raios coletados pelo refletor estejam atravessando a abertura de saída é necessário garantir que o valor H (“etendue”) da luz incidente seja conservada na passagem da abertura de entrada para a de saída (SCARTEZZINI, 2002).

A óptica não imaginaria, estabeleceu métodos eficientes para o formato dos refletores de modo que estes consigam conservar o “etendue” H . Um destes métodos é o princípio dos “raios das beiradas” que se aplica bem aos sistemas de iluminação natural. De acordo com este princípio a forma do refletor da Figura 3.94 é inteiramente determinado pela passagem dos raios através do ponto E (GORDON, 1992). Para melhorar o desempenho de um sistema zenital e se beneficiar das elevadas luminâncias da abobada celeste, que ocorrem nas altitudes mais elevadas (também em função das obstruções) um concentrador externo pode ser montado em frente a uma fachada vertical Figura 3.95. O concentrador anidólico ajuda a captar toda a luz

incidente vinda da metade superior da abobada. Diferentemente do primeiro sistema este apresenta dois refletores voltados face a face, um superior e outro inferior. No entanto para este sistema para proteger o sistema da luz solar direta, é necessária uma outra proteção que deve ser posicionada sobre a abertura externa do coletor. A luz remanescente que é transmitida é então redirecionada para o teto através do sistema. Este dispositivo difere de outros painéis prismáticos fixos, pois rejeita a luz vinda de determinadas partes do céu. Sob condições de céu encoberto é preferível desenhar o sistema anidólico para transmitir os raios solares vindos de todo o hemisfério e proteger o sistema contra os ganhos solares somente quando necessário (WELFORD, 1989).

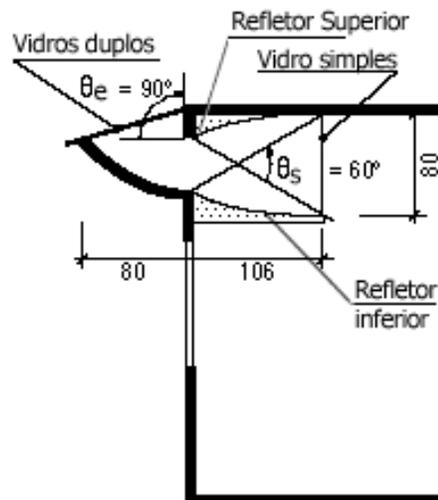


Figura 3.95 - Corte esquemático de um sistema anidólico com coletor zenital.
 Fonte: WELFORD e WINSTON, 1989

3.5.18 HELIOSTATOS

Um heliostato é um sistema de captação da luz solar ativo e, portanto motorizado, que acompanha a trajetória do sol durante o dia. Possui defletores e espelhos refletores para redirecionar a luz e encontra a posição do sol assim que este cruza o céu, reflete a luz direta do sol para qualquer direção desejada ou para criar

efeitos especiais de iluminação no interior do edifício. A trajetória do sol é encontrada por um sistema de controle microprocessado. Segundo PEREIRA (1993) “A coleta de luz solar pode ser feita através de espelhos ou lentes montados em sistemas de rastreamento do sol, produzindo um sistema usualmente chamado heliostato. Quanto maior a área de coleta melhor, entretanto, para ser transmitida através de estreitos dutos, a luz também precisa ser concentrada”, podendo-se utilizar lentes. Na Figura 3.97 é possível visualizar o projeto da rodoviária de Bushof Aachen, que mediante o uso de Heliostatos, e de refletores internos, consegue iluminar com a luz solar um grande vão, abaixo do nível do solo (www.bominsolar.com).

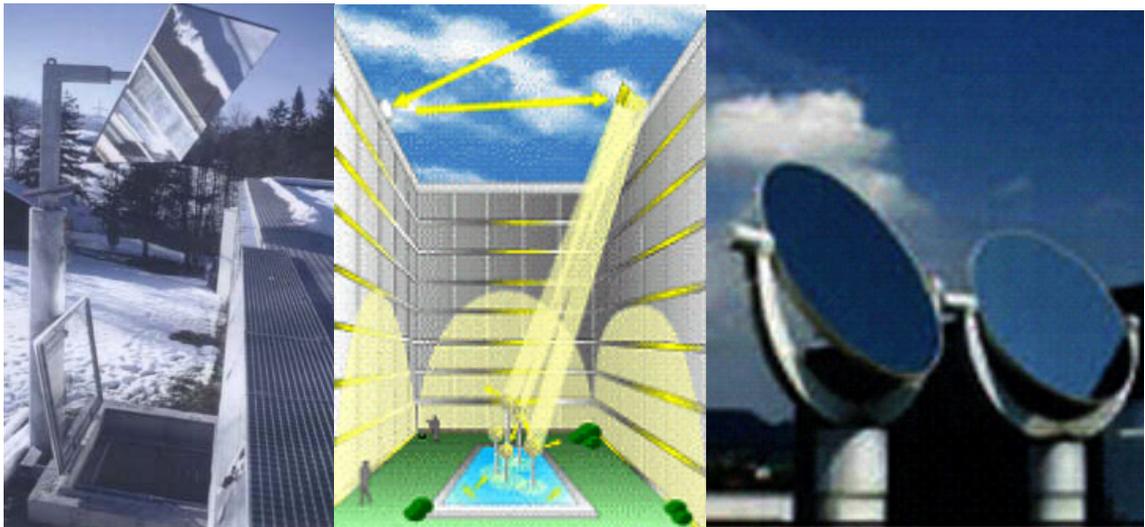


Figura 3.96 - Heliostato. Fonte: <http://www.bartenbach.com>

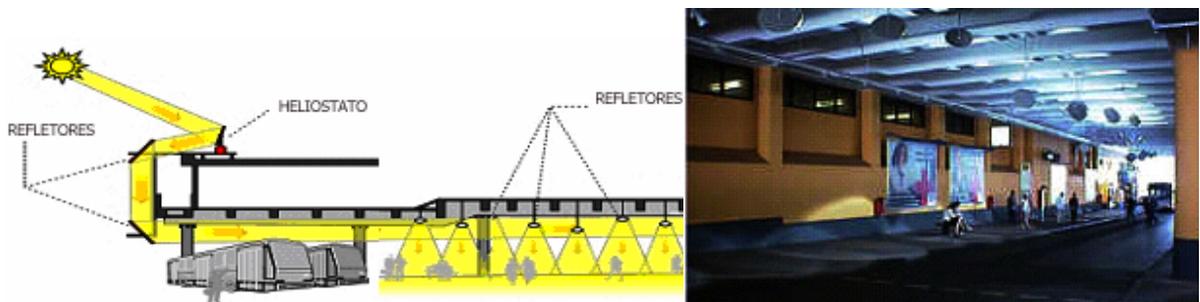


Figura 3.97 - Rodoviária de Bushof Aachen Fonte: http://www.bomin-solar.de/bushof_aachen.htm

3.5.19 DUTOS DE LUZ

Após coletada a luz existem varias formas de distribuí-la em espaços sem aberturas, é o caso de espaços localizados no sub-solo ou salas que não tenham acesso direto a uma abertura que possa proporcionar iluminação. Desta forma mediante estruturas tubulares, os dutos de luz, é possível transportar até estes ambientes e distribuir horizontalmente ou verticalmente a luz solar (Figura 3.98).

A transmissão de luz artificial e natural através de dutos de luz é uma tecnologia recentemente desenvolvida que baseia-se nas propriedades de reflexão de finas películas disponíveis no mercado. Exemplo disto são os filmes acrílicos prismáticos que refletem a luz por reflexão total interna e filmes de plástico com partículas de prata como os filmes silver lux produzidos pela Companhia 3M. Ambos os filmes podem revestir tubos circulares que funcionarão como guias de luz.



Figura 3.98 - Duto de luz com cobertura altamente refletiva. Duto Prismático. Fonte: IEA, 2000

O desenvolvimento comercial para guias de luz natural baseia-se principalmente na utilização de filmes plásticos ou painéis de alumínio polidos. No entanto guias de luz com sistemas metálicos tem aplicação pratica limitada pois dependem da razão comprimento em função do diâmetro (Figura 3.99). Para guias onde a razão è alta somente a luz coaxial é transmitida de forma eficiente. No entanto

qualquer canto que seja significativo dentro do guia converte a luz coaxial em uma luz fora do eixo, por este motivo os cantos num duto de luz devem ser planejados com muito cuidado para que seja mantida a transmissão.

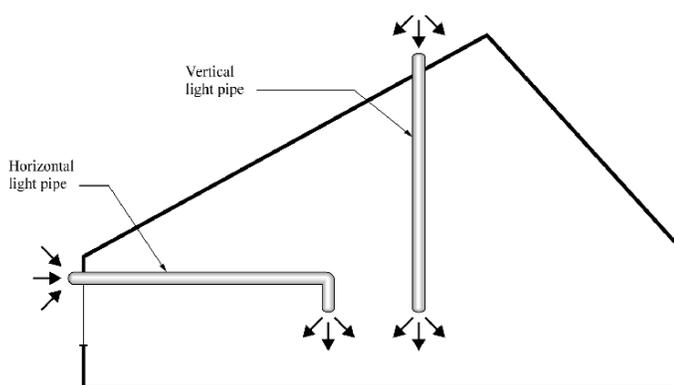


Figura 3.99 - Dutos horizontais e verticais. Fonte: IEA, 2000
Dutos horizontais e verticais

A eficiência da transmissão de cada canto, dentro do tubo, pode ser definida como a razão da transmissão dentro da guia com cantos pela transmissão de uma guia de comprimento reto e equivalente. Assim em geral a eficiência de transmissão em canto, dentro do tubo, é função do comprimento angular da luz de entrada, a refletância do material do guia e a geometria do canto. (Figura 3.100)

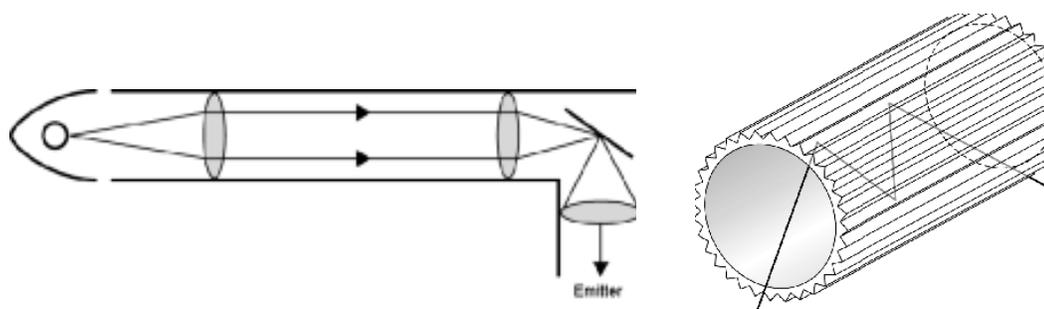


Figura 3.100 – (esquerda) Desenho esquemático de dutos com lentes. (direita) Duto oco com ranhuras prismáticas. Fonte: COBB, 1989

Existem vários tipos de dutos, representados principalmente pelos materiais responsáveis pelas reflexões internas. São eles: Dutos com espelhos, dutos com lentes, dutos com painéis prismáticos, dutos com fibra ótica e revestidos de películas especiais (filmes micro-prismaticos- “Optical Lighting Films”) (EDMONDS, 1995). Lorne

Whitehead em 1989 inventou um novo conceito para o desenho dos dutos, seu tipo de duto prismático pretendia resolver o problema da absorção dos dutos sólidos, removendo a maior parte do material no centro e substituindo-o por uma gás transmissivo, o ar. Com objetivo de transmitir de maneira mais eficiente a luz, o material externo do duto foi composto de dentes tipo serra, de material acrílico que correm todo o comprimento do duto (Figura 3.100). Desta forma a luz consegue se propagar por reflexão interna total com perdas mínimas de fluxo luminoso pelo trajeto (MCCLUNEY, 1998).

Capítulo 4

Metodologia

Este capítulo traz a metodologia empregada para uma avaliação quantitativa de dez dispositivos de iluminação natural que objetivam otimizar a distribuição da luz solar no interior dos edifícios. Para maximizar o potencial destes dispositivos em função do posicionamento na fachada, para a latitude de Campinas, 22°49'18" S e longitude 47°03'55" W, seus parâmetros foram estudados e com o auxílio de planilhas eletrônicas, foi estabelecido o projeto dos dispositivos, onde é determinada sua posição e geometria mais adequados para fachada norte. Determinados estes parâmetros, os dispositivos foram trazidos do exterior. O perfil dos painéis foi escolhido de forma a obter uma iluminação com um contraste menor entre os espaços próximos e distantes da abertura. Para comprovar a capacidade dos dispositivos de redirecionar a luz, foram realizadas, através de ensaios de campo, sob condições de céu real, as medições das iluminâncias obtidas no interior de modelos, que representam uma porção de um ambiente. Não foram utilizadas maquetes em escala pois estudos tem mostrado grandes discrepâncias entre as iluminâncias

registradas simultaneamente em ambientes reais e em suas réplicas em escala reduzida (THANACHARIONKIT et al, 2005). Um sistema de aquisição de dados, de baixo custo, (Anexo 2) foi desenvolvido, para a aquisição das iluminâncias.

4.1 Método Experimental

Para medir as iluminâncias geradas, no interior dos módulos, com a utilização dos DIN, foi desenvolvido um sistema compacto e econômico para aquisição de dados de iluminância, que pode ser conectado pela porta paralela (da impressora) de qualquer PC. Baseado no conversor analógico digital de oito entradas, (SIMMONDS, 1997), este sistema de medição de iluminância, possui 64 canais de entrada, de forma que seja possível acoplar 64 sensores e obter uma leitura em 64 pontos diferentes, no interior das maquetes. Esta adaptação do circuito do Simmonds deve-se a necessidade de medir a iluminância em vários pontos dentro dos módulos, utilizando um sistema eficiente e econômico. Para este sistema foram escolhidos como sensores de luz os resistores denominados LDR (“Light Dependent Resistor” ou resistores dependentes da luz) por terem uma curva de sensibilidade semelhante a do olho humano, como os sensores de silício utilizados após filtragem da radiação, em luxímetros, sendo no entanto, os primeiros, bem mais econômicos.

Desta forma a capacidade de redirecionamento de alguns dispositivos de iluminação natural, obtidos no exterior, foi testada, na Unicamp, através da medição das iluminâncias obtidas dentro de protótipos de um ambiente interno. Com os resultados pretendeu-se verificar, experimentalmente, se a utilização destes painéis realmente otimiza a iluminação natural dentro de um ambiente, se comparado à uma abertura com vidro convencional, no sentido de aumentar os níveis de iluminação nos espaços distantes da abertura e diminuir a iluminação nos espaços próximos.

No entanto, é importante entender que a promessa destes dispositivos de melhorar a iluminação dentro do ambiente, servindo-se da luz solar só se verifica de forma eficiente se o sistema de redirecionamento dos raios solares dos painéis for projetado, e adequado, as condições luminosas locais. Ou seja, para alcançar o melhor desempenho luminoso, é necessário calcular a geometria e o posicionamento adequado de cada painel, de acordo com a latitude e longitude da localidade e de acordo com o posicionamento na fachada onde o mesmo será utilizado, considerando os princípios de interação da luz com a matéria que regem cada dispositivo. Caso contrário, a utilização destes dispositivos na fachada de forma aleatória pode fazer com que o painel utilizado não melhore em nada a iluminação interna, tornando-se ineficiente ou inútil.

Por este motivo foram criadas planilhas eletrônicas (seção 4.2) que simulam o comportamento dos painéis durante o ano, de acordo com a latitude e longitude, dependendo da fachada no qual este está localizado. Com esta previsão torna-se mais fácil decidir em que posição o painel deve ser usado para que seja mais eficiente. Portanto os DIN serão posicionados nos protótipos de acordo com os resultados indicados pelas planilhas eletrônicas. Os dados obtidos das planilhas foram então comparados com os dados obtidos experimentalmente para determinar se estes dispositivos podem ser adaptados as condições luminosas locais, para Campinas, latitude 22°49'18" S e longitude 47°03'55" W. Também será possível verificar se os dados obtidos pelas planilhas estão coerentes com aqueles demonstrados pelo experimento.

4.1.1 Descrição do Experimento

A medição da iluminância de alguns dispositivos de iluminação natural obtidos no exterior será realizada, na Unicamp, para determinar se estes dispositivos podem

ser adaptados as condições luminosas locais, para latitude $22^{\circ}49'18''$ S e longitude $47^{\circ}03'55''$ W, condições luminosas estas, diferentes daquelas onde estes dispositivos são normalmente utilizados (Austrália, Alemanha, Suíça e Estados Unidos) (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Vista Aérea da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEEC) onde os modelos em escala foram instalados. A caixa d'água de quatro andares onde o experimento foi realizado garante um ambiente de medição livre de obstrução. Fonte: do Autor



Figura 4.2 - (A) Face norte dos protótipos, vista da Avenida Albert Einstein, em direção da entrada principal. (B) Face oeste, vista da Avenida Albert Einstein em direção à Faculdade de Engenharia Agrícola. Fonte: do Autor

4.1.1.1 Os Protótipos

Os protótipos de dimensões 0,90m (largura), 1,80m (comprimento) e 0,45m (altura), pintados na cor branca, foram construídos com uma estrutura de aço e painéis externos em madeira MDF (Madeira de fibra), na laje do Bloco E da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEEC), (Figura 4.2). As aberturas, voltadas para face norte (geográfico), terão acoplados os dispositivos de dimensões 0,15m (altura) x 0,50m (comprimento) e espessuras variadas, de acordo com as diferentes tipologias dos painéis. Os sensores luminosos utilizados, 15 internos, espaçados igualmente, para cada uma das quatro maquetes e dois externos, totalizam 62 pontos, para avaliação das iluminâncias, Figura 4.3. Os dois sensores externos á maquete estarão medindo a iluminância e os dados coletados destes, servirão para normalizar os resultados finais para melhor analisar o desempenho qualitativo de cada DIN.



Figura 4.3 - Foto dos 4 protótipos sobre a laje da caixa d água do bloco E da FEEC, fachada norte. Fonte: do Autor

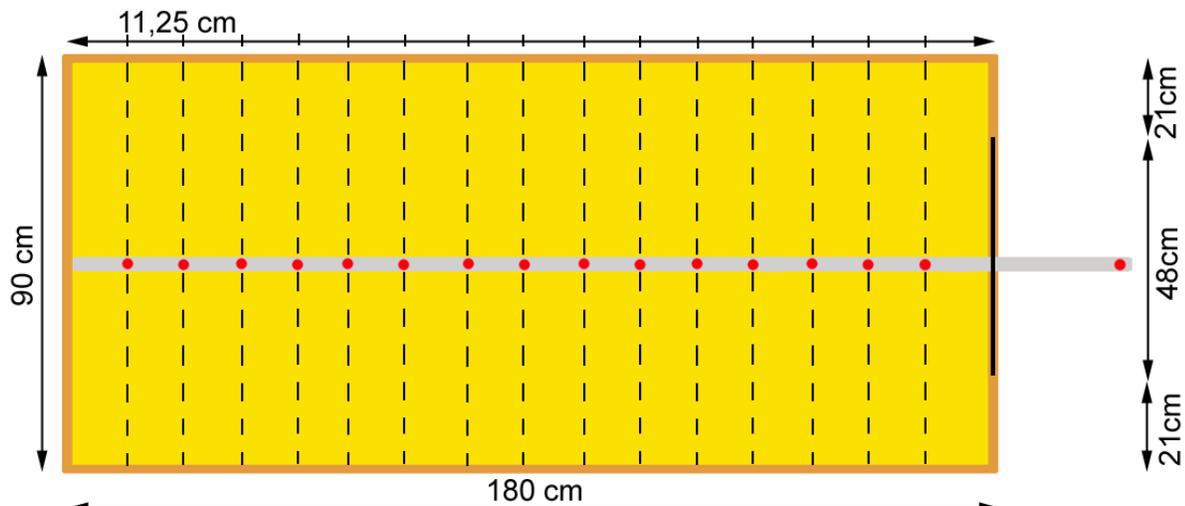


Figura 4.4 – Planta baixa do módulo, com as distâncias dos sensores. Fontr: do Autor



Figura 4.5 – (A) Planta baixa do protótipo, em vermelho os sensores internos e externo. (B) Vista interna do protótipo (C) Posicionamento dos quatro protótipos. Fonte: do Autor

Os quatro protótipos foram sobrepostos de dois em dois (Figura 4.5 C). Um, dos quatro módulos, será denominado módulo de referência ou módulo 1. Na abertura deste, será acoplado um vidro comum de 3mm de espessura, cujo espectro de transmissão foi medido com um espectrômetro e encontra-se na Figura 4.6. Este dado é muito importante, pois a análise do desempenho dos DIN foi feita comparativamente, com um módulo que, em sua abertura possuía um vidro com esta característica de transmissão (Figura 4.6). As iluminâncias obtidas com o uso dos DIN também foram normalizadas, dividindo-as pelas iluminâncias obtidas com o painel de vidro para que fosse possível identificar, em porcentagem, a diferença nos níveis de iluminação com o uso do vidro e com o uso dos DIN. Desta forma, para obter os mesmos resultados, caso

queira-se repetir o experimento, é necessário estar utilizando um vidro que tenha esta curva de transmissão (Figura 4.6).

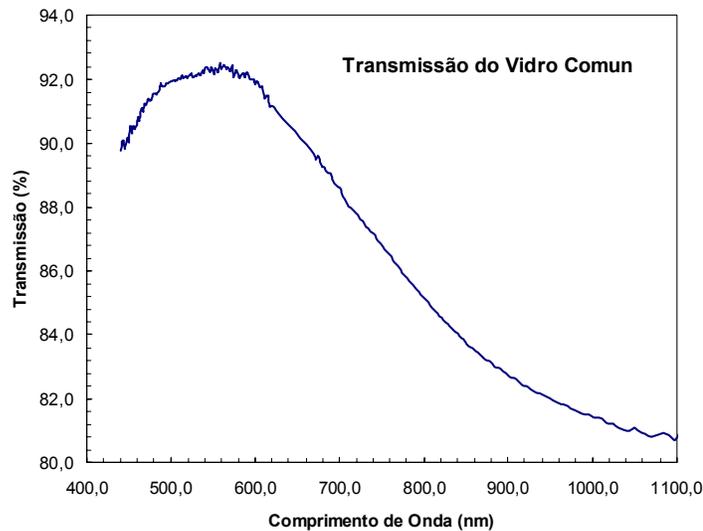


Figura 4.6 - Espectro de transmissão do vidro comum utilizado.

Nos outros módulos (módulos 2, 3 e 4) serão acoplados os painéis. Como explicado anteriormente, as iluminâncias registradas nestes serão comparadas com aquelas obtidas no módulo de referência (ao qual está acoplado o vidro). Desta forma, também será possível comparar as iluminâncias obtidas com a utilização de um vidro comum na fachada e com a utilização de um DIN, no que se refere aos níveis de iluminação alcançados dentro dos ambientes, em profundidade.

4.1.1.2 Obstrução de Entorno

A presença de obstruções no campo visual do entorno foi determinada mediante um estudo fotográfico com a utilização de uma lente olho de peixe FC-E8 com 183° de abertura. Os ângulos de obstrução são obtidos através do diagrama de projeção. Note-se na Figura 4.7 que as obstruções do entorno não ultrapassam, em média 2°, o que está de acordo com a norma da CIE (1994) que recomenda, no máximo, 5° de obstrução.

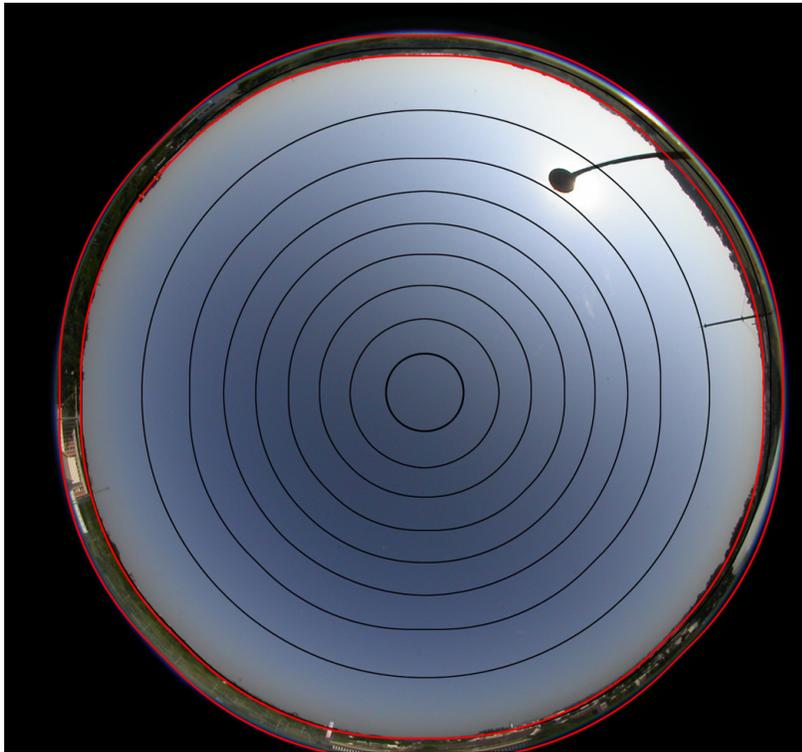


Figura 4.7 – Imagem do entorno do módulo, sobre a laje da caixa d água do bloco E da FEEC.

4.1.1.3 Os Dispositivos de Iluminação Natural

Os DIN estudados que foram acoplados as maquetes são os prismáticos, Combisol® e Micro Sun Shielding Louvres®, (produtos da Empresa Schott), os dispositivos OKASOLAR® e OKALUX® da Empresa Siteco (SIEMENS), painéis LCP e Channel Panel, desenvolvidos pelo Prof. Dr. Ian Edmonds da Universidade de Tecnologia de Queensland, Austrália e os Köster Louvres, RETROLux O, RETROLuxTherm O e RETROFlex desenvolvidos pelo Dr. Helmut Köster. Estes dispositivos são de grande interesse por terem se mostrado eficientes, no que diz respeito ao redirecionamento da iluminação natural em ambientes internos, como descrito no capítulo anterior.

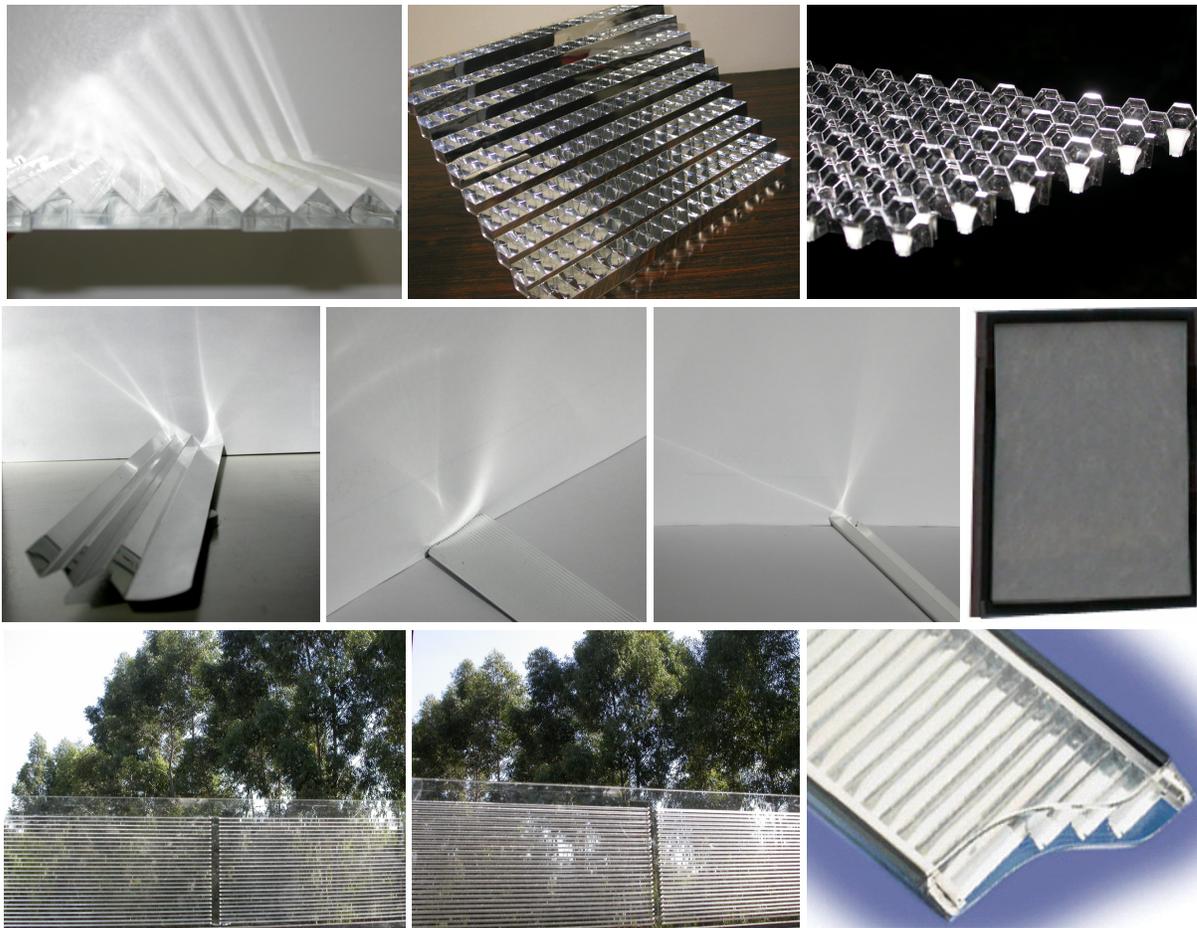


Figura 4.8 - Painel prismático, Micro Sun Shielding Louvre, Combisol, RETROLux, RETROFlex, RETROLuxTherm, TIM, Laser Cut Panel, 0° 12°, Channel Panel e Okasolar W. Fonte: do Autor

4.1.1.4 Período de Medição

O período de medição foi de seis meses, de março a julho, de 2005, com o objetivo de acompanhar a variação climática local. A variação da iluminância obtida no interior do módulo, que varia de acordo com a utilização de cada painel, será medida ao longo do dia, no período de 8:00h as 18:00h, sendo que as medições serão realizadas a cada dez minutos. O sistema de medição, montado especialmente para esta pesquisa assim como os sensores utilizados para a aquisição dos dados de iluminância, serão explicados no próximo item. O céu também foi fotografado com uma lente olho de peixe nos horários de 8:00h e 18:00h para que os valores obtidos de iluminâncias sejam

correlacionadas às condições luminosas fornecidas pela abobada. O redirecionamento da luz no interior dos protótipos foi fotografado com uma webcam, a cada 10 minutos.

4.1.2 Sistema de Medição

4.1.2.1 Sensores Luminosos

O sensor luminoso utilizado para registrar as iluminâncias dentro dos módulos denomina-se “Light Dependent Resistor” (LDR) e é um resistor que varia sua resposta com a intensidade da luz Figura 4.9. As células de CdS (Sulfeto de Cádmio) são do tipo fotocondutivas, ou seja, são sensores semi-condutores que utilizam a superfície fotocondutiva para reduzir a resistência. Este sensor será utilizado no circuito que foi desenvolvido em cooperação com os alunos de Pós-graduação do Departamento de Eletrônica Quântica - IFGW, para realizar as medições da iluminância verificando a eficiência dos DIN.

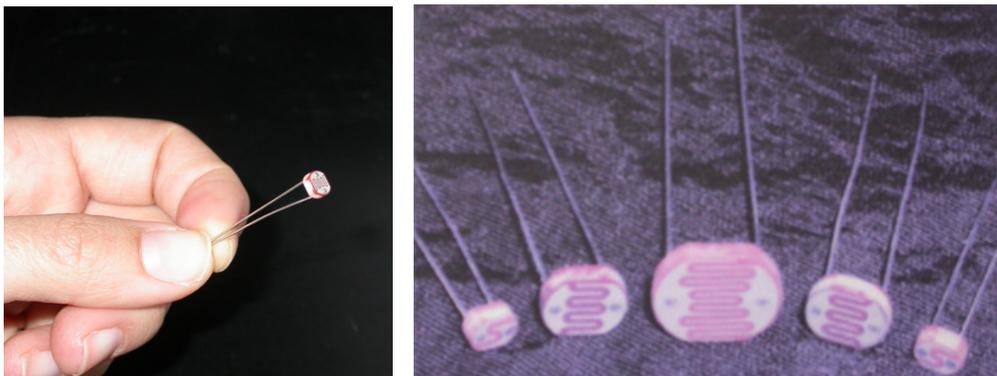


Figura 4.9 - LDR de CdS utilizado no sistema de medição. Fonte: www.selcoproducts.com

A sensibilidade relativa do LDR depende do comprimento de onda da luz incidente no foto-sensor, ou seja o LDR funciona na medida em que sua resistência se

altera com maiores ou menores incidências de luz. Como resposta a incidência de luz, o LDR apresenta um valor de resistência (em ohms), que representa a sensibilidade do sensor para aquele comprimento de onda. Quanto maior for a incidência de luz, menores serão os valores gerados pelo resistor e vice-versa. É possível medir a resistência (ohms) gerada, pelo LDR, graças a um multímetro ou a queda de voltagem produzida através de um divisor de tensão, como será desenvolvido neste estudo. Fundamentalmente, a sensibilidade máxima do sensor, se verifica na faixa compreendida entre 515nm a 730nm, segundo os dados do fabricante (Figura 4.10). Isto significa que a resposta espectral do sensor é próxima àquela do olho humano (curva tracejada da Figura 4.10). De forma simplificada, para saber o valor da iluminância (lux) num ponto no interior da maquete, basta criar uma curva de equivalência entre a resistência (medida pelo LDR) num divisor de tensão e a iluminância (Figura 4.11).

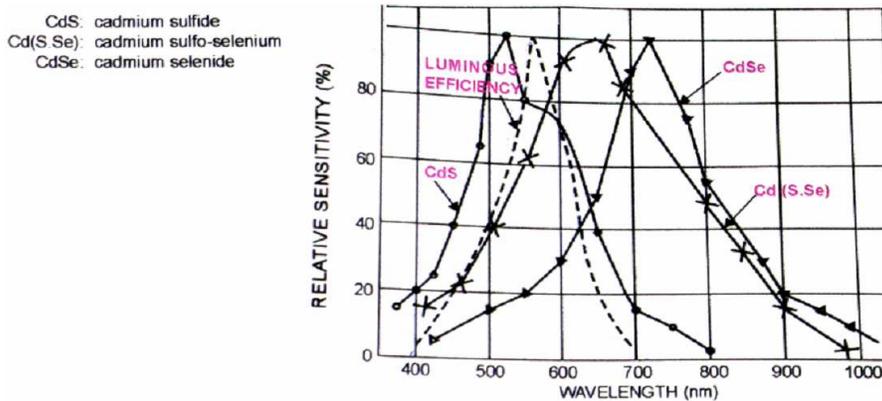


Figura 4.10 - Resposta espectral do sensor de CdS. Fonte: www.selcoproducts.com

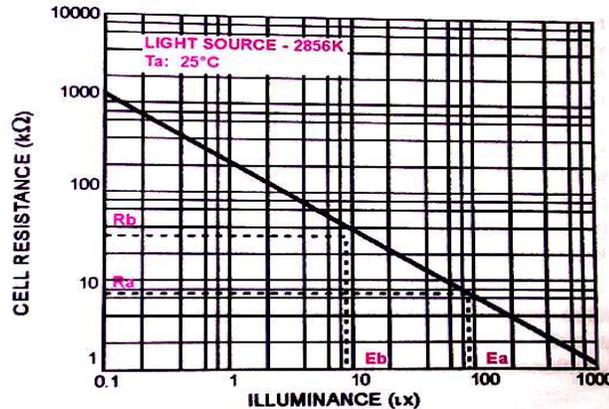


Figura 4.11 - Curva de resposta característica do LDR. Fonte: www.selcoproducts.com

4.1.2.2 Calibração da Iluminância

Para obtenção de uma curva de calibração que relacione a resistência gerada pelo LDR, em função da iluminância, Lux-Ohms, várias medições foram realizadas com os LDRs de forma simultânea (do lote foram escolhidos aleatoriamente 10 LDR), utilizando os seguintes instrumentos: um luxímetro, (para registrar os valores das grandezas em lux, Figura 4.12A) e um multímetro, Figura 4.12B), (para registrar os valores em ohms), sob diferentes níveis de iluminação. As iluminâncias foram obtidas mediante a utilização de lâmpadas halógenas, tipo Halopin (Figura 4.12C), de temperatura de cor 2900K, cujo espectro é o mais semelhante àquele fornecido por um corpo negro, e portanto ao da radiação solar. Para calibração e obtenção de valores representativos, as intensidades foram variadas numa faixa entre 100lux e 10klux. Para valores de 10klux a 100klux os dados foram coletados utilizando-se a própria luz solar, em dias de céu totalmente claro, e as medições foram realizadas ao meio-dia.



Figura 4.12 - Instrumentos para calibração do sistema- A) Luxímetro Minolta B) Multímetro Radio Shack. C) Halopin® 60W OSRAM.

Na Figura 4.13 é possível visualizar, em azul, os valores pontuais da iluminância medidos com o luxímetro e com o multímetro simultaneamente. Com o método dos quadrados mínimos foi possível traçar uma reta e obter seus coeficientes: linear α e angular β . Note-se pela figura que a cada valor de resistência corresponde um valor de iluminância, assim, por exemplo um LDR de resistência de 1KOhm terá uma leitura ótima para valores entre 1klux a 5klux.

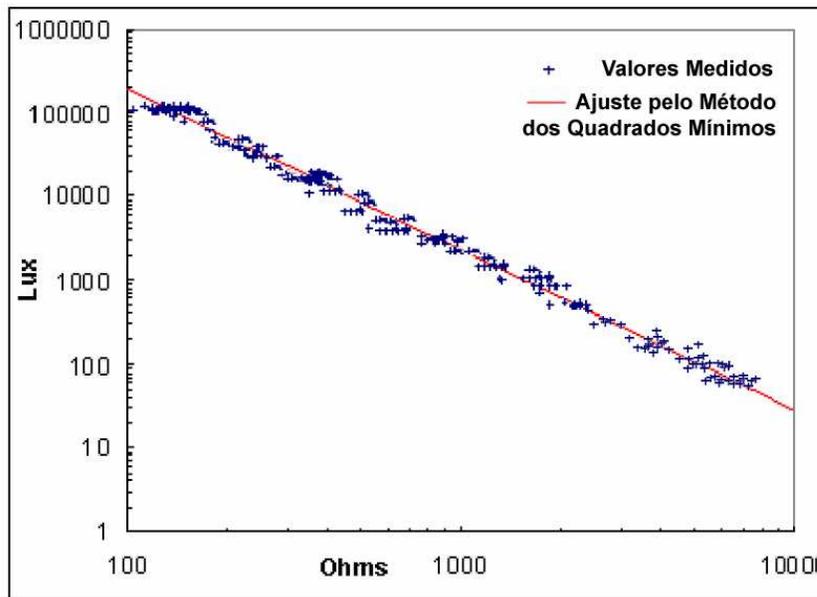


Figura 4.13 - Gráfico de calibração, Lux em função de Ohms

A resposta ao efeito cosseno, (resposta do sensor para luz incidente na fotocélula em diferentes ângulos) também foi medido e observou-se os valores obtidos eram compatíveis com aqueles medidos com o luxímetro, com um erro inferior a 3% de acordo com a recomendação da NBR-15215-4 (Figura 4.14).

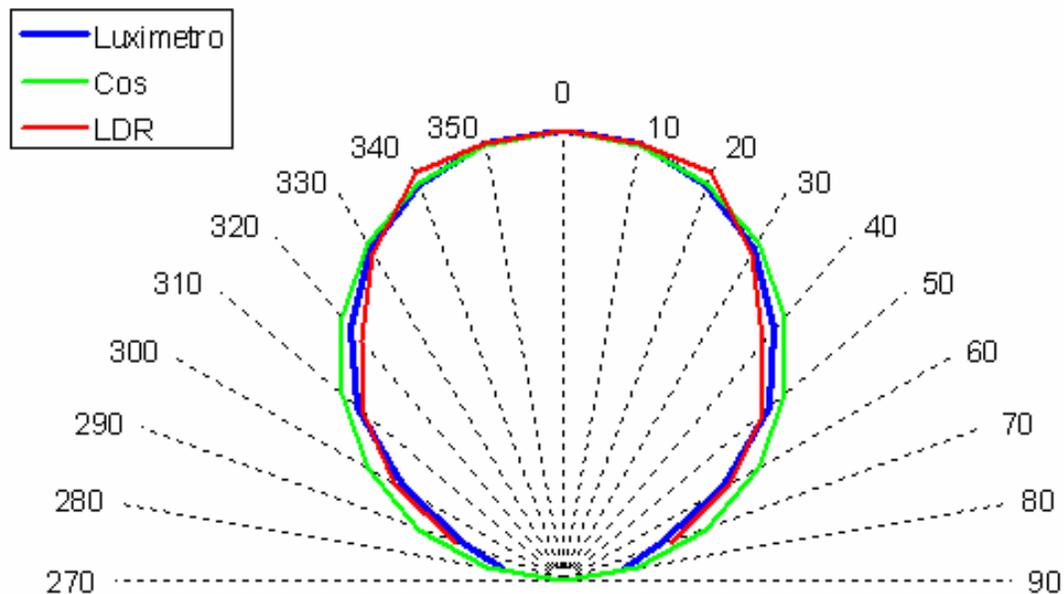


Figura 4.14 - Efeito co-seno medido para u luxímetro e para o LDR.

4.1.2.3 Calibração Espectral

Para saber se seria adequada a utilização do LDR como sensor para as medições de iluminância, decidiu-se determinar experimentalmente, em qual região do espectro se verifica a maior sensibilidade do LDR, ou seja determinar a curva de resposta do LDR. Com os dados obtidos, mediante a utilização de um monocromador (Figura 4.15). Desta forma, foi possível reproduzir experimentalmente os gráficos do fabricante da Figura 4.10 e Figura 4.11. A vantagem de se reproduzir os gráficos é obter todos valores do mesmo, pois no catalogo do fabricante são disponibilizados apenas os gráficos que fornecem uma visão geral do funcionamento, sem no entanto discriminar os valores ponto a ponto. Mediante este gráfico também foi possível identificar a resistência mais adequada para medição de uma faixa de luminâncias, num divisor de tensão (vide subseção 4.1.2.4). Assim, a título de exemplificação, num divisor de tensão, uma resistência de 1Kohm será adequada para medir faixa de luminâncias próximas de 1Klux.

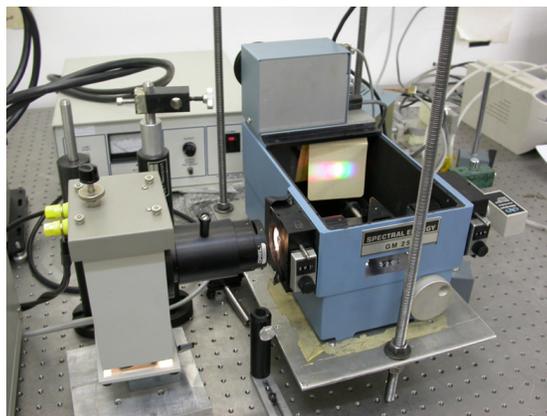


Figura 4.15 – Monocromador utilizado.

Desta medição é importante entender que a intensidade da fonte luminosa em função do comprimento de onda ($F(\lambda)$) e a perda causada pelo monocromador ($M(\lambda)$) multiplicados pela curva de resposta do detector ($D(\lambda)$) será igual a curva de resposta obtida durante as medições ($E(\lambda)$). Ou seja, a diferença entre a curva de resposta do detector ($D(\lambda)$) (indica a sensibilidade do detector para cada comprimento de onda) e o

valor medido no experimento ($E(\lambda)$) será causada pelo fato da lâmpada emitir maiores quantidades de determinados comprimentos de onda do que outros, pelas perdas geradas dentro do instrumento ($M(\lambda)$) e em função da sensibilidade do sensor ou seja de sua curva de resposta ($D(\lambda)$) de acordo com a equação (4.1) e (4.2).

Pelo fato da fonte emitir mais certos comprimentos de onda do que outros, e do detector dar peso diferente para cada comprimento de onda, em função de sua sensibilidade, o resultado é que o valor experimental medido é proporcional a variação de cada um destes fatores de acordo com as equações abaixo.

$$F(\lambda)M(\lambda)D_{SI}(\lambda) = E_{SI}(\lambda) \quad (4.1)$$

$$F(\lambda)M(\lambda)D_{LDR}(\lambda) = E_{LDR}(\lambda) \quad (4.2)$$

Onde:

$F(\lambda)$ intensidade da fonte luminosa em função do comprimento de onda, $M(\lambda)$ perda causada pelo monocromador, $D(\lambda)$ curva de resposta da sensibilidade do detector (verdadeira) e $E(\lambda)$ curva de resposta obtida durante as medições (experimental) (varia de acordo com a emissão da lâmpada utilizada no experimento)

A resposta experimental ($E_{LDR}(\lambda)$) não pode ser tomada como a verdadeira resposta do detector ($D_{LDR}(\lambda)$), pois a lâmpada ($F(\lambda)$) emite mais comprimentos de onda de uma intensidade do que de outra de acordo com a radiação de corpo negro, por isto é claro que o sensor aponta mais de um tipo de comprimento de onda do que outro. Se além disto, o detector for mais sensível a um dos comprimentos de onda ($D_{LDR}(\lambda)$), então a resposta experimental ($E_{LDR}(\lambda)$) será bem diferente da real sensibilidade do detector ($D_{LDR}(\lambda)$). Por exemplo se a lâmpada emite 6 vezes mais azul que vermelho, mas na realidade o detector é 2 vezes mais sensível ao vermelho que o azul (resposta espectral verdadeira ($D_{LDR}(\lambda)$)), então a resposta experimental ($E_{LDR}(\lambda)$), registrará uma diferença entre vermelho e azul de apenas 3 vezes. Por este motivo o

interessante é descobrir a resposta da sensibilidade verdadeira do detector ($D_{LDR}(\lambda)$) e não apenas o valor experimental ($E_{LDR}(\lambda)$).

Como a resposta experimental de ambos os sensores, (LDR e silício) foi medida com uma mesma lâmpada e as perdas do monocromador e da grade de difusão utilizada (1180 ranhuras/mm) são as mesmas, isto equivale a dizer que, a intensidade da fonte luminosa em função do comprimento de onda ($F(\lambda)$) e a perda causada pelo monocromador ($M(\lambda)$) são iguais para os dois sistemas. Portanto igualando a equação (4.1) à (4.2), será possível verificar que, a curva de resposta verdadeira do LDR ($D_{LDR}(\lambda)$) será obtida multiplicando-se sua curva experimental, ($E_{LDR}(\lambda)$), pela curva verdadeira do detector de silício ($D_{SI}(\lambda)$) (obtida do catalogo do fabricante) e dividindo-se pela curva de resposta experimental do detector de silício, obtida durante as medições ($E_{SI}(\lambda)$) de acordo com a equação (4.3).

$$D_{LDR}(\lambda) = \frac{E_{LDR}(\lambda)}{E_{SI}(\lambda)} D_{SI}(\lambda) \quad (4.3)$$

A lâmpada emite todos os comprimentos de onda (em quantidades diferentes), e mediante o uso do monocromador é possível selecionar os comprimentos de onda, de forma que na saída do monocromador a luz que incide no LDR seja uma luz monocromática, ou seja com um único comprimento de onda. Ao passar por uma lente focal, a luz monocromática incide sobre o LDR, situado dentro da caixa preta da Figura 4.16. Para medir a resposta do LDR optou-se por montar um divisor de tensão. O esquema de todo o experimento pode ser visto na Figura 4.16.

O divisor de tensão permite medir a voltagem que está sendo gerada no circuito, por dois resistores em serie, o LDR e um outro, denominado R_G . Enquanto a resistência do LDR varia em função da incidência de luz, vinda do monocromador, a resistência R_G é fixa. Como o sistema utilizado necessita de uma alimentação de 5V ($V_{sistema}$), o R_G é escolhido de modo que, se a resistência do LDR for igual à do R_G , a voltagem resultante é 2,5V, de acordo com a equação (4.4). A resistência é escolhida desta forma porque assim a voltagem pode oscilar tanto para baixo como para cima, de

acordo com a incidência da luz, sem prejudicar a resposta do sensor. Medida a voltagem registrada pelo LDR e pelo detector de silício, quando excitados por vários comprimentos de onda diferentes, foi possível montar o gráfico da Figura 4.17

$$V_{leitura} = \frac{R_G}{R_{LDR} + R_G} (V_{sistema}) \quad (4.4)$$

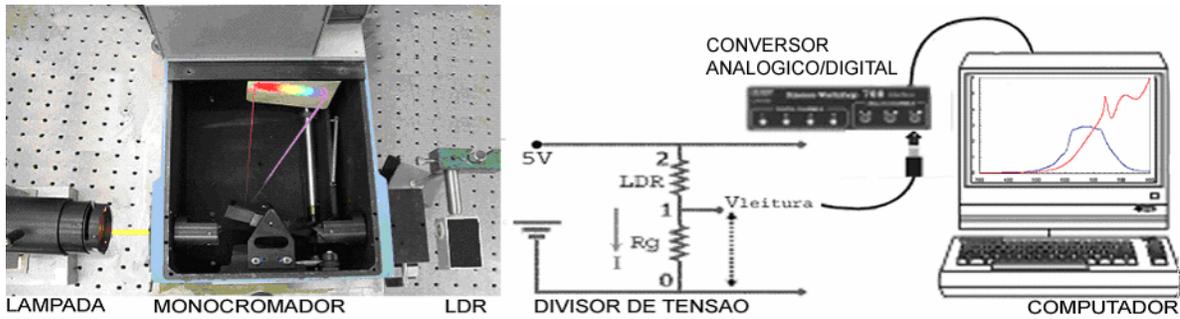


Figura 4.16 - Montagem com lâmpada, monocromador, divisor de tensão, conversor analógico digital e CPU, para obter a curva que representa a resposta experimental da sensibilidade do LDR.

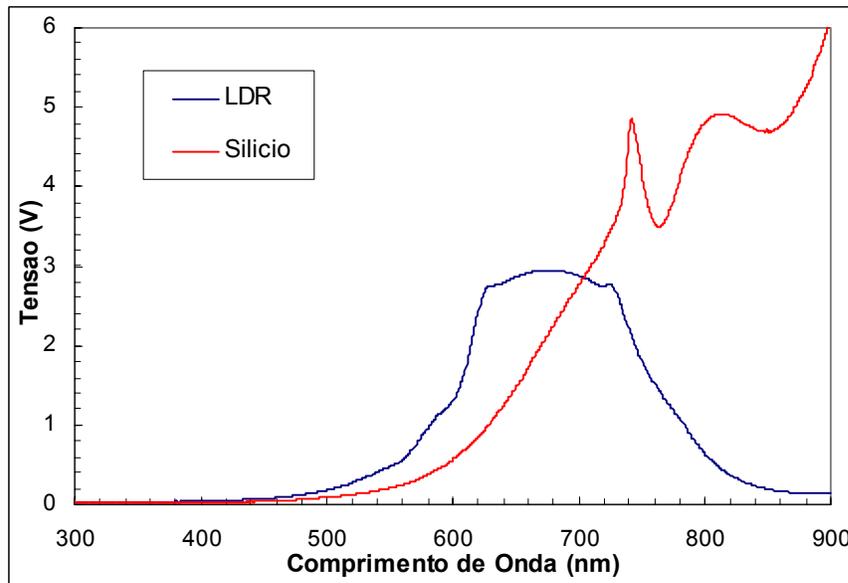


Figura 4.17 - Resposta espectral em volts medida experimentalmente para o LDR e para o detector de Silício.

Em seguida os valores medidos em volts (Figura 4.17) do LDR serão convertidos para valores da resistência em ohms, (Figura 4.18), já que estes não são diretamente proporcionais a intensidade de luz incidente sobre eles, como mostrado

pela Figura 4.13; obtendo-se uma curva que correlaciona o comprimento de onda que atinge o LDR, com a resistência que este produz. A obtenção dos valores da resistência (ohms) do LDR, também poderia ter sido realizada manualmente, utilizando-se um multímetro. No entanto optou-se pela utilização de um divisor de tensão (que fornece a resposta em volts) pela possibilidade de se utilizar um instrumento de captura de dados (conversor analógico digital) que realiza a aquisição dos dados experimentais de uma maneira mais eficiente e com maior resolução e pelo fato de ser automatizado. A equivalência dos dados de volts (Figura 4.17) para ohms (Figura 4.18), é obtida de acordo com a equação (4.4), colocando em evidencia o R_G , de forma a obter a equação (4.5).

$$R_{LDR} = R_G \left(\frac{V_{sistema}}{V_{LDR}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

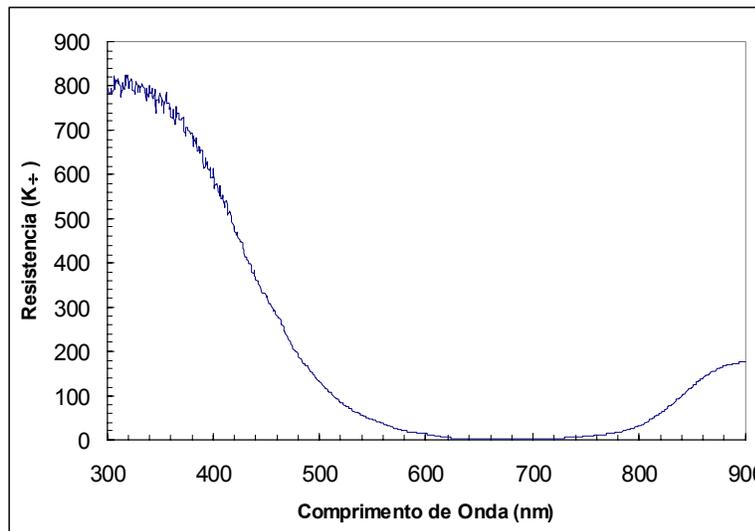


Figura 4.18 - Curva da resistência em função do Comprimento de onda

No entanto como deseja-se obter uma curva proporcional à iluminância, medida em lux, será necessário converter os dados de resistência (ohms) e gerar um gráfico da iluminância (lux) em função do comprimento de onda (nm). O problema desta conversão reside no fato de que, enquanto para o detector de Silício a potencia é diretamente proporcional a voltagem ($P \propto V$), e por isso a curva tem o mesmo

comportamento da Figura 4.17. No caso do LDR, é o logaritmo da iluminância (lux), que vai ser diretamente proporcional ao logaritmo da resistência do LDR (ohms), $\log(I) \propto \log(R_{LDR})$, disto decorre que:

$$I = 10^{\alpha \log(R_{LDR}) + \beta} \quad (4.6)$$

Onde: I iluminância (lux), P é a potencia (Watts), V é a voltagem, α é o coeficiente linear da reta de calibração que faz a equivalência entre as grandezas de resistência (Ω) e da iluminância (lux.), β é o coeficiente angular da reta de calibração que faz a equivalência entre as grandezas da resistência (Ω) e (lux) e R_{LDR} é a resistência (em ohms) do LDR.

Assim para obter uma curva que relacione a iluminância (lux) em função do comprimento de onda (nm), (Figura 4.19), os valores em ohms (Figura 4.18) são convertidos em lux através da curva de calibração lux-ohms (Figura 4.13). Então para cada comprimento de onda, observou-se a resistência (R_{LDR}) pelo gráfico da Figura 4.13 e em seguida estes valores foram substituídos na equação (4.6). No entanto, para poder substituir os valores α e β da (4.6), é necessário utilizar a curva de calibração ohms-lux (Figura 4.13), mostrada no início do capítulo. Em seguida é possível criar a curva experimental que mostra a resposta do LDR (em lux) quando estimulado pelos comprimentos de onda provenientes pela lâmpada utilizada no monocromador.

Para obter então, a curva de resposta experimental do LDR ($E_{LDR(\lambda)}$) verifica-se qual a resistência que este aponta para a incidência de cada comprimento de onda, em seguida faz-se a equivalência para saber a quantos lux corresponde este valor para finalmente obter a curva que relaciona a iluminância apontada pelo LDR em função do comprimento de onda, utilizando a equação (4.6). Em seguida os valores foram normalizados, para obtenção do gráfico da Figura 4.19

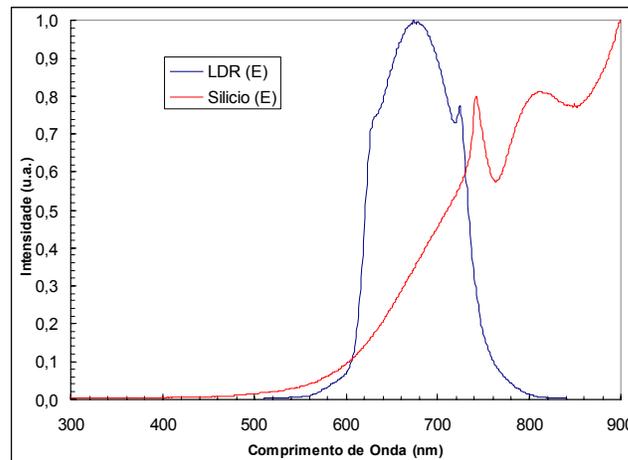


Figura 4.19 - Respostas normalizadas proporcionais a intensidade de luz incidente sobre o LDR e Silício (Resposta Experimental)

Finalmente obtida a curva experimental do LDR ($E_{LDR}(\lambda)$) e a do sensor de silício ($E_{SI}(\lambda)$) torna-se necessário conhecer a curva de resposta verdadeira do Silício ($D_{SI}(\lambda)$) e a curva de resposta verdadeira do LDR ($D_{LDR}(\lambda)$), para obter a curva de resposta verdadeira do LDR, que é o resultado desejado. A curva de resposta do detector de silício utilizado, já normalizada, é fornecida pelo fabricante (www.newport.com818-BB_SERIES_e_2888.pdf) Figura 4.20

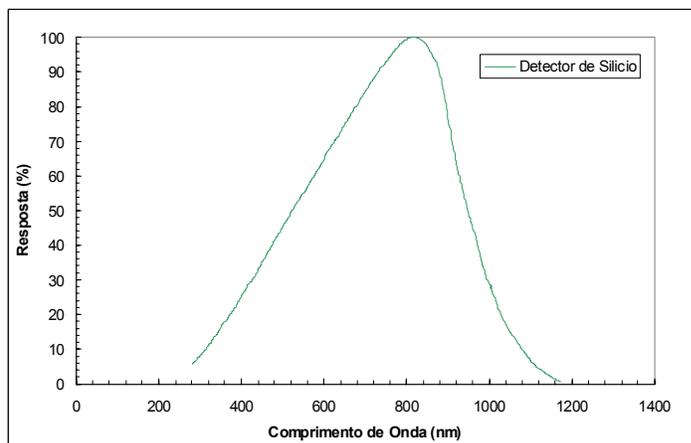


Figura 4.20 - Curva de resposta do detector de silício. Fonte: www.newport.com

Na Figura 4.21 é possível observar a resposta espectral do LDR e do Silício, que foram obtidas pela equação (4.3) e em seguida normalizadas. Por fim a curva

fotóptica do olho humano foi inserida no gráfico para que fosse possível verificar qual a faixa de comprimentos de onda ao qual o LDR é sensível e se esta faixa é compatível com a resposta que o olho humano teria à iluminação.

Como resultado foi possível observar que o LDR que tem sua eficiência máxima para comprimentos de onda de aproximadamente 650nm, tem uma sensibilidade próxima aquela do olho humano e portanto pode ser utilizado para medições de iluminação. A diferença entre as curvas poderia ser corrigida com o uso de um filtro sobre o LDR, no entanto como a diferença não é muito acentuada, bastará criar uma curva de calibração que já considere em seus valores esta pequena diferença. Também é interessante notar como a curva do silício difere da do olho humano, e apesar disto é o mais utilizado para confecção de luxímetros. Isso se deve claramente ao fato de que o filtro utilizado sobre o sensor de silício consegue cortar toda a radiação que esteja fora da faixa desejada. Para uma determinada temperatura de cor da fonte de emissão é possível estabelecer uma correspondência entre o valor medido para o LDR e aquele medido por um luxímetro. Na próxima seção será mostrado o método de predição para dimensionar os painéis no sentido de alcançar um melhor desempenho para fachada norte.

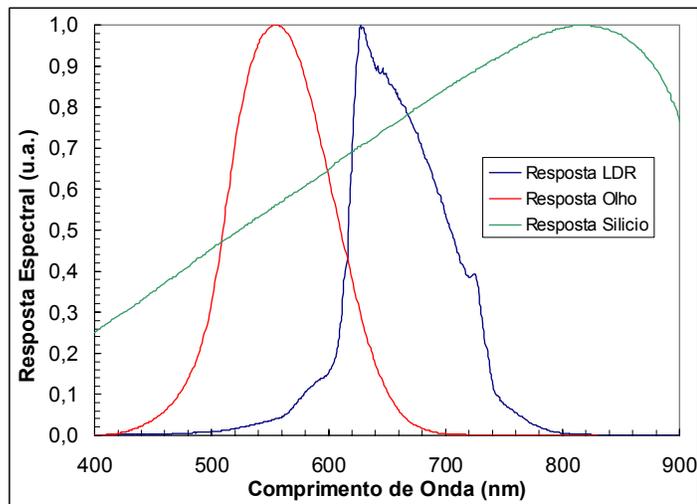


Figura 4.21 - Resposta Espectral do LDR, do silício e do olho humano (curva fotóptica).

4.2 Método de Predição

Para determinar a posição do LCP, Channel Panel, e Prismas, procurando torna-los mais eficientes, no sentido de redirecionar melhor a luz para o interior, foram feitas algumas avaliações mediante ajuda de planilhas eletrônicas. O pré-requisito para desenhar e avaliar qualquer dispositivo que vise o controle solar é conhecer a posição solar durante o ano, para em seguida relaciona-lo com as exigências do edifício (SZOKOLAY, 1997). Portanto, para possibilitar a criação de um sistema de predição, foi necessário, em primeira instância, determinar a posição solar exata (altura solar e azimute) para Campinas e para isso utilizou-se o algoritmo PSA (MURIEL et al., 2000). Este algoritmo, por ser de alta precisão, permite determinar o vetor solar com uma acurácia de 0,5 minutos de arco para o período de 1999 a 2015, idealizado para sistemas solares móveis que necessitem acompanhar a trajetória solar no decorrer do dia. Incorporando o PSA a uma planilha eletrônica é possível obter qualquer altura solar e azimute, para quaisquer datas, latitudes e longitudes. Na Tabela 4.1 encontram-se os valores de altura solar e azimute para Campinas referentes ao período no qual foram realizadas as medições dos DIN nos protótipos montados na Unicamp. Note-se que o valor da altura solar varia de 0 a 90, caso a altura solar esteja acima do horizonte ou negativa, caso esteja abaixo. O azimute varia a partir do norte, sendo portanto positivos os valores no sentido horário (de 0° a 180°), e negativos no sentido anti-horário, com o 0° representando o norte. A única exceção se verifica para a direção Sul, onde os valores podem ser -180° ou +180°, de acordo com a legenda da Figura 4.22.

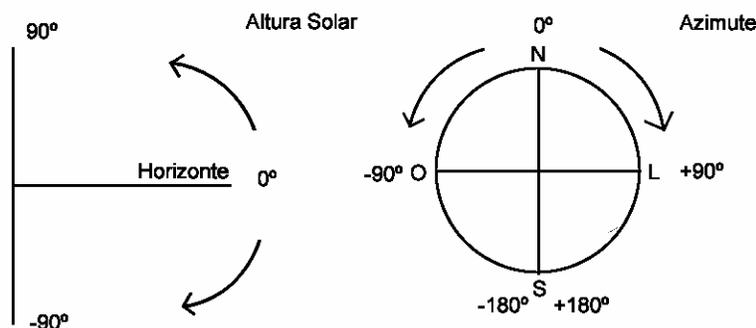


Figura 4.22 – Legenda para a tabela de alturas e azimutes solares

Tabela 4.1 - Altura solar e azimute para Campinas, os valores mostrados se referem ao período no qual foram realizadas as medições dos DIN nos protótipos montados na Unicamp.

| Horário | Marco | | Abril | | Maio | | Junho | | Julho | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Altura | Azimute |
| 06:00 | -1.98067 | 98.28546 | -4.67717 | 86.46603 | -7.1495 | 76.02356 | -9.77965 | 69.89353 | -11.3789 | 69.6641 |
| 07:00 | 11.77402 | 92.53558 | 9.051231 | 80.54356 | 6.07577 | 70.20306 | 2.959412 | 64.36423 | 1.349597 | 64.29774 |
| 08:00 | 25.58963 | 86.63875 | 22.52588 | 73.80903 | 18.77095 | 63.13315 | 15.04567 | 57.44374 | 13.44368 | 57.57916 |
| 09:00 | 39.30925 | 79.72548 | 35.4792 | 65.25221 | 30.57363 | 53.94475 | 26.09438 | 48.45293 | 24.53687 | 48.87508 |
| 10:00 | 52.65987 | 70.11705 | 47.37306 | 53.10389 | 40.81991 | 41.36113 | 35.45981 | 36.50012 | 34.01885 | 37.34589 |
| 11:00 | 64.89443 | 53.38225 | 56.99418 | 34.2698 | 48.33234 | 23.965 | 42.13449 | 20.84417 | 40.93664 | 22.25339 |
| 12:00 | 73.2156 | 17.63257 | 61.87241 | 6.20611 | 51.46924 | 1.987999 | 44.90174 | 2.045547 | 44.10916 | 3.98218 |
| 13:00 | 71.28256 | -32.323 | 59.61848 | -24.3169 | 49.2059 | -20.4484 | 43.06339 | -17.1152 | 42.77291 | -14.9824 |
| 14:00 | 61.08771 | -60.0617 | 51.4673 | -46.6867 | 42.30675 | -38.7131 | 37.09875 | -33.5356 | 37.27035 | -31.5577 |
| 15:00 | 48.33322 | -73.6108 | 40.24875 | -60.9722 | 32.41929 | -52.0061 | 28.19481 | -46.2095 | 28.71697 | -44.5116 |
| 16:00 | 34.80887 | -82.0371 | 27.61445 | -70.6346 | 20.82013 | -61.6514 | 17.43102 | -55.7298 | 18.20014 | -54.2827 |
| 17:00 | 21.02736 | -88.4762 | 14.29615 | -77.909 | 8.243935 | -68.9905 | 5.522282 | -63.0077 | 6.464971 | -61.7399 |
| 18:00 | 7.203199 | -94.2257 | 0.636691 | -84.0276 | -4.90937 | -74.9514 | -7.10273 | -68.7706 | -6.03473 | -67.6112 |
| 19:00 | -6.51883 | -100.048 | -13.172 | -89.7779 | -18.4131 | -80.1692 | -20.1883 | -73.5221 | -19.0267 | -72.4052 |

4.2.1 Laser Cut Panel

Para decidir as dimensões ideais do dispositivo e prever seu comportamento, garantindo o melhor desempenho em função da latitude e longitude de Campinas e da fachada onde será implantado, buscou-se criar, neste estudo, uma ferramenta de simulação que mostrasse o desempenho de cada LCP. Para desenvolver as planilhas que calculariam o desempenho do LCP foi necessário em primeira instância, determinar a posição solar exata, para isso utilizou-se o algoritmo PSA. As equações de determinação da posição solar (altitude e azimute) foram acopladas àquelas fornecidas pelo Prof. Dr. Ian R. Edmonds (EDMONDS, 1993) (vide seção 3.5.11). Desta forma a planilha não estará trabalhando apenas no plano de corte (bidimensional) como se o sol possuísse altitude entre 0° e 90° e estivesse sempre perpendicular a abertura, e sim de forma tridimensional respeitando o caminho solar durante o decorrer do ano.

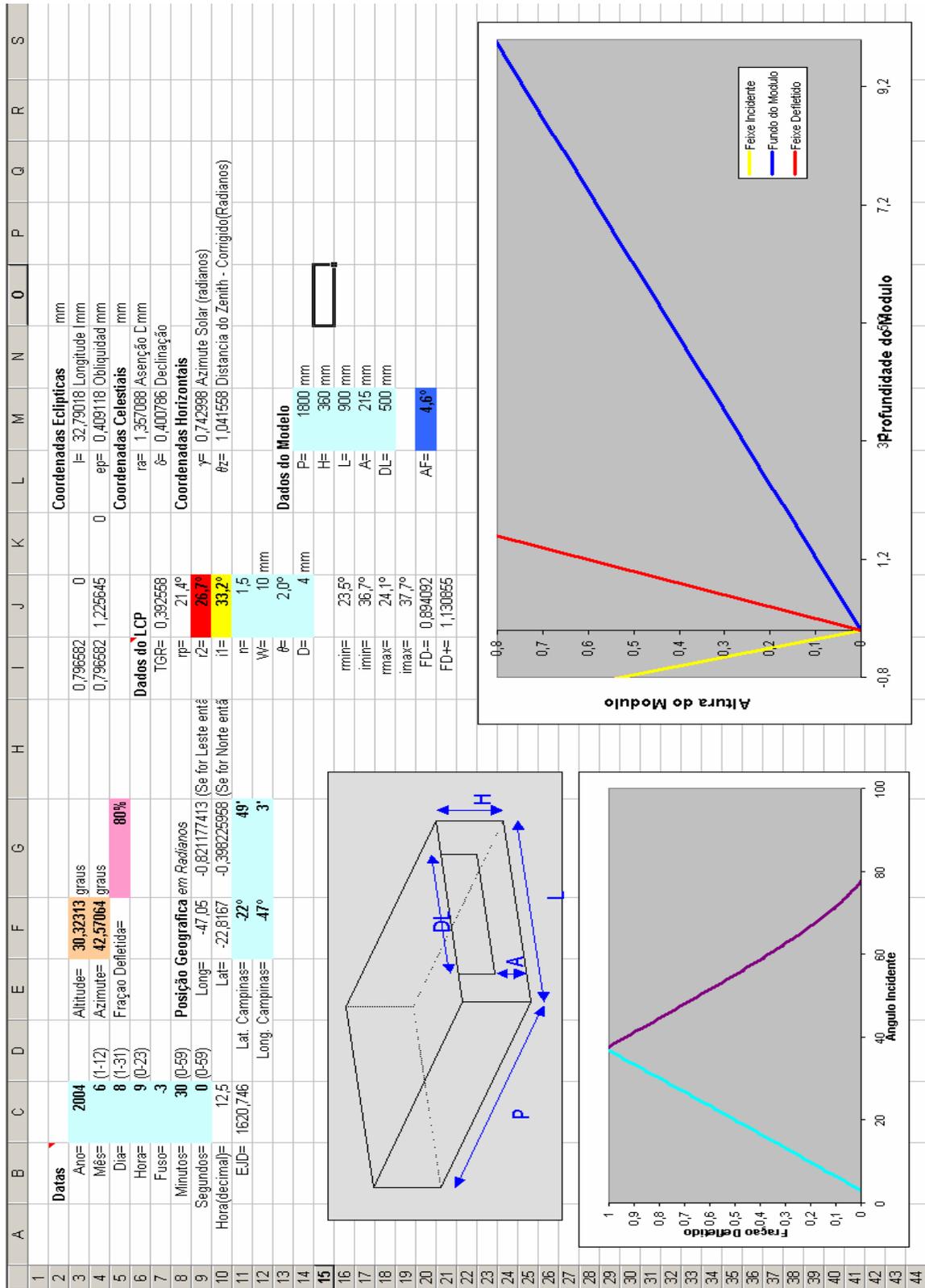


Figura 4.23 - Primeira Planilha. Entrada de dados, dimensões do módulo e posição Solar

Na planilha principal da ferramenta (Figura 4.23) é necessário entrar com os dados referentes as dimensões do ambiente a ser analisado (largura-L, pé-direito-H, profundidade-P, largura da abertura DL e altura do peitoril-A); a data (ano, mês, horas, minutos, segundos); posição geográfica (latitude e longitude) e dados do LCP (índice de refração-n, espessura do painel-W, distancia entre os cortes-D e angulação- θ).

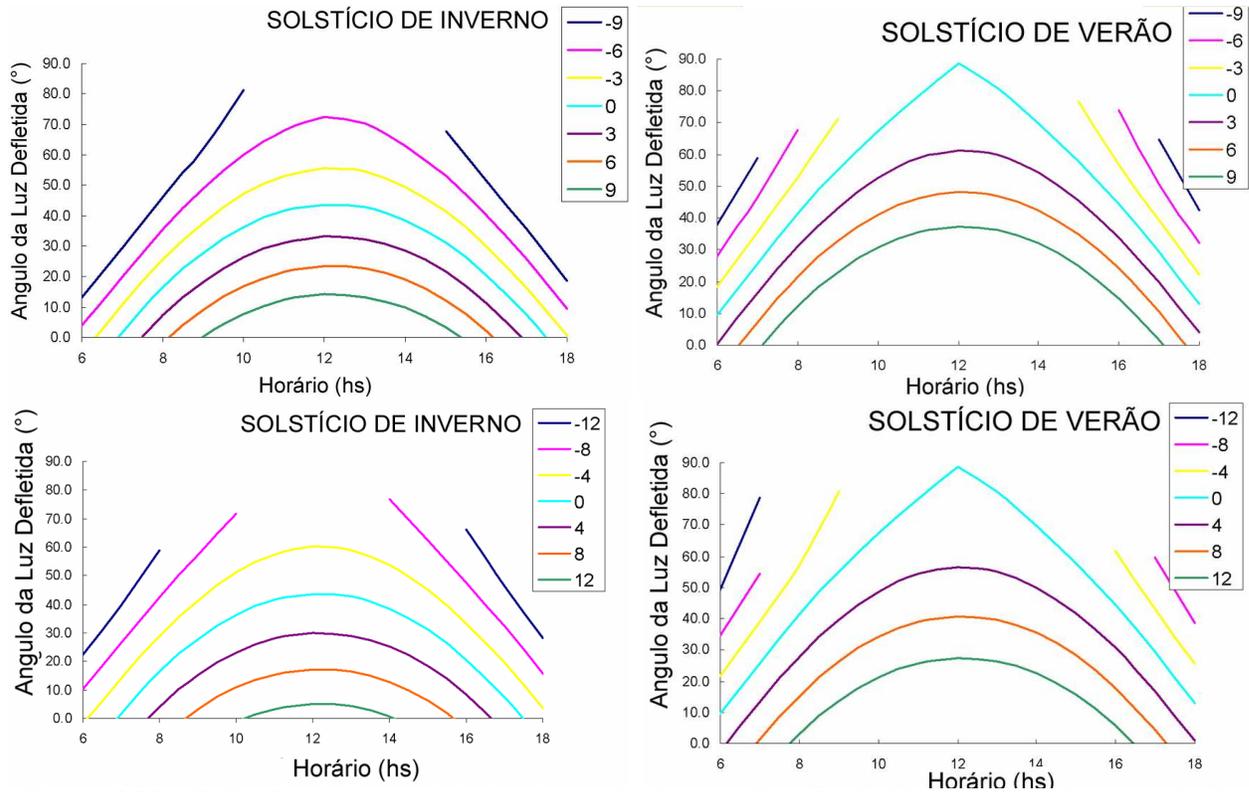


Figura 4.24 – Deflexão da luz no interior dos módulos, em função do Horário. Funcionamento do LCP para diferentes θ , no solstício de verão e inverno para a latitude de Campinas.

Com estes dados será possível identificar para cada espaço, segundo as dimensões fornecidas, qual é o ângulo de fundo (AF- Figura 4.23) ideal. O angulo de fundo corresponde á um angulo dado por uma linha que parte do meio da abertura e termina no ponto mais extremo, no teto do módulo e representa a posição ideal dos feixes redirecionados, onde os mesmos atingem o fundo do teto, sem no entanto descer para a parede do fundo. Para o modelo empregado o $AF= 4,8^\circ$. Este ângulo (Figura 4.23- linha azul) servirá como referência para comparação com o ângulo defletido pelo LCP (Figura 4.23- linha vermelha) em função do ângulo da altitude e azimute. A figura,

por estar em escala também possibilita identificar se os raios conseguem ser redirecionados para o início, meio ou para o fundo do teto. Ao mudar os dados de entrada, será possível visualizar o movimento do ângulo defletido para o interior (r2 linha vermelha). Na planilha, o valor angular do feixe defletido será acusado em graus (r2, célula J9 na Figura 4.23). A fração defletida para o interior (FD) também é calculada, célula G5. O intervalo onde 100% da radiação é defletida é aquele situado entre o ângulo mínimo (r_{min} , célula J16) e o máximo (r_{max} , célula J18).

Apesar de ser uma planilha explicativa, é difícil visualizar o funcionamento de todos os dispositivos através deste gráfico (Figura 4.23) em função de sua particularidade de mostrar o funcionamento do LCP para cada feixe incidente. Por este motivo a segunda planilha (Figura 4.24) mostra o funcionamento de LCPs para diferentes θ , no verão (calculado para data referência 21/12/2005) e no inverno (21/06/2005) para a latitude e longitude específica de Campinas.

Nota-se pelos gráficos que a utilização de LCP com ângulos de corte (θ) negativos não é uma solução adequada para a latitude de Campinas pois no verão este painel redirecionaria a luz somente no horário em que a altitude solar é baixa, entre 6:00 e 8:00 horas e 16:00 e 18:00 horas, portanto fora do horário comercial. Desta maneira um painel com um $\theta < 0^\circ$ não teria um bom desempenho. Vale ressaltar também que os gráficos representam a hora solar verdadeira, o horário de verão não foi incluído.

Interessante notar o funcionamento de três dispositivos comparativamente com $\theta=0^\circ$, $\theta=2^\circ$ $\theta=12^\circ$. Para o primeiro elemento (Considerando-se que, para Campinas a maior altitude solar no verão atinge 88° para horário de 12:00h), o ângulo dos feixes incidentes é complementar ao dos feixes refletidos. Para $\theta=2^\circ$ a luz seria redirecionada, no máximo com um ângulo de 50° para o interior (Figura 4.25). Já para uma placa com $\theta=12^\circ$, no verão, para o mesmo horário o elemento estaria redirecionando a luz com um ângulo de deflexão igual a 30° (Figura 4.25), mais favorável em relação ao primeiro por promover um alcance mais profundo da luz no espaço.

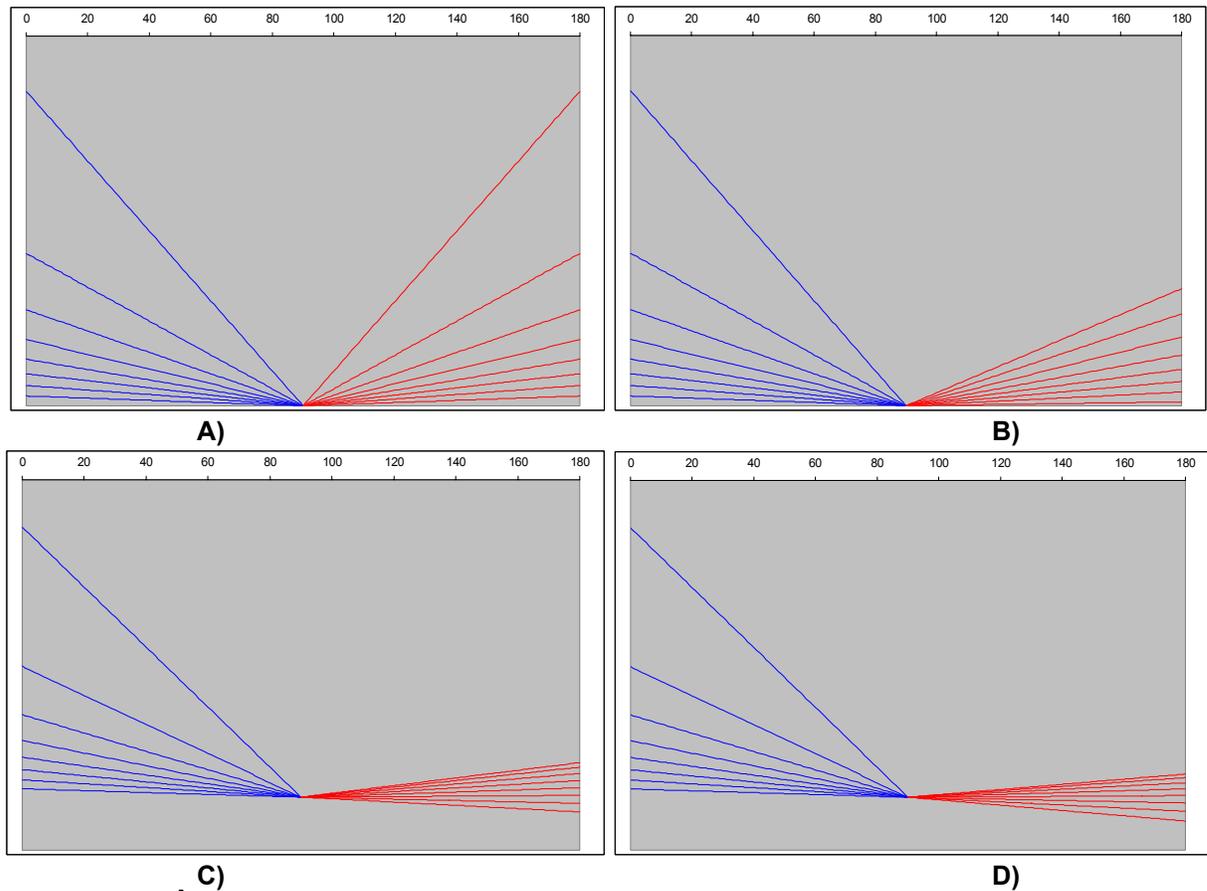


Figura 4.25 - Ângulos solares incidentes e de reflexão interna em Campinas para $\theta=0^\circ$ (A) e $\theta=2^\circ$ (B) e $\theta=9^\circ$ (C) e $\theta=12^\circ$ (D). (Os ângulos são discriminados na planilha).

No entanto no inverno, será mais adequado o desempenho do elemento com $\theta=2^\circ$, pois o ângulo de deflexão máximo terá cerca de 35° permitindo um alcance maior aos feixes. Já para um elemento com $\theta=12^\circ$, apesar do redirecionamento para o horário do meio dia ser muito eficiente, há um direcionamento dos feixes em direção ao plano de trabalho nos horários até 9:30h e após as 15:00h. As planilhas também fornecem gráficos onde é possível visualizar os ângulos incidentes e os ângulos refratados para o interior para cada corte. Note-se a diferença entre um painel com corte $\theta=2^\circ$ e $\theta=12^\circ$, enquanto no primeiro (Figura 4.26), todos os feixes são defletidos para cima, no segundo caso, para algumas angulações, os feixes são redirecionados para baixo, atingindo possivelmente, o plano de trabalho e ofuscando o usuário.

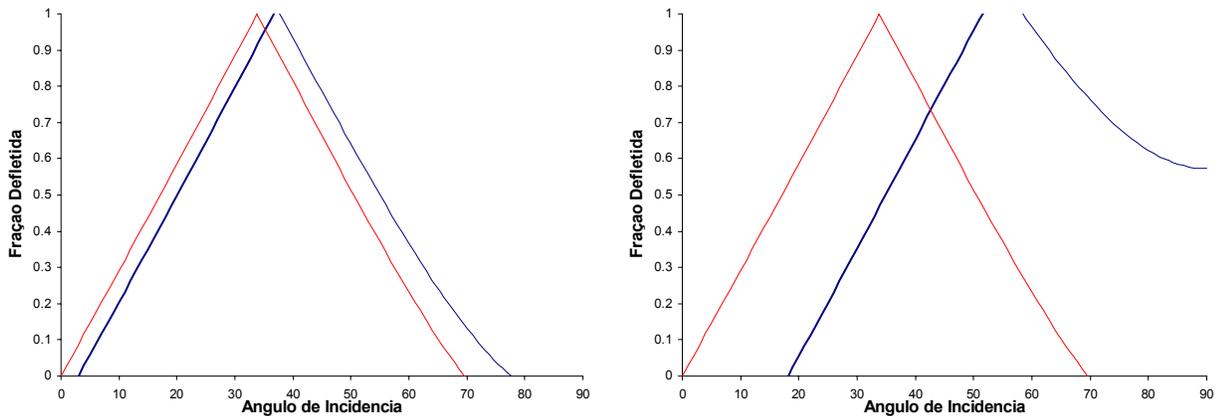


Figura 4.26 - Fração defletida. (a) a curva vermelha mostra a fração defletida para $\theta=0^\circ$ e a curva Azul para $\theta=2^\circ$, em função da incidência solar. (b) A curva vermelha mostra a fração defletida para $\theta=0^\circ$ e $\theta=12^\circ$

É importante notar, no entanto que a fração defletida deve ser considerada, pois é possível que apenas uma pequena porcentagem da radiação incidente total, esteja sendo defletida para baixo. Assim a planilha fornece o gráfico (Figura 4.26) das frações defletidas em função dos ângulos de incidência. A curva vermelha representa o comportamento do LCP para $\theta=0^\circ$, para uma incidência igual a 35° , 100% da radiação estará sendo defletida para o interior; para $\theta=2^\circ$ isto valerá para o intervalo de ângulos entre 36° e 37° e para $\theta=12^\circ$ entre 48° e 53° . Assim se para $\theta=2^\circ$ a luz incide no plano de trabalho antes das 7:00h e depois das 17:00h, no inverno, para $\theta=12^\circ$ isto acontecerá antes das 9:30h e depois das 15:00h até o final da tarde. Analisar a fração defletida relativa a estas angulações dirá se é conveniente ou não a utilização deste LCP com estas configurações. Ao utilizar um com $\theta=2^\circ$ significa que 5% da radiação total atingirá diretamente o plano de trabalho no horários antes das 7:00h e depois das 17:00h. Esta porcentagem não parece ruim, pois em verdade pouca radiação estará entrando de fato no ambiente. Para um painel com $\theta=10^\circ$, 30% da radiação total estará entrando para os horários antes das 9:30h e depois das 15:00h. Aparentemente a carga térmica adquirida neste segundo caso deve ser maior, mas pelo que concerne a eficiência do dispositivo em redirecionar a luz para o interior do módulo, aumentando as iluminâncias no fundo, esta inclinação de θ deve ser a mais adequada. isto pôde ser verificado de fato pelas medições realizadas nos modelos em escala reduzida.

Apesar desta ferramenta ter sido desenvolvida com a finalidade de estimar o funcionamento do LCP para a geometria solar específica de Campinas, a simulação com a planilha pode ser estendida para quaisquer latitudes e longitudes.

4.2.2 Painéis Prismáticos

Da mesma forma que com o LCP, uma planilha eletrônica foi criada para auxiliar no posicionamento do painel prismático no modelo em escala (LORENZ, 2001). Para saber qual deve ser a orientação dos prismas para a latitude de Campinas utiliza-se a fórmula:

$$\tan \omega = \frac{\text{sen } \alpha}{\tan \lambda} \quad (4.7)$$

Considerando a latitude 22° 49' Sul é interessante notar que para latitudes sul e norte a rotação dos prismas fica invertida como mostra o gráfico da Figura 4.27. Desta forma para Campinas (-22° 49') para um azimute $\alpha=0^\circ$ o painel deve ter uma rotação de seu eixo longitudinal, $\omega=0^\circ$, para $\alpha=30^\circ$ $\omega= 100^\circ$ e para $\alpha= 60^\circ$ $\omega=130^\circ$, para uma mesma latitude no outro hemisfério, norte, os painéis serão rotacionados no sentido contrário para $\alpha=30^\circ$ $\omega= -100^\circ$ e para $\alpha= 60^\circ$ $\omega=-130^\circ$.

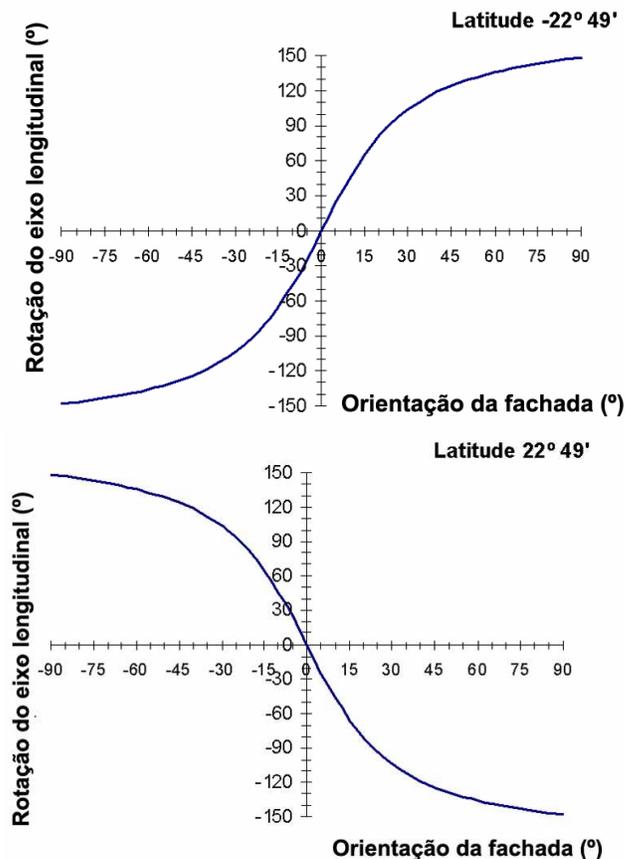


Figura 4.27 - Inclinação do painel prismático (w) em função da variação do azimute, para latitudes 22° 49' Sul (Campinas) e norte.

Como os modelos em escala foram voltados para o norte, o painel prismático não deve ser rotacionado, em seu eixo longitudinal, que, desta forma, permanecerá paralelo ao piso.

4.2.3 Brises

Os brises RETROLux, RETROLuxTherm, RETROFlex e OKASOLAR existem em dois formatos, diferentes, em função do objetivo para qual o brise esta sendo utilizado. Aqueles com uma parte do perfil mais achatado, deve ser localizado na parte superior da abertura de forma que os raios incidentes sejam defletidos com ângulos

menores, o que proporciona um alcance maior da luz para o interior. O posicionamento destes perfis na altura do olho do observador não é adequada pois causa ofuscamento em função dos baixos ângulos de deflexão. Como a estratégia adotada para verificação da eficiência dos perfis foi a capacidade dos mesmos de redirecionar a luz para o fundo do módulo os perfis escolhidos foram aqueles com perfil chato (Figura 4.28 A).

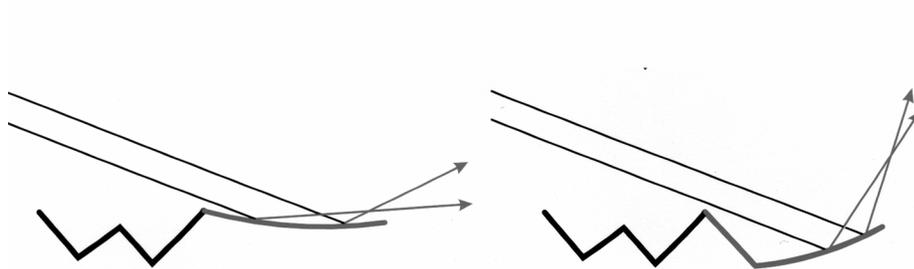


Figura 4.28 - Funcionamento das lamelas achatadas e curvas.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo descreve os resultados de cinco meses de medição da distribuição de iluminância dentro de 4 protótipos, utilizando 12 diferentes dispositivos de iluminação natural, sob condições de céu real em Campinas. O desempenho quantitativo de cada dispositivo pode ser analisado através das iluminâncias absolutas alcançadas no fundo dos protótipos, sendo que as iluminâncias são representadas através de um gráfico de médias mensais, onde as iluminâncias são expressas em função da profundidade do protótipo. Os dados tabelados encontram-se no Cd. A avaliação também foi realizada normalizando-se as iluminâncias registradas nos módulos em relação à iluminância obtida com o uso do vidro comum de 3mm, método pelo qual foram obtidos os gráficos de dados normalizados. O céu foi monitorado, fotografando-se com uma lente olho de peixe, com 183°, as condições de nebulosidade da abobada celeste em dois horários, 8:00 e 17:00hs. Com este dado foi possível separar os dados medidos, para elaborar gráficos para céu claro, parcialmente encoberto e encoberto. O funcionamento dos painéis também foi registrado com uma *webcam* interna aos

módulos que fotografou o interior do protótipo, a cada 10 minutos, no momento exato da medição. Este procedimento auxiliou na identificação de possíveis falhas, (como interferência de pássaros) além de mostrar quais dos dispositivos apresentam dispersão de cores (vide seção 3.2.1).

Antes de conseguir os LCP da Austrália, foi feita uma tentativa de reproduzir este dispositivo aqui no Brasil. O processo de produção é bem simples e tivemos sucesso em fabricar um LCP com cortes de $\theta=0^\circ$, no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, pelo fato deles possuírem um laser de CO_2 para cortes. Para outras angulações haveria necessidades de se fabricar uma cunha oca especial.

5.1 Laser Cut Panel 0°

Dos gráficos das iluminâncias normalizadas apresentadas a seguir é possível observar com clareza a capacidade de redirecionamento do LCP 0° . Note-se que os valores apresentados representam as iluminâncias obtidas pelo painel, divididas por aquelas obtidas com vidro, assim as áreas vermelhas apresentam valores de iluminância que são o dobro daquelas obtidas pelo vidro. As áreas amarelas mostram iluminâncias 50% maiores que aquelas obtidas com vidro, as áreas verdes são iluminâncias iguais ou 25% menores que aquelas obtidas com vidro e as áreas azuis são até dez vezes menores que aquelas obtidas com o vidro. O gráfico foi plotado de forma que é possível visualizar, todas as iluminâncias para os horários de 8:00 as 17:00.

Para este dispositivo com ângulo de corte com $\theta=0^\circ$, os feixes serão defletidos com o mesmo ângulo de incidência ($i=r$) (seção 3.2) assim para este ângulo de corte o dispositivo funciona como se fosse um espelho como pode ser observado através das planilhas eletrônicas apresentadas no capítulo anterior (Figura 4.24 A). Logo para

elevadas alturas solares a luz seria refletida para o teto na região próxima da abertura e não no fundo onde se espera aproveitar melhor essa luz. Já para menores alturas solares o dispositivo redirecionaria a luz mais para o fundo. Este comportamento pode ser observado claramente pelo gráfico de iluminâncias normalizadas, para os meses de Março a Julho (Figura 5.1 a Figura 5.5). Estes gráficos representam a iluminância obtida com cada painel, em dia de céu claro, dividida pela iluminância obtida com um vidro comum de 3mm (seção 4.1.1.1) e portanto o desempenho de cada painel em relação ao vidro.

O comportamento da luz no interior do módulo fica evidente devido a grande quantidade de radiação incidente, visto que a abobada celeste não está coberta por nuvens. Assim, para maiores alturas solares, como em Março, (Figura 5.1), os feixes são redirecionados nas proximidades da abertura e a medida que a altura solar diminui a luz passa a ser redirecionada para o fundo do protótipo, assim nota-se que a Mancha que representa as maiores iluminâncias desloca-se em direção ao fundo do módulo a medida que a altura solar mensal diminui. (Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5). Note-se que, assim que a altura solar começa a aumentar novamente, no mês de Julho (Figura 5.5) (para alturas solares em Campinas vide Tabela 4.1) o gráfico das iluminâncias volta a mostrar maiores valores no centro do módulo.

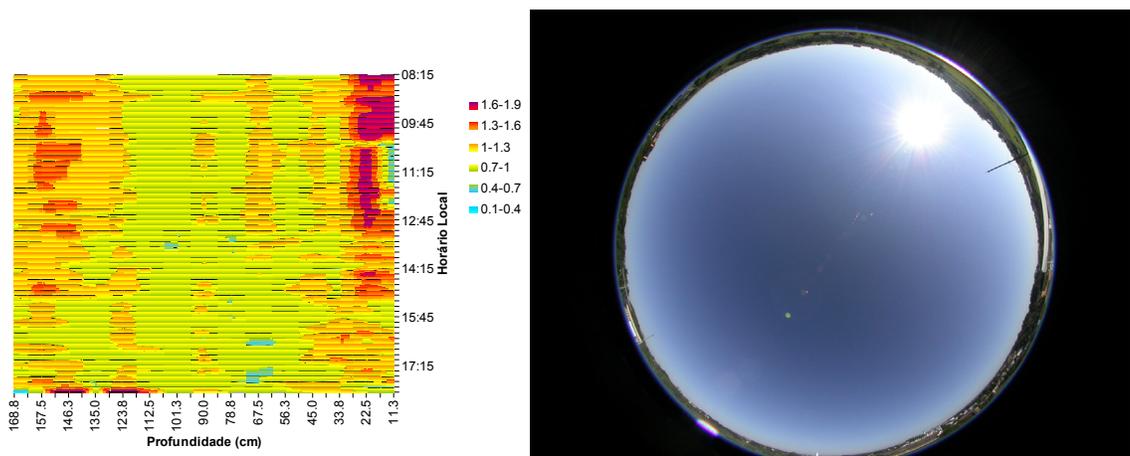


Figura 5.1 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

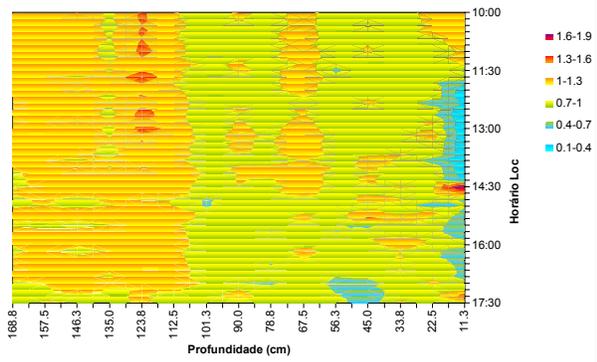


Figura 5.2 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

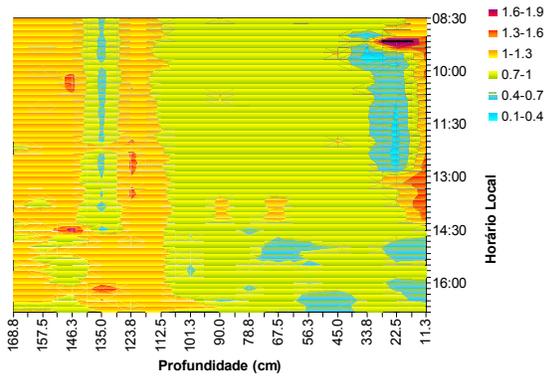


Figura 5.3 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

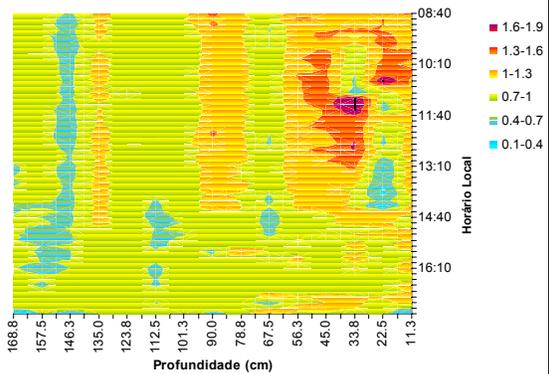


Figura 5.4 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

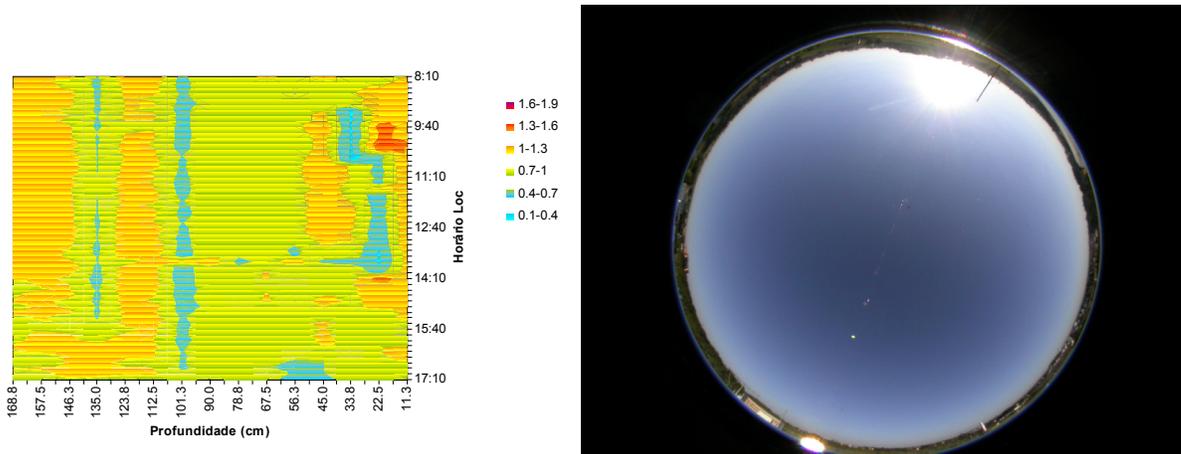


Figura 5.5 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho.

Para céu encoberto a relação de dependência com a altura solar fica menos perceptível, em função da luz ser difusa e é possível perceber que a diferença em função da altura solar é bem menos marcante, assim tanto em Março como em Abril as iluminâncias no fundo do modulo aumentaram no máximo cerca de 25% em relação ao vidro,(Figura 5.6 e Figura 5.7) o que mostra que a eficiência do dispositivo está ligada á radiação solar direta que incidiria no painel.

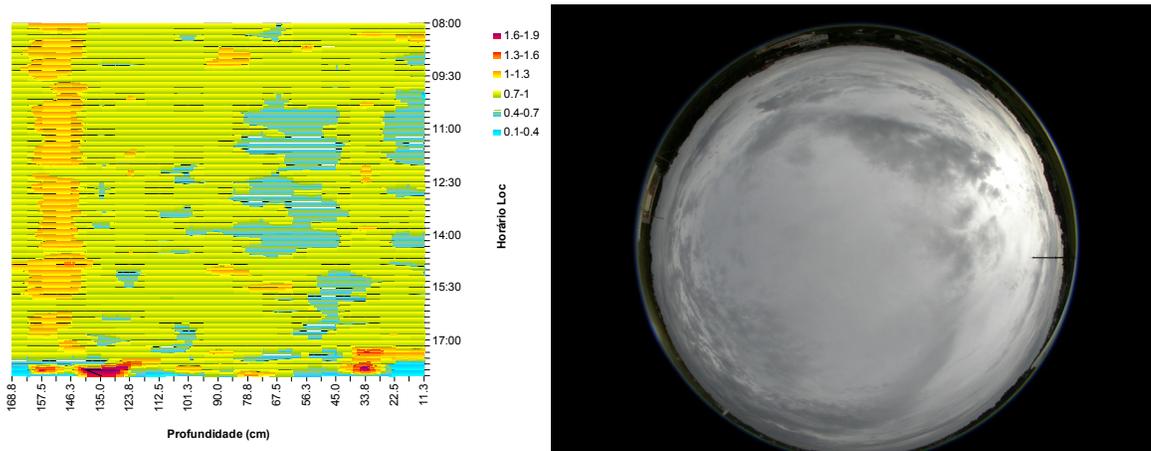


Figura 5.6 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu encoberto em março.

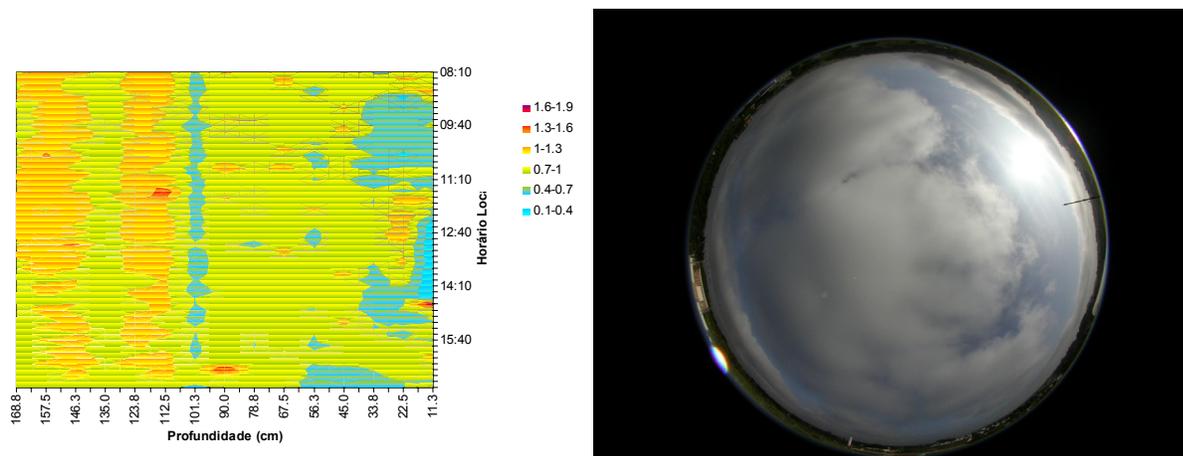


Figura 5.7 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu encoberto em abril.

5.1.1 Fotos Internas

A Figura 5.8 mostra algumas fotos tiradas no interior do protótipo, mediante a fotos, é possível perceber que com este dispositivo não se verifica nenhuma dispersão de cor. Principalmente durante o período matutino, com alturas solares menores, o painel não redireciona toda a luz que portanto incide no primeiro sensor. No entanto é importante notar que os elevados valores registrados (Figura 5.1), aproximadamente o dobro daqueles registrados com o vidro, não são devidos unicamente a incidência da radiação solar pois com o uso do vidro a radiação direta também incide nos sensores, sendo portanto este efeito devido, também, ao redirecionamento do painel.



Figura 5.8 – Sequência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

5.2 Laser Cut Panel 9 °

Estudos com estes dispositivos tem mostrado que a limitação para painéis com $\theta=0^\circ$ reside no fato de que, a iluminação no ambiente varia de forma que o ângulo de incidência é igual ao de reflexão, (seção 3.2) o que torna o painel pouco eficiente para elevadas alturas solares. Por este motivo optamos por testar painéis com cortes inclinados. A inclinação dos cortes, foi escolhida de acordo com a capacidade do dispositivo de redirecionar a luz para o interior. Para um LCP com $\theta=9^\circ$, foi previsto que o dispositivo seria capaz de redirecionar a luz, em março, com um ângulo de reflexão máximo (r_{\max}) de 32° , ao meio dia. Para junho o $r_{\max}=20^\circ$ e para o mês de dezembro $r_{\max}=40^\circ$.

Dos gráficos das iluminâncias normalizadas nota-se, pelo aumento das áreas vermelhas e alaranjadas, que a capacidade de redirecionamento da luz direta, para céu claro, aumentou em até 100% em relação as iluminâncias em relação ao protótipo com vidro (Figura 5.9, a Figura 5.11,). Em Março, com alturas solares maiores a iluminação aumenta no meio do módulo, principalmente no período matutino. Note-se que em Junho (Figura 5.12), pra alturas solares menores, o painel já perdeu um pouco da sua capacidade de redirecionamento se comparado a Março, onde os valores alcançados, embora altos, são 60% maiores aqueles registrados com o vidro (Figura 5.12). O mesmo comportamento se repete para dias de céu parcialmente coberto, o que comprova que o LCP é um dispositivo que trabalha principalmente com o redirecionamento da luz direta, sendo que existe uma contribuição e portanto uma sensível melhora dos níveis de iluminação com céu encoberto

Comparando o desempenho do LCP 0° com o LCP 9° percebe-se que o primeiro não tem a mesma capacidade de redirecionamento que o segundo. Isto fica evidente nas médias mensais (figura 5.10) onde, para o mês de março a uma distancia de 150 cm da abertura foi registrada uma media de 250lux e a 90cm da abertura, uma iluminância de 800lux. Já em junho, para as mesmas distâncias foram registrados valores de 800 e 1400lux respectivamente.

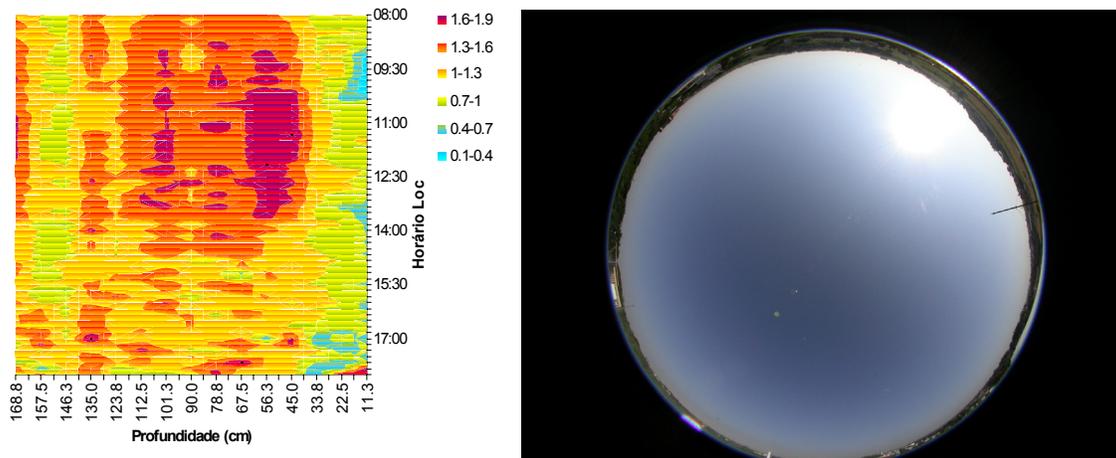


Figura 5.9 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

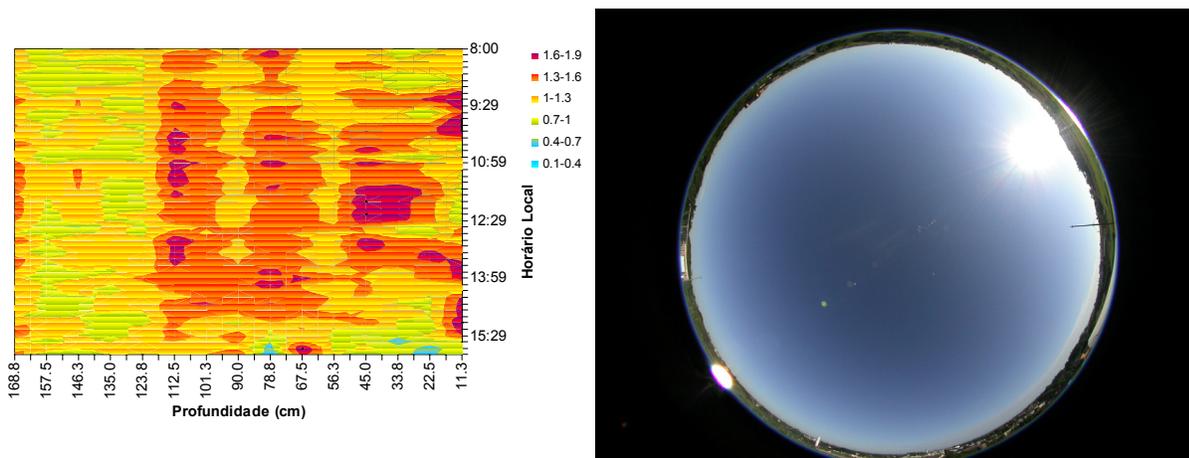


Figura 5.10 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

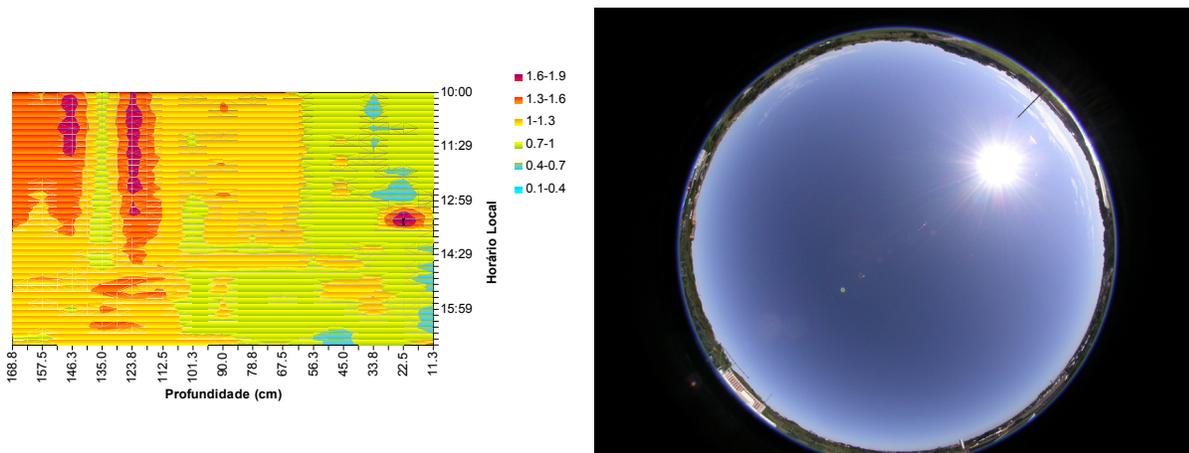


Figura 5.11 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

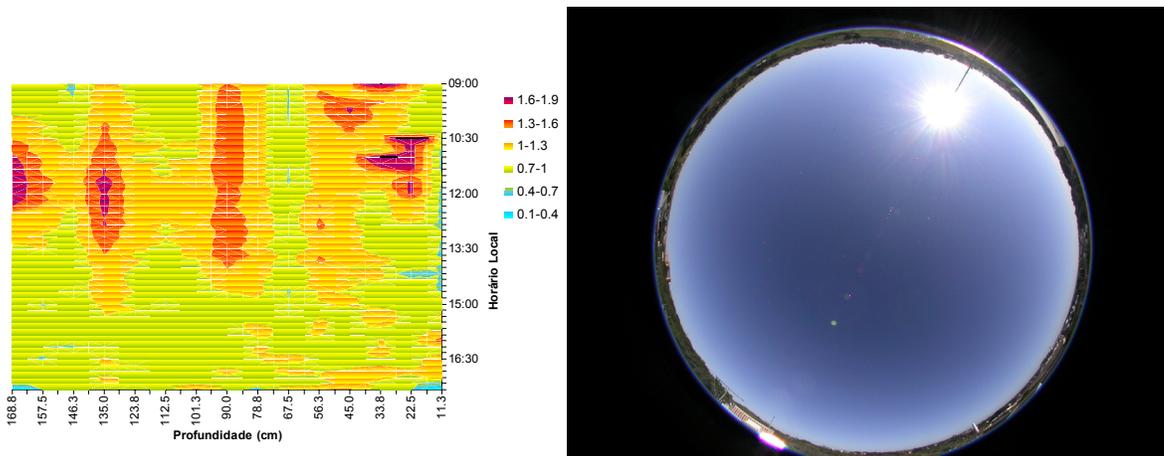


Figura 5.12 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

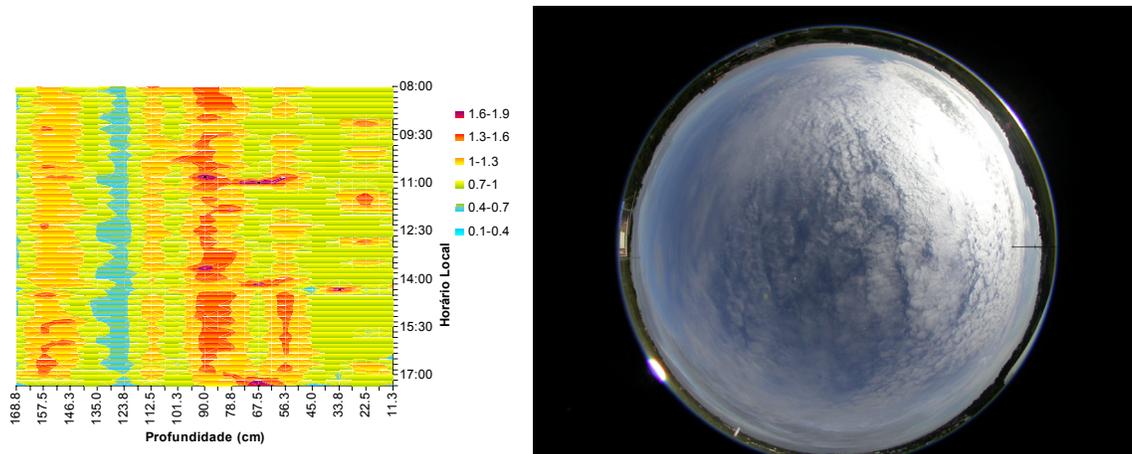


Figura 5.13 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março.

5.2.1 Fotos Internas

A Figura 5.14 mostra algumas fotos tiradas no interior do protótipo, mediante a fotos, é possível perceber que com o LCP 9° não se verifica nenhuma dispersão de cor. Fica evidente que a luz se difunde pelo teto do modulo, principalmente durante o período que vai de 12:00 as 15:30hs. a partir das 11:00hs, o painel redireciona toda a luz que portanto não incide no primeiro sensor, já a partir das 10:00hs. No entanto a

partir das 15:00 hs pode ser verificada uma mancha de sol na parede direita do protótipo.



Figura 5.14 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

5.3 Laser Cut Panel 12°

Inclinando ulteriormente o corte das placas acrílicas ($\theta=12^\circ$) o LCP passa a redirecionar, para o horário de 12:00h com um $r_{\max}=18^\circ$ no mês de março, um $r_{\max}=5^\circ$ em junho e 25° em dezembro.

Dos gráficos das iluminâncias normalizadas nota-se a capacidade de redirecionamento da luz direta no LCP 12° é ainda maior que no LCP 0° e no LCP 9°. (Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18) e durante um período muito maior do dia o LCP 12° consegue aumentar para mais de 100% as iluminâncias, sendo que em Junho ainda mantém um bom desempenho.

Podemos perceber pelas áreas roxas e alaranjadas que mesmo que a altura solar diminua as iluminâncias no fundo do modulo são muito elevadas em relação aquelas obtidas com o vidro. Da mesma forma que se verificou com os outros painéis LCP o desempenho se reduz bastante em caso de céu nublado (Figura 5.20).

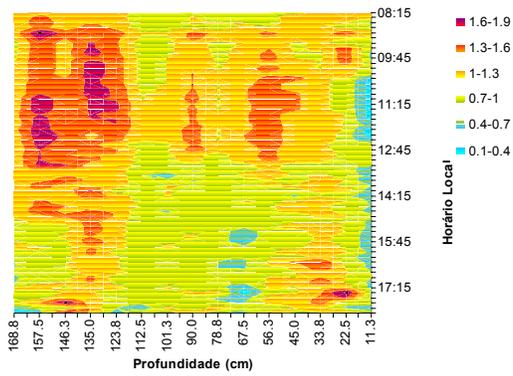


Figura 5.15 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

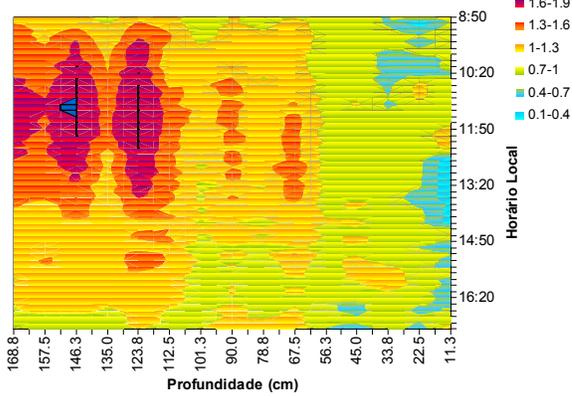


Figura 5.16 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

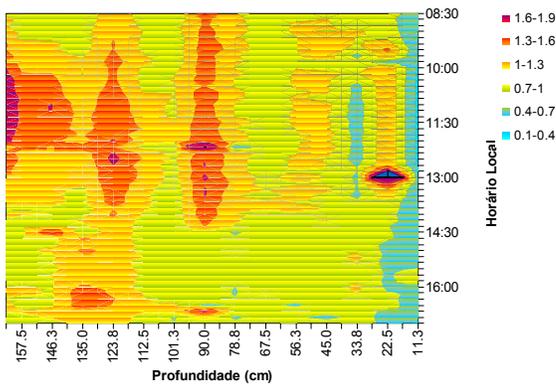


Figura 5.17 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

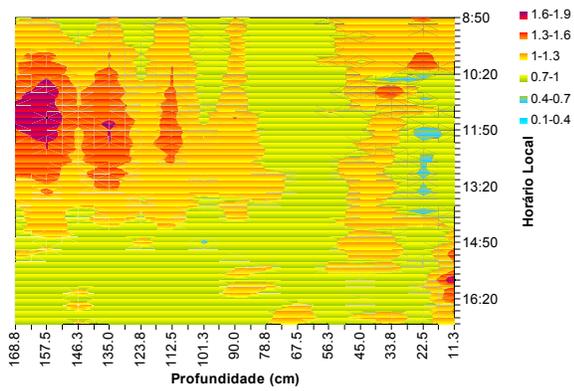


Figura 5.18 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

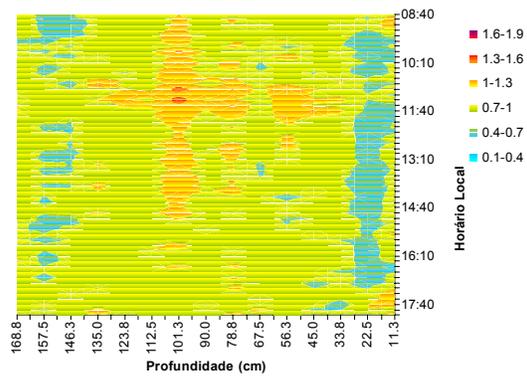


Figura 5.19 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março.

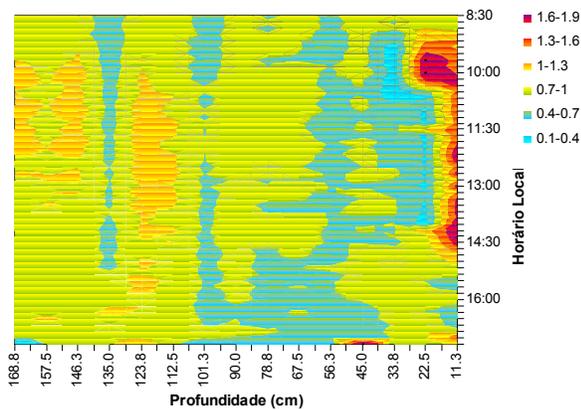


Figura 5.20 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em junho.

5.3.1 Fotos Internas

Embora este painel tenha se mostrado muito eficiente em sua capacidade de redirecionar a luz para o fundo do módulo, foi possível observar pelo monitoramento fotográfico que o painel gerou, no teto, nas proximidades da abertura uma mancha de luz intensa que causa um certo ofuscamento, o que não se verificou com tamanha intensidade com o uso dos outros painéis.



Figura 5.21 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

5.4 Channel Panel

Inclinando os cortes no painel este torna-se mais eficiente, mas apenas para apenas um época do ano, de fato neste estudo não foi possível realizar as medições no solstício de verão, mas se o tivéssemos feito, de acordo com o Prof. Dr Ian R. Edmonds teríamos verificado que os cortes (θ) do painel deveriam ser direcionados de maneira oposta. Esta constatação levou o Prof. Dr. Ian R. Edmonds ao desenvolvimento de um outro dispositivo denominado Channel Panel, que segue a mesma estratégia dos LCP. Este dispositivo, que consiste na sobreposição de dois painéis de LCP, para que o painel seja capaz de redirecionar a luz para todas as alturas solares sem causar excessivo contraste, deforma que as superfícies refletoras formem um V no interno dos painéis.

As iluminâncias registradas com este painel são, de maneira geral inferiores aquelas registras com o LCP 12°, (Figura 5.22) isto deve-se a própria configuração do Channel, que ao invés de ser composto por uma única placa de acrílico, é composta por duas placas sobrepostas. Ainda assim os valores registrados no fundo do modulo são superiores, chegando até a atingir o dobro que os valores obtidos com o uso do vidro, para alturas solares mais baixas, como em abril e Maio, (Figura 5.23 e Figura 5.24). O Channel Panel também mostrou-se mais eficiente que o LCP 0°

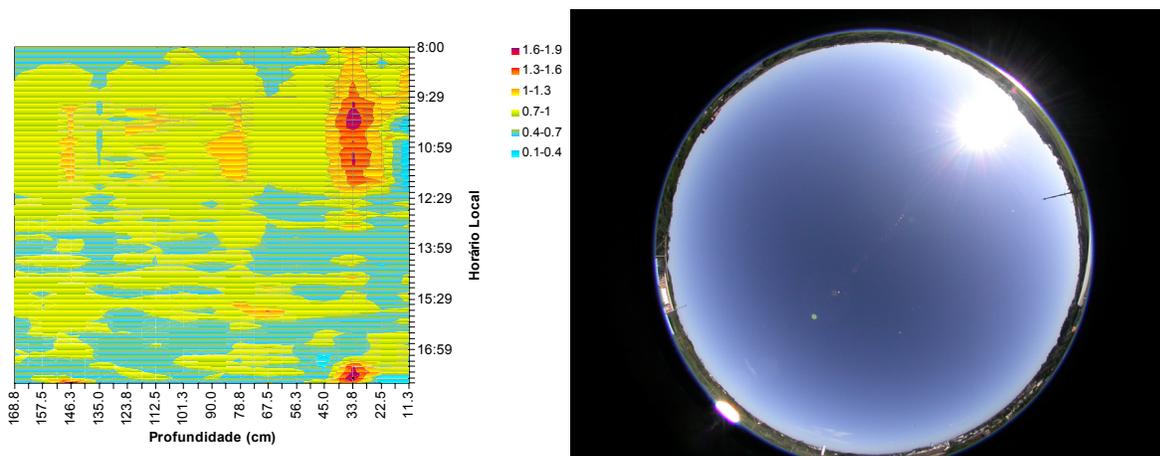


Figura 5.22 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

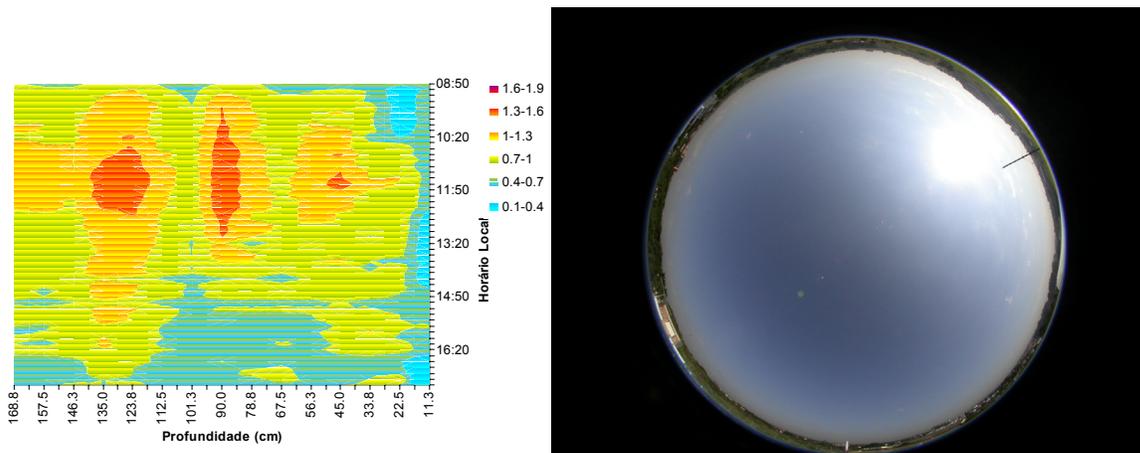


Figura 5.23 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

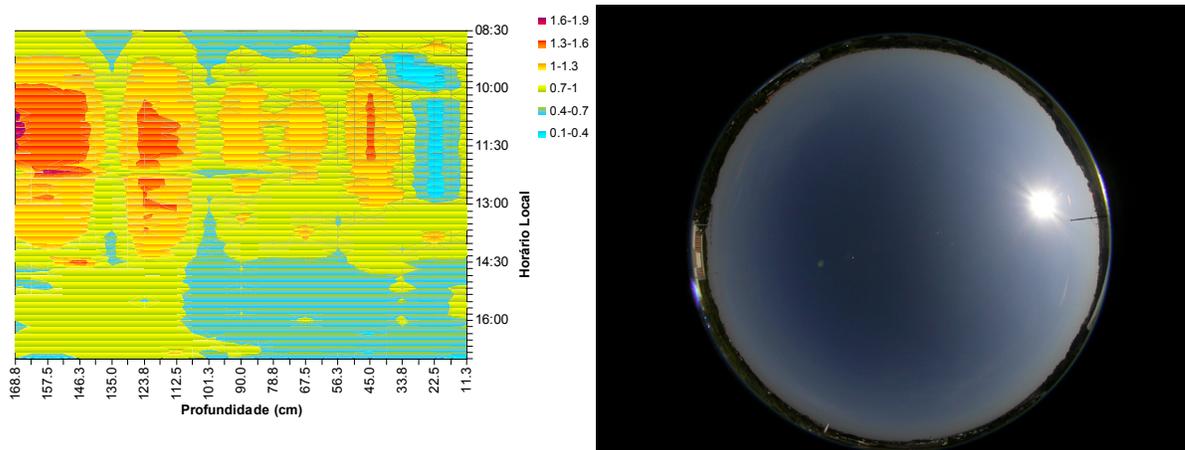


Figura 5.24 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

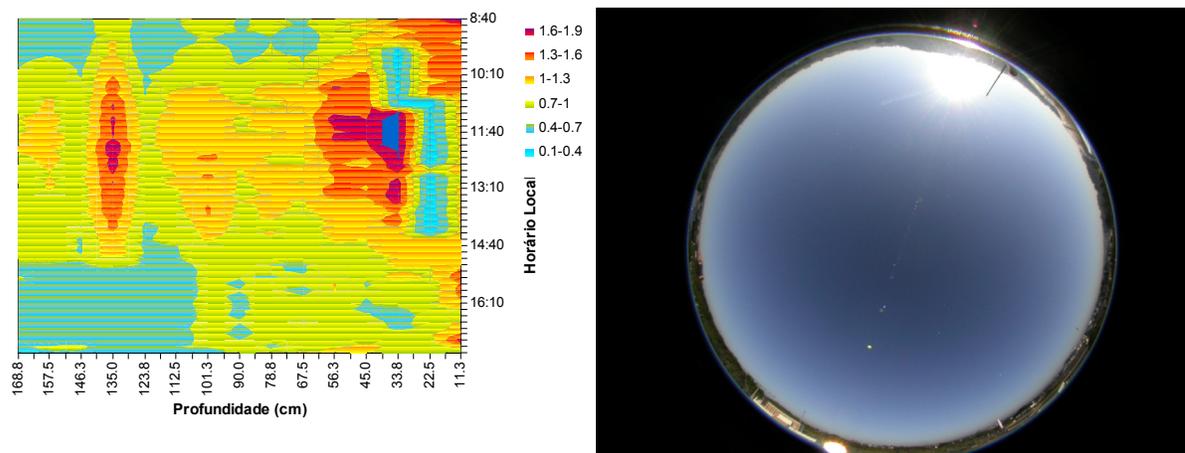


Figura 5.25 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

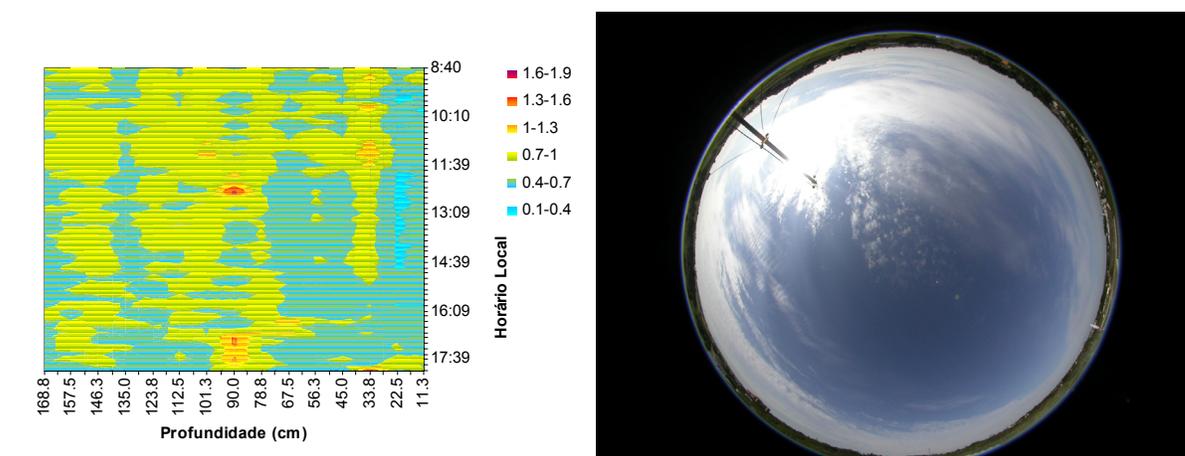


Figura 5.26 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março.

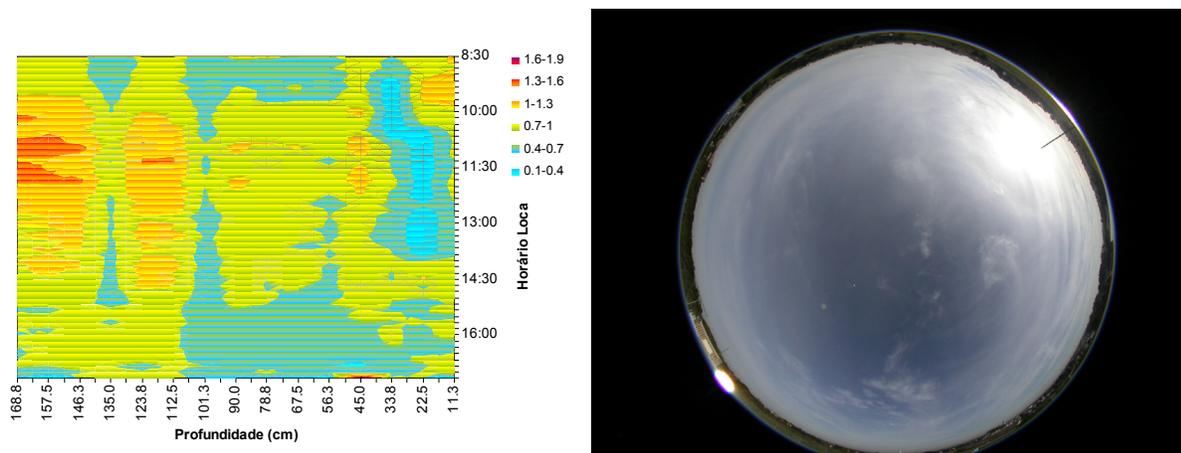


Figura 5.27 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em junho.

5.5 Prismatic Panel

O Painel Prismático, mostrou ser eficiente para maiores alturas solares, que pode ser verificado nas medições de Março e Abril e está representado nos gráficos pelas áreas laranjas (Figura 5.28 e Figura 5.33). Para o mês de abril o painel prismático conseguiu atingir aumento em 60% nas iluminâncias no interior do modulo, quando a altura solar é máxima e alcança os 72°. No entanto para os meses de baixas alturas ele rejeitou a componente direta da luz tornando o ambiente escuro, com valores inferiores aqueles registrados com o vidro (Figura 5.34, Figura 5.30, Figura 5.31).

Analisando a tabela das alturas solares de Campinas (Tabela 4.1) e comparando os valores medidos é possível perceber que este painel funcionou apenas para alturas solares maiores que 35°. Por exemplo para Maio (Figura 5.30), quando a altura solar varia de 40° a 50° no horário de 10:30 a 12:00hs, o painel apresenta um leve redirecionamento, para horários inferiores as 10hs, quando a altura solar é inferior a 40° o painel torna-se menos eficiente do que um painel de vidro comum. O mesmo acontece em Junho para o mesmo horário, visto que a altura solar neste período varia de 35° a 45° (Figura 5.31). Para céu claro para a maior altura solar (março, Figura 5.28) a área próxima da abertura permanece escura, enquanto no fundo do modulo as iluminâncias aumentaram cerca de 60% (Figura 5.28), o que pode ocasionar ofuscamento dentro do ambiente, principalmente no período entre 11:00h e 12:30h.

Para céu coberto o painel prismático, em relação ao vidro, manteve elevados valores para alturas solares maiores, portanto no mês de março (Figura 5.33), mas reduziu bruscamente as iluminâncias, em cerca de cerca de 50% para alturas solares baixas (Figura 5.34) comprovando mais uma vez que para alturas solares inferiores a 35 este dispositivo não redireciona a luz, e devido a espessura do painel, o ambiente torna-se mais escuro do que se fosse utilizado um vidro comum.

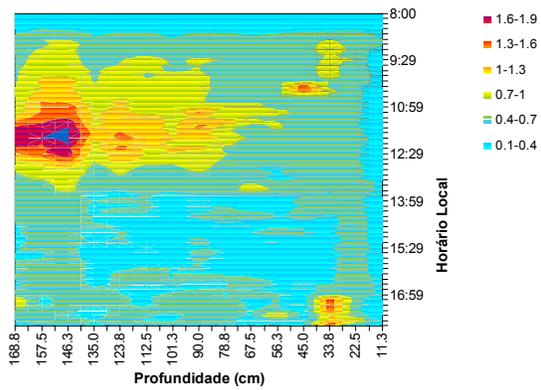


Figura 5.28 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

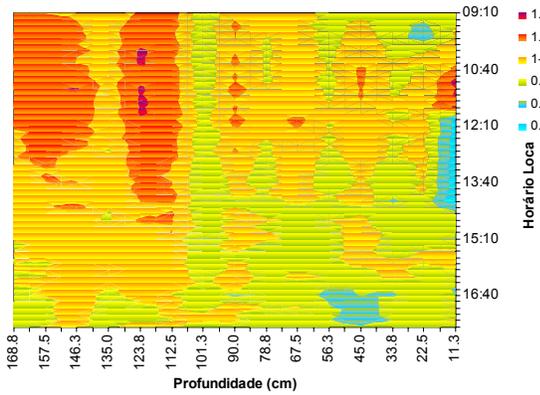


Figura 5.29 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

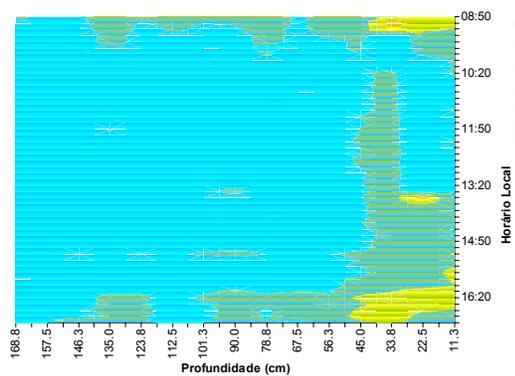


Figura 5.30 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

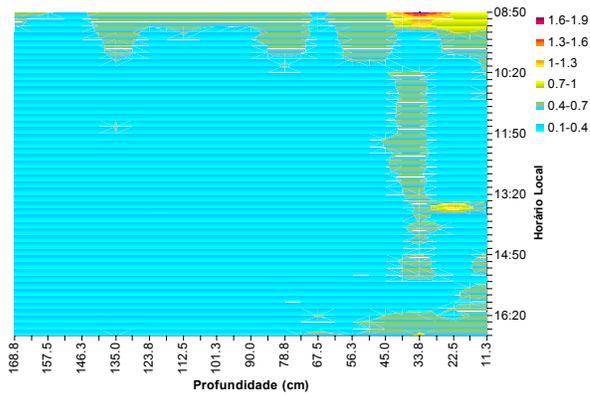


Figura 5.31 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

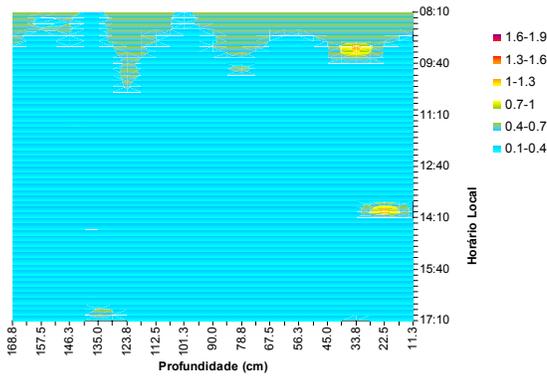


Figura 5.32 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho.

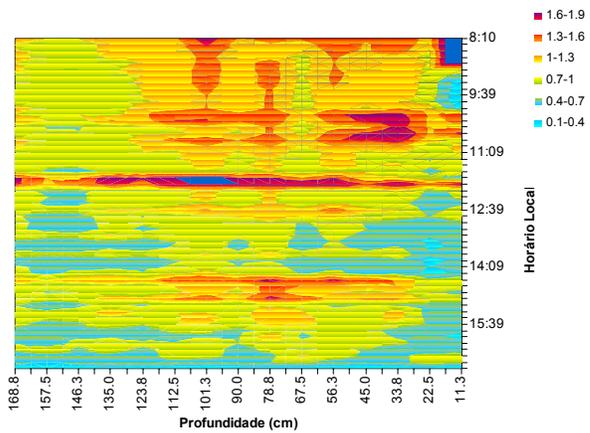


Figura 5.33 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente nublado em março.

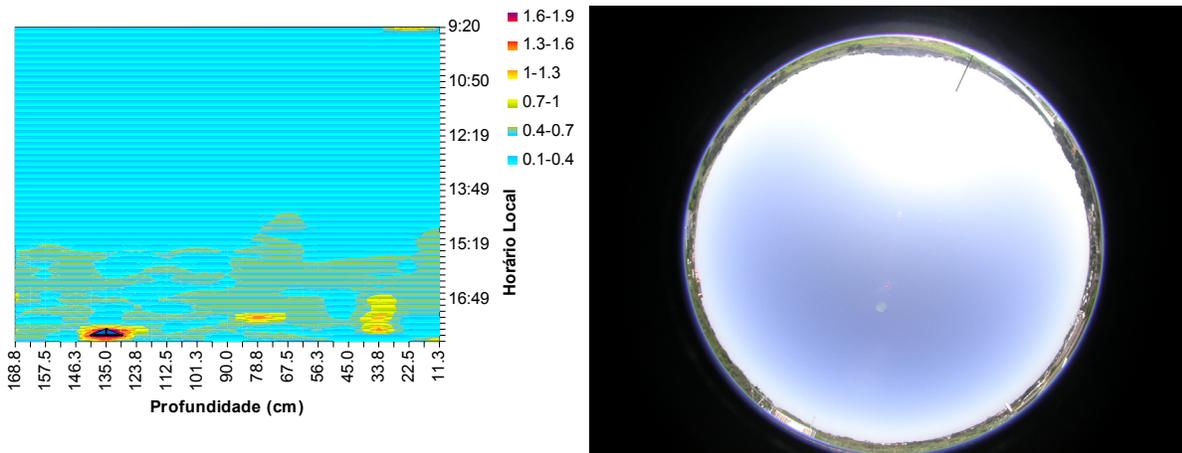


Figura 5.34 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril.

5.5.1 Fotos Internas

O painel prismático mostrou um alto grau de difração, (Seção 3.2.1) o que gerou uma gama de cores refletidas no interior do ambiente. Na Figura 5.35, o momento em que o painel prismático redireciona a luz, no horário de 9:00h, para uma altura solar de 40°. Uma das limitações da medição com este painel foi o tamanho do mesmo, pois este era 4 cm menor que os outros testados. Assim ao testar este painel as laterais do vidro correspondentes foram encobertas de forma que foi possível fazer a comparação entre estes gráficos e os dos outros painéis. O mesmo procedimento foi adotado para as outras amostras, de dimensões bem inferiores (TIM, Okalux e Okasolar).



Figura 5.35 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

5.6 RETROLux

O painel RetroLux não mostrou ter capacidade de redirecionamento durante o horário comercial, apenas para alturas solares muito baixas, aproximadamente 20° , o painel apresentou algum redirecionamento que pode ser notado pelas regiões amarelas dos gráficos (Figura 5.36 a Figura 5.39). Note-se que em Julho, após as 15:00hs, quando a altura solar é levemente inferior a 30° (para altura solar consultar Tabela 4.1), o painel tem um leve aumento nos valores das iluminâncias, que porém, não são maiores que 25% das iluminâncias registradas com o uso de um painel de vidro. Assim de maneira geral pode ser notado que antes das 9:00hs e após as 17:00 o painel apresenta alguma modificação em relação ao vidro, de maneira geral as iluminâncias sofrem uma grande queda, o que indica que a radiação solar direta esta sendo excluída do ambiente. Este de forma geral torna-se mais escuro, se comparado a utilização de uma placa de vidro comum. Com a utilização deste painel, note-se, no entanto, que a iluminação ao longo do ambiente torna-se completamente homogênea. Assim se com um painel de LCP, Channel panel ou prismático a iluminação aumenta no fundo do modulo com este painel consegue maior uniformidade.

Existe uma grande possibilidade, de acordo com o que as medições apontam, deste dispositivo ser muito mais eficiente para Latitudes baixas, onde a altura solar não seja superior a 40° . Desta forma o painel conseguiria um melhor redirecionamento para o fundo do ambiente.

Para céu encoberto o painel também não mostrou um bom desempenho, sendo este inferior aos painéis de LCP, Channel e Prismáticos (Figura 5.39).

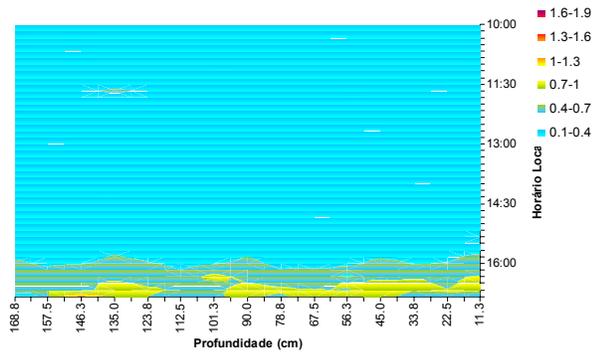


Figura 5.36 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

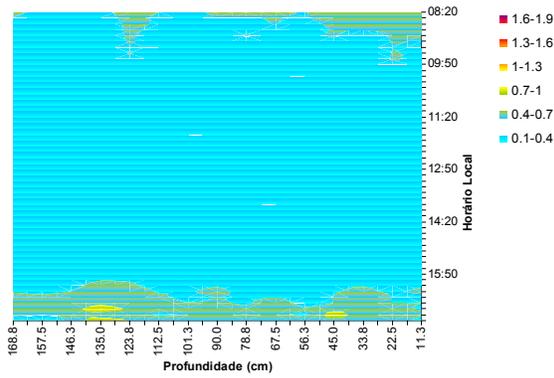


Figura 5.37 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

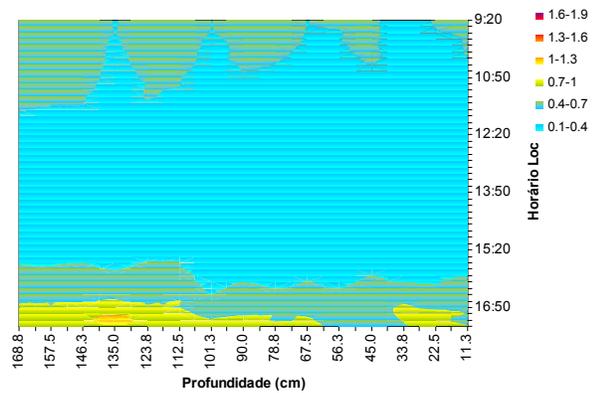


Figura 5.38 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho.

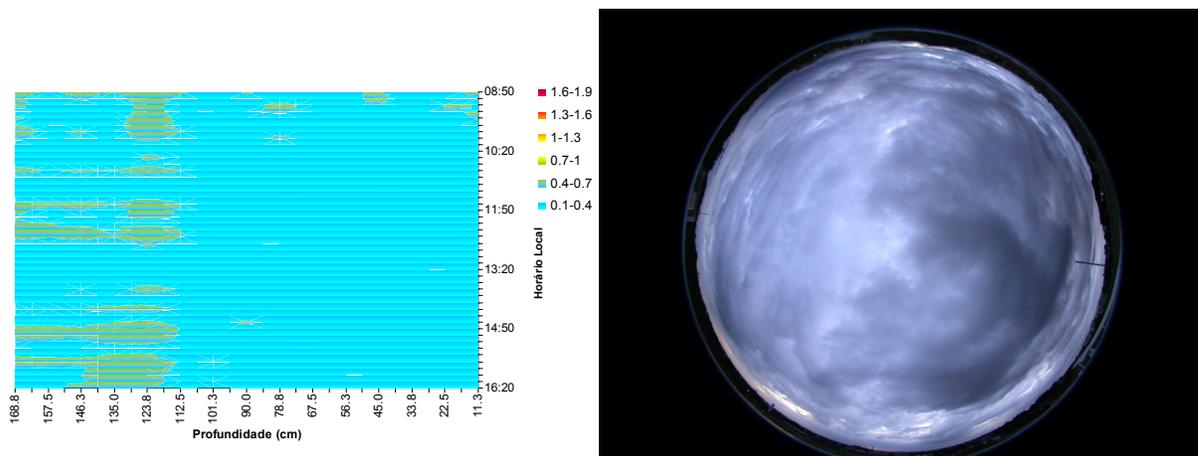


Figura 5.39 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio.

5.6.1 Fotos Internas

Embora os gráficos normalizados não tenham mostrado um bom desempenho para o RetroLux, para a latitude de Campinas, (Figura 5.32 a Figura 5.39), o monitoramento fotográfico mostrou que este dispositivo manteve uma iluminação homogênea, com ausência de grandes contrastes entre as porções próximas e distantes da abertura. Embora sutil, a variação das iluminâncias, de acordo com o registro dos sensores pode ser identificada visualmente e pela Figura 5.40 é possível notar que houve um maior redirecionamento em direção ao teto para o horário de 9:00hs. que vai diminuindo a partir das 10:00hs.



Figura 5.40 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

Diferentemente dos painéis prismáticos e LCP nenhum problema de ofuscamento ou difração foi percebido pelas fotografias, durante todo o período de medição. Das medições é possível concluir que o comportamento deste painel foi excluir a radiação, ao invés do que redireciona-la, o que pode ser uma grande vantagem para o controle térmico do ambiente.

5.7 RETROLuxTherm

Apesar de apresentar um comportamento semelhante ao RETROLux, no sentido de excluir a luz direta, o RETROLuxTherm conseguiu distribuir a luz, principalmente para alturas solares menores (junho, Figura 5.44). Note-se que para este período o dispositivo teve um comportamento semelhante em todos os meses. Para ângulos solares baixos, inferiores a 45° percebe-se um pequeno redirecionamento (Figura 5.41 e Figura 5.43). Os dados registrados foram ainda menores que aqueles obtidos com o RetroLux.

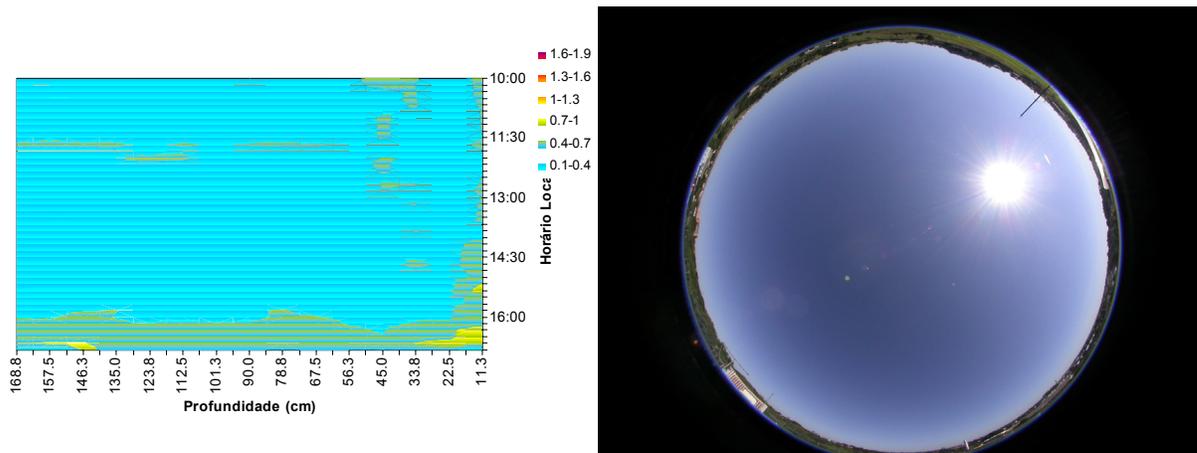


Figura 5.41 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

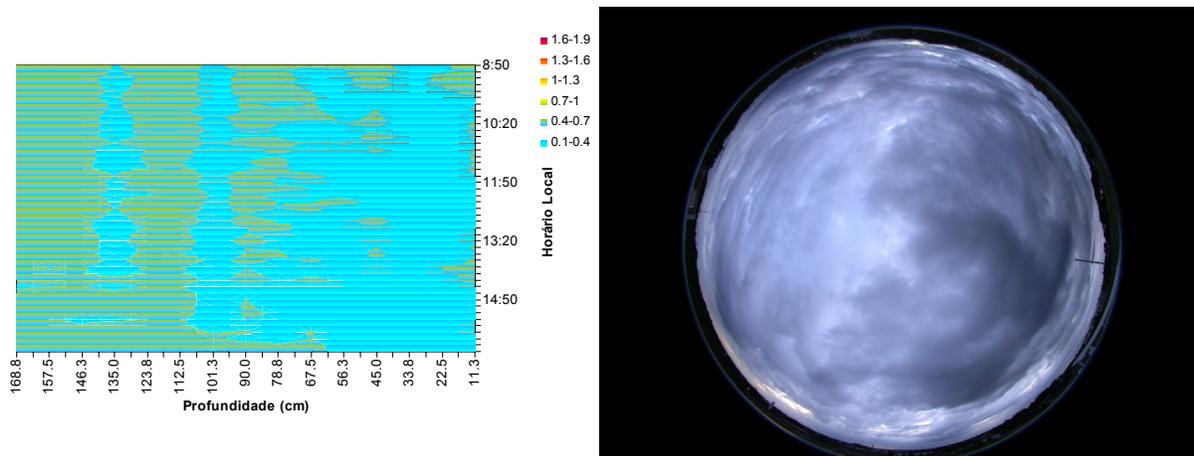


Figura 5.42 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio.

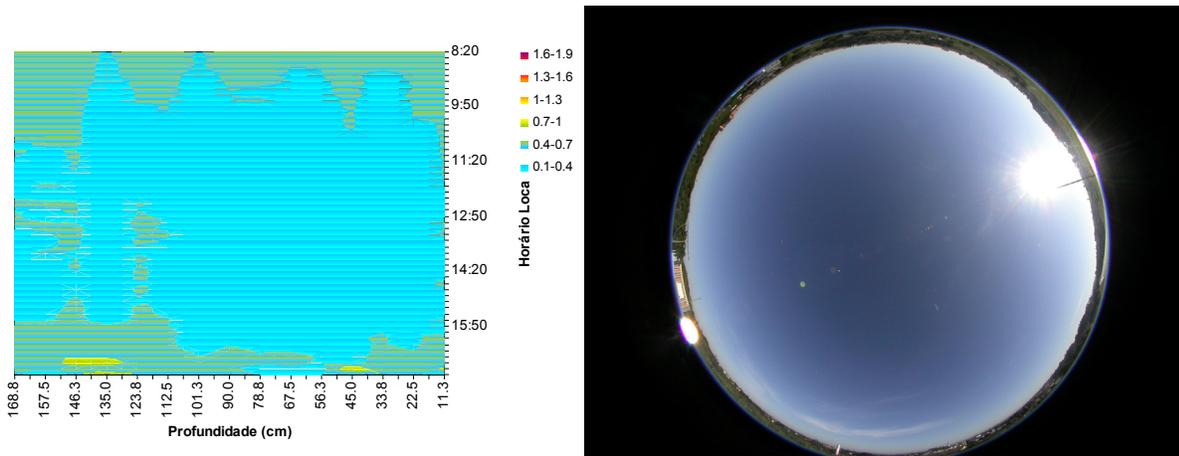


Figura 5.43 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

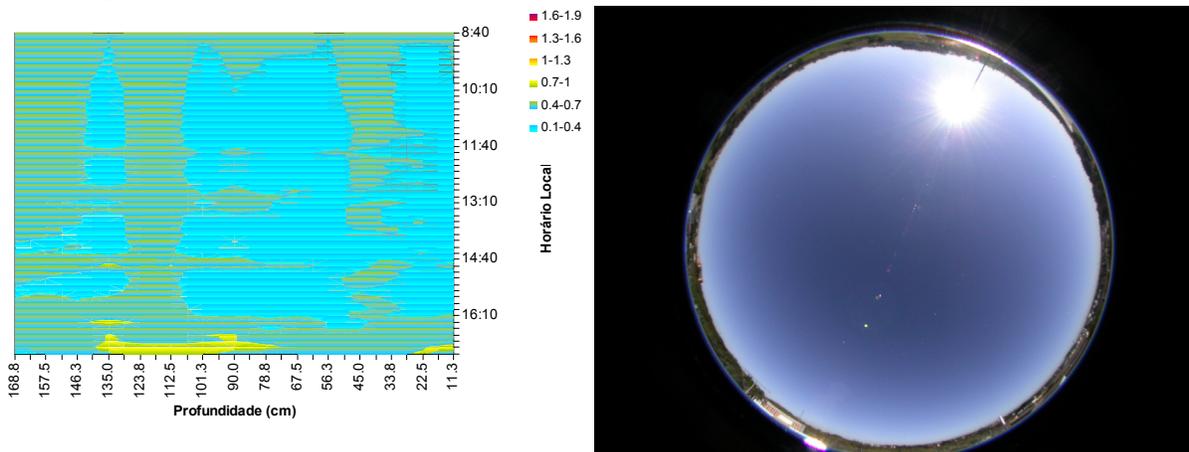


Figura 5.44 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho.

5.7.1 Fotos Internas



Figura 5.45 – Seqüência das imagens internas para 9:00h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

5.8 RETROFLEX

Dos dispositivos tipo brise, este foi aquele que alcançou as maiores iluminâncias. As iluminâncias registradas em maio a 90cm e 150cm foram 400lux e 200lux, e em junho 500lux e 200lux, respectivamente.

Em relação ao gráficos normalizados seu desempenho é muito semelhante ao RetroLux sendo que tem uma influencia mais significativa, no redirecionamento, para ângulos inferiores a 20°. Da mesma forma que os outros painéis de mesmo tipo (RetroLux e RetroLuxTherm) não apresentou grandes diferenças de desempenho para céu claro e céu encoberto (Figura 5.46 a Figura 5.49). como mostram as manchas azuis e verdes dos gráficos, os níveis de iluminação são inferiores que aqueles obtidos por um modulo com vidro comum.

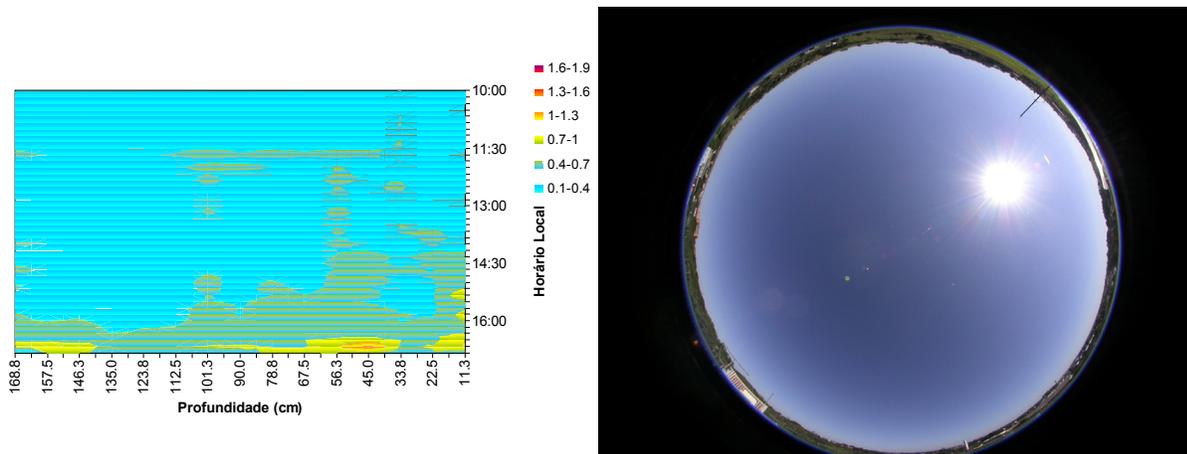


Figura 5.46 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

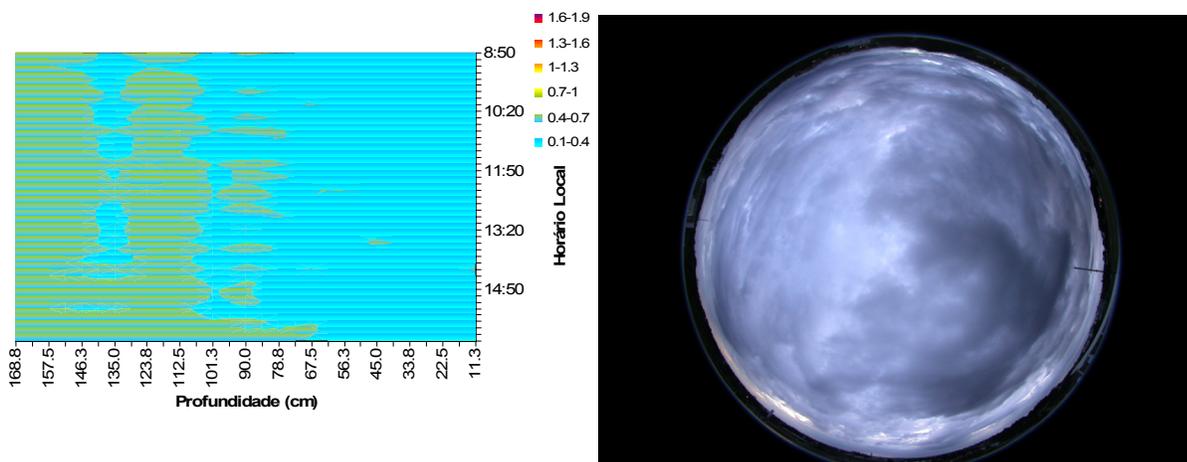


Figura 5.47 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio.

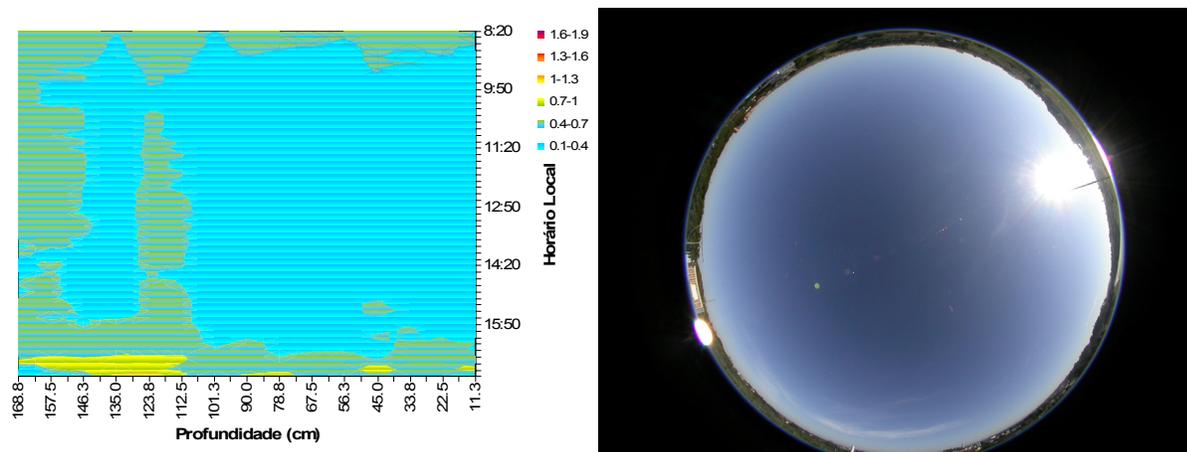


Figura 5.48 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

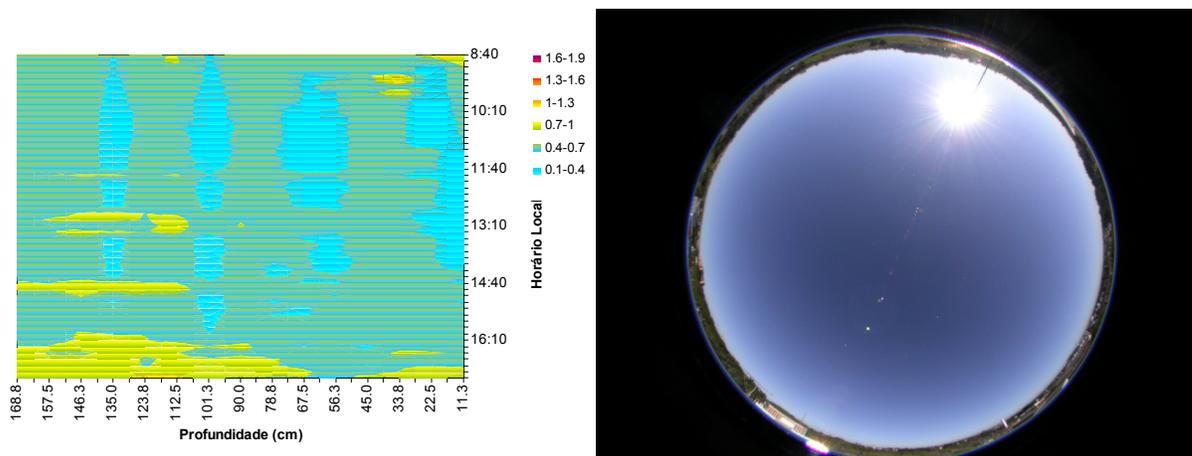


Figura 5.49 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho.

5.8.1 Fotos Internas

Pelas fotografias internas do módulo não se percebe grande diferença entre a iluminação obtidas com os painéis tipo *Koster Louvres*. Nenhum apresenta dispersão de cores, nem se verifica ofuscamento, e embora esta variável tenha que ser medida com precisão, não ha indícios de que o painel possa gerar desconforto neste sentido, pois é possível olhar diretamente para o painel sem ser ofuscado por algum reflexo nas lamelas (Figura 5.50).



Figura 5.50 – Seqüência das imagens internas para 9:20h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

5.9 OKASOLAR

Este dispositivo, juntamente com o COMBISOL e o OKALUX possui dimensões menores (15cmX15cm) e por isto seus gráficos de médias mensais não podem ser comparados aos outros dispositivos, como LCP, Channel, Painéis Prismáticos e Koster Louvres. Para este dispositivo, e seus similares (COMBISOL e o OKALUX) a abertura foi coberta com uma placa de madeira.

Como médias mensais foram registrados, para distancias de 90cm e 150cm da abertura 100lux e 70lux, para o mês de março e 70lux e 50lux para o mês de junho. Este dispositivo redirecionou a luz de forma mais eficiente que seus similares conseguindo aumentar em 30% as iluminâncias no fundo do modulo, por um breve período, em torno do 12:00h.

Em relação a um painel de vidro comum, dispositivo teve melhor redirecionamento para alturas solares muito elevadas, como se verificou no mês de Março, quando a altura solar ao meio dia era de 72° (Figura 5.51). Para alturas mais baixas o painel não se mostrou eficaz, e a iluminância registrada com o vidro, mesmo no fundo do modulo, foi superior áquela registrada com o painel.

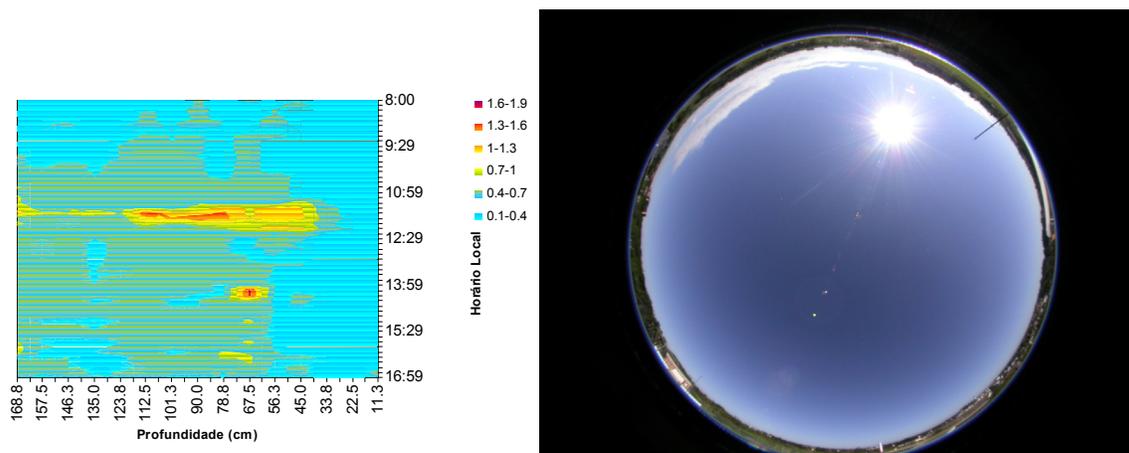


Figura 5.51 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

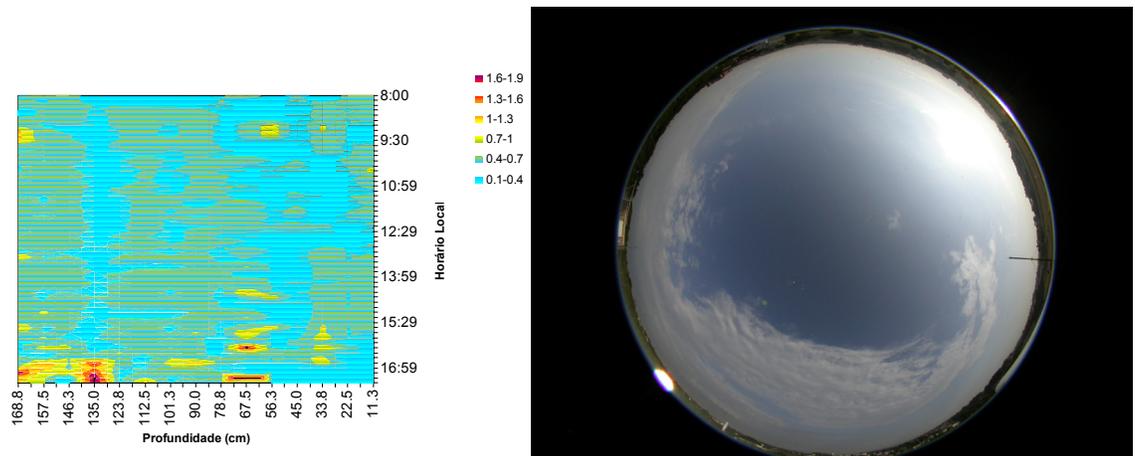


Figura 5.52 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março.

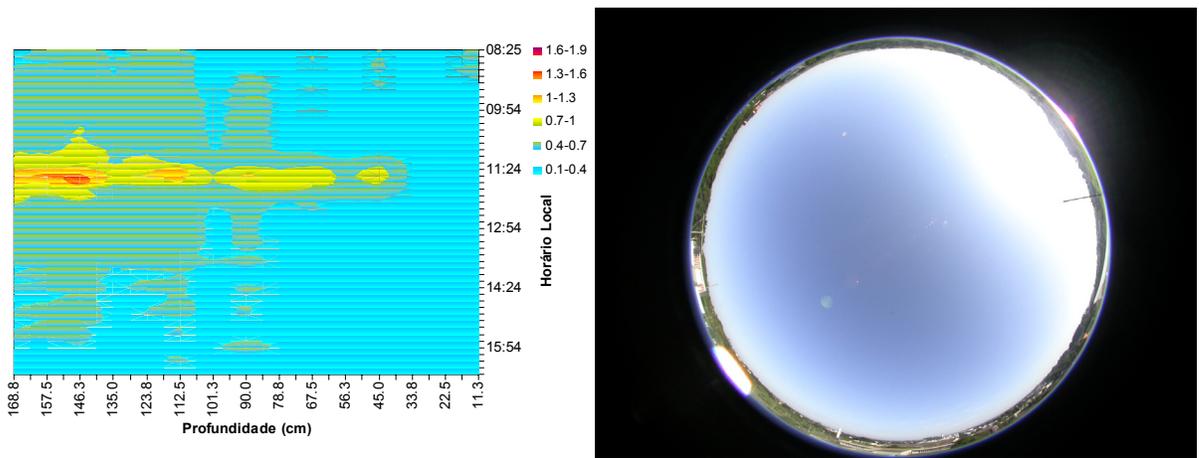


Figura 5.53 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

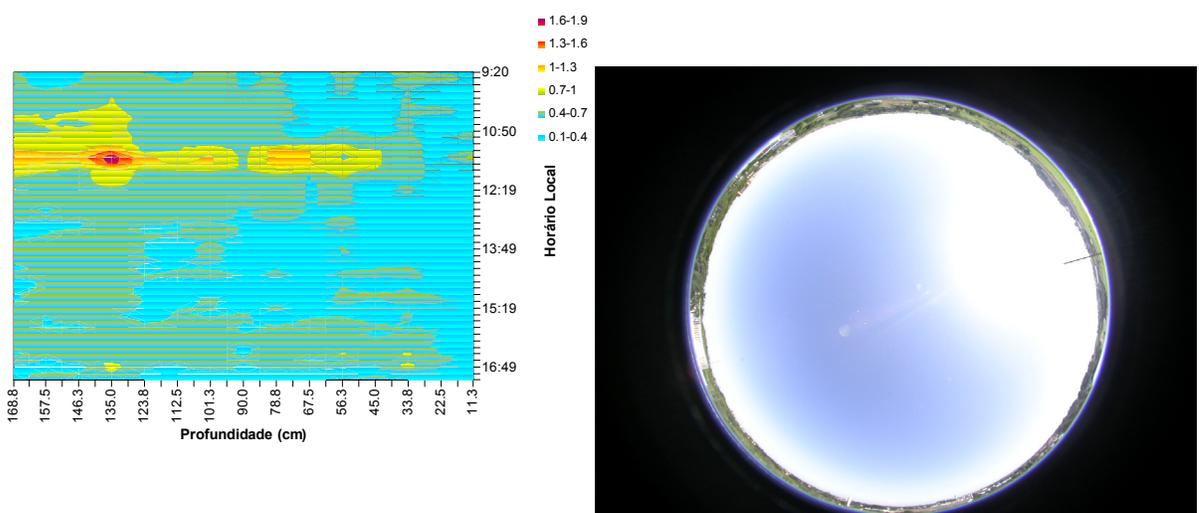


Figura 5.54 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril.

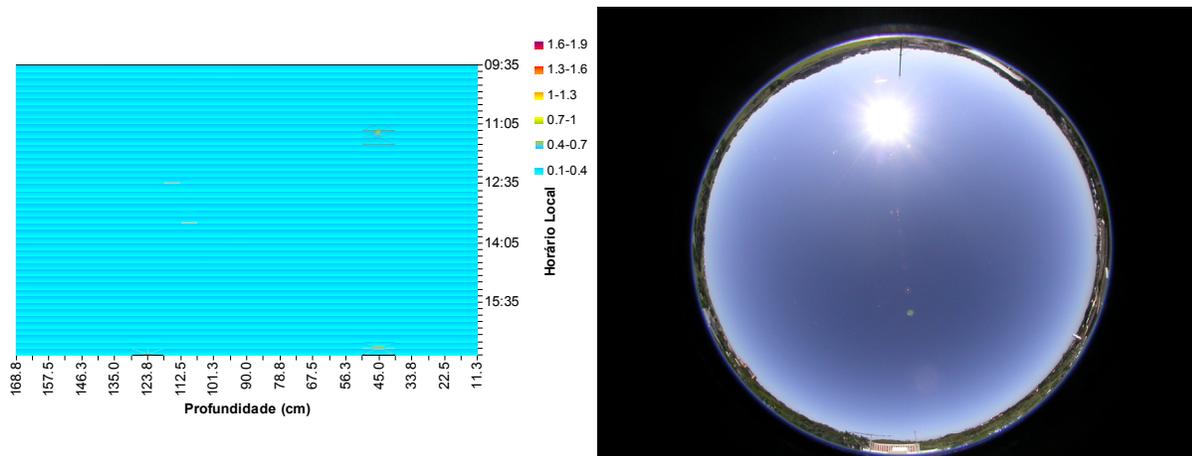


Figura 5.55 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

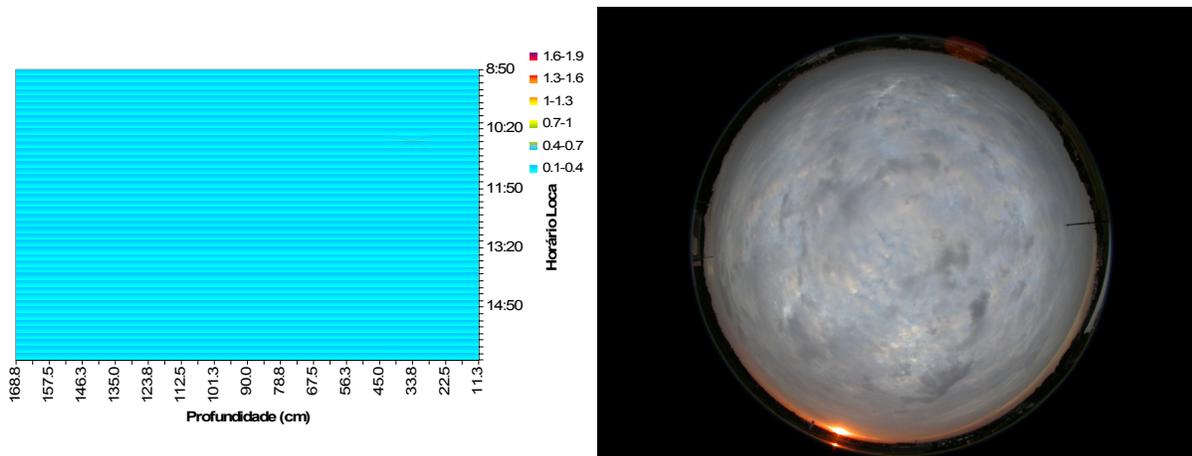


Figura 5.56 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio.

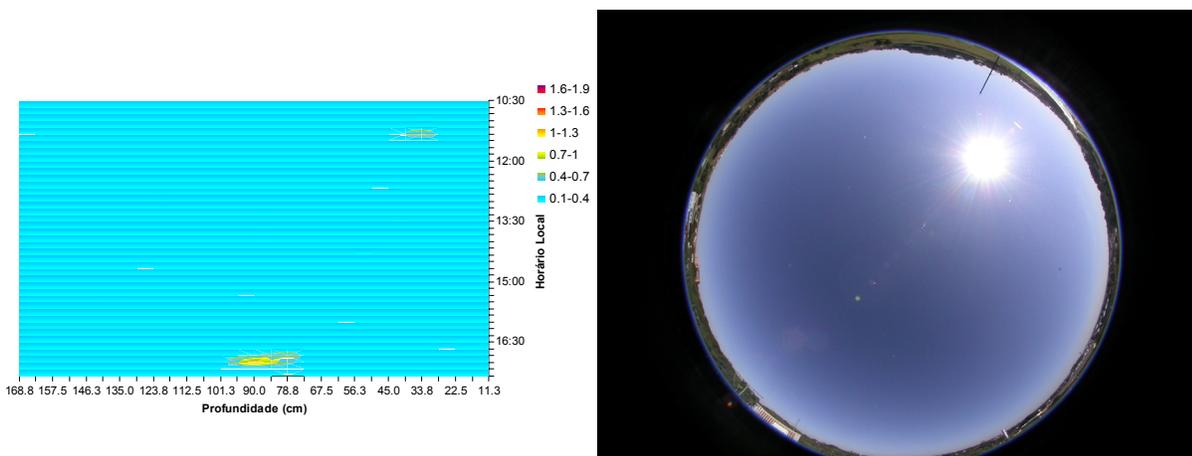


Figura 5.57 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho.

5.9.1 Fotos Internas

O painel Okasolar não pode ser comparado aos dispositivos de maiores tamanhos (LCP, Channel Panel e Koster louveres), a comparação pode ser feita apenas com os dispositivos de mesmas dimensões, TIM, COMBISOL e OKALUX. Devido a diferença de tamanho a abertura foi fechada em seus lados direito e esquerdo, e o mesmo foi realizado com o painel de vidro comum, para que pudesse ser realizada a normalização das iluminâncias (Figura 5.58).

Embora os dados tenham sido normalizados com um painel de vidro de iguais dimensões, os valores normalizados tem um intervalo menor de variação, visto que as iluminâncias absolutas serão menores em função das dimensões serem menores. Também deve ser considerado que cada um dos 15 sensores foram calibrados para valores máximos e mínimos, em função do valor estimado das iluminâncias. Para estes painéis os valores de calibração serão sempre os mínimos, onde ha maior possibilidade de erro.



Figura 5.58 – Seqüência das imagens internas para 9:20h, 10:30h, 12:00h, 13:30h e 15:00h (da esquerda para direita)

5.10 TRANSPARENT ISOLATED MATERIAL

Como este painel foi confeccionado com o objetivo de substituir grandes áreas de parede ou teto, já era esperado que as iluminâncias obtidas dentro dos protótipos seriam baixas. De fato nota-se, pelas áreas verdes e azuis que, independentemente da

condição de céu as iluminâncias obtidas são bem inferiores a aquelas obtidas com o uso de um vidro comum (Figura 5.53 a Figura 5.62).

Além das dimensões do painel, da mesma forma que acontece com os outros painéis de dimensões menores, a variação das iluminâncias nas proximidades das aberturas e no fundo do modulo variam numa faixa menor do que aqueles painéis com maiores dimensões, o que torna o resultado menos confiável. No entanto, pelo fato de que foram realizadas várias medições, pelo menos três por semana, para cada painel, ao longo do período de medição, foi possível comprovar que os dados estão de acordo e possuem um comportamento semelhante para os vários dias, independentemente das condições de nebulosidade. Para uma avaliação com maior precisão seria necessário uma fotocélula mais sensível, capaz de identificar com precisão mesmo as menores variações.

As fotografias do interior dos módulos, com este painel, ficaram muito escuras, comparativamente com o OKASOLAR (Figura 5.58) o ambiente parece mais sombrio. O estudo deste dispositivo poderia ser repetido, retirando-se a capa de lã, normalmente colocada para favorecer o isolamento térmico. Desta forma poderia ser avaliada a capacidade de redirecionamento dos finos capilares de Polimetil Metacrilato (PMMA) do TIM.

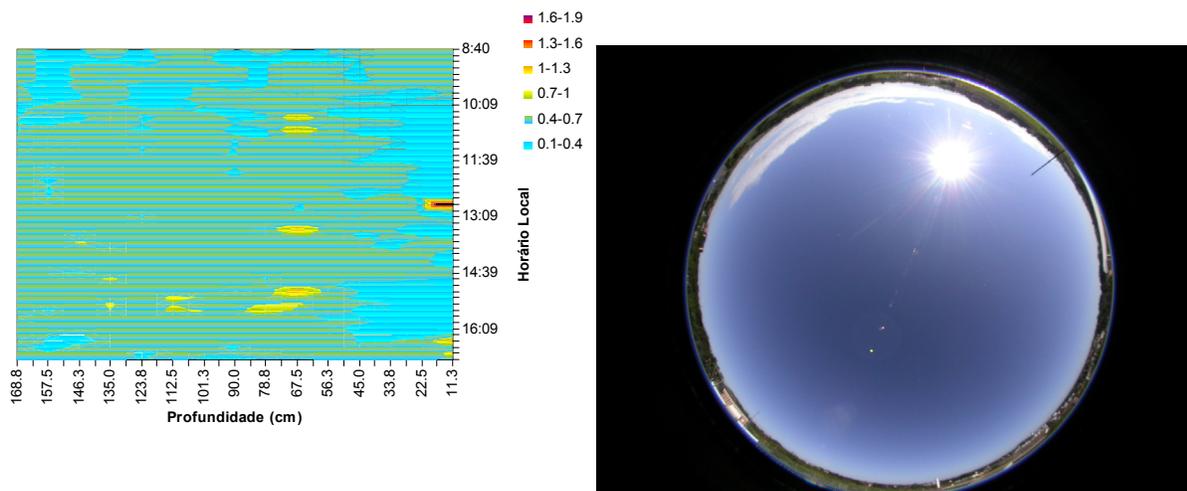


Figura 5.59 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

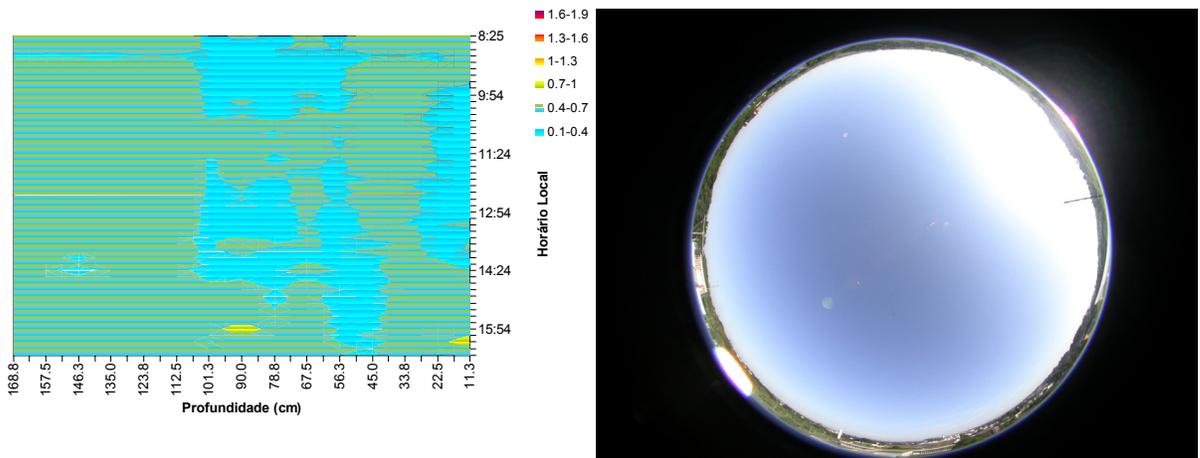


Figura 5.60 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

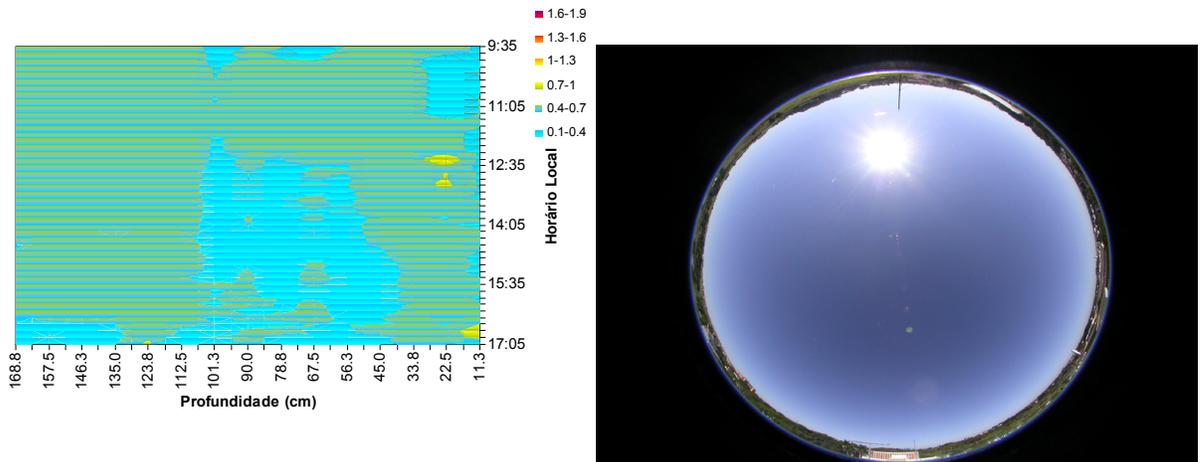


Figura 5.61 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

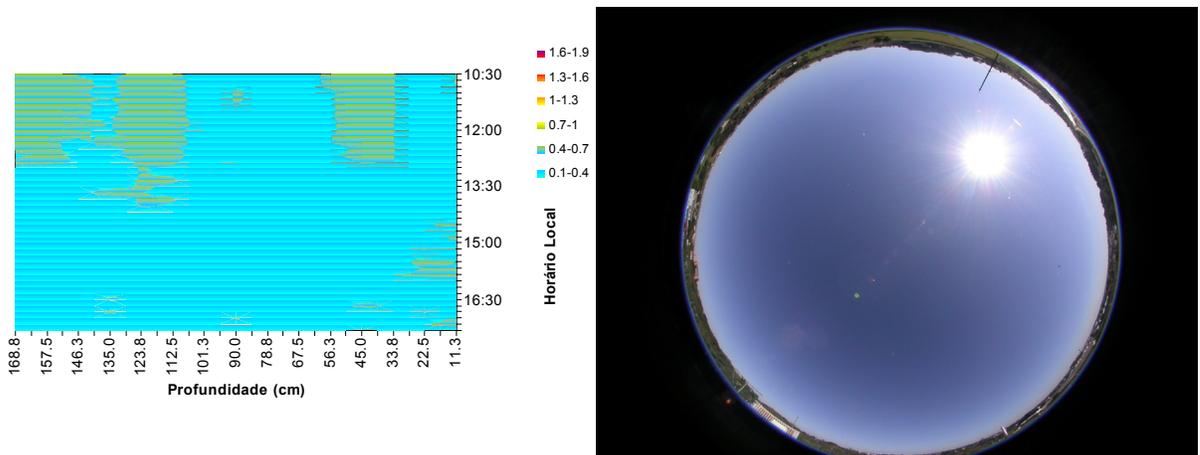


Figura 5.62 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

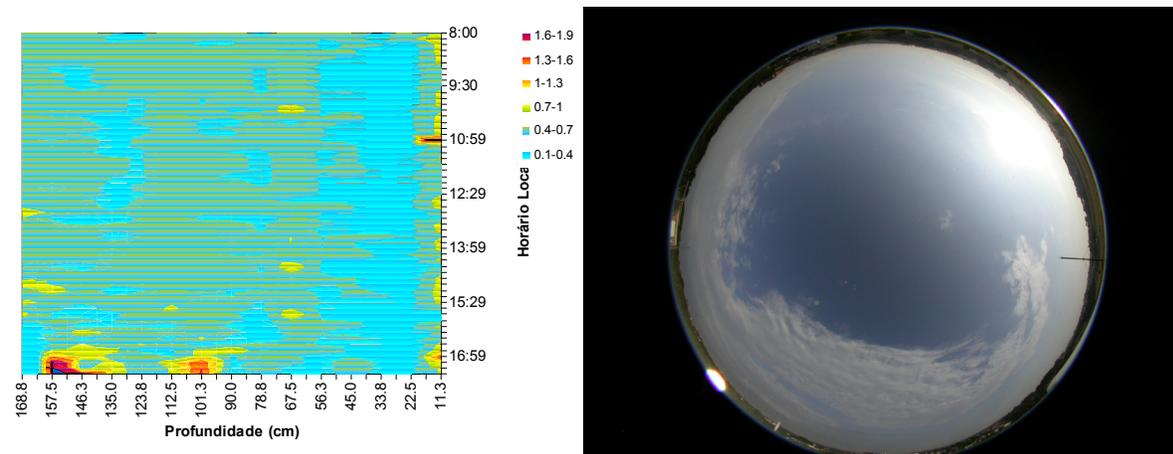


Figura 5.63 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março.

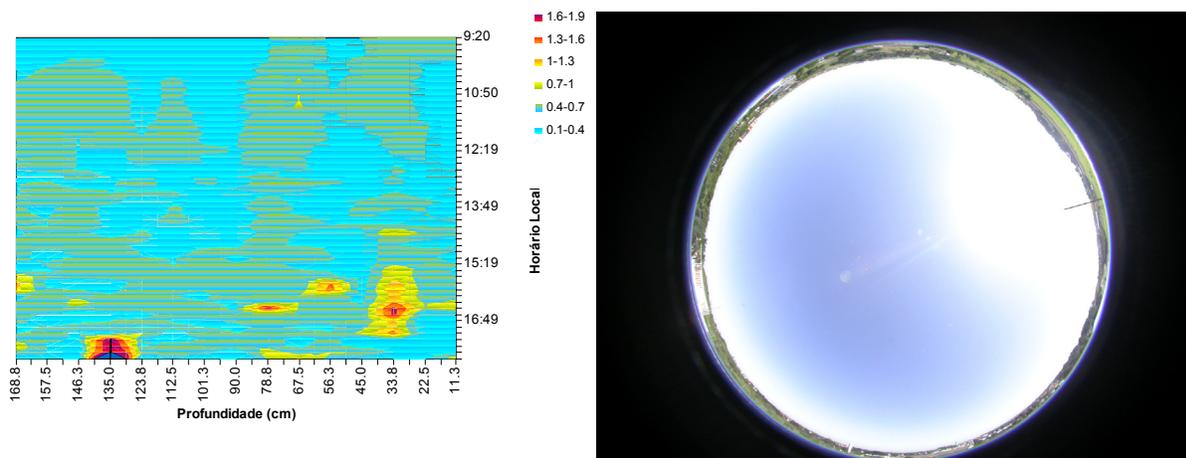


Figura 5.64 - Iluminâncias normalizados para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril.

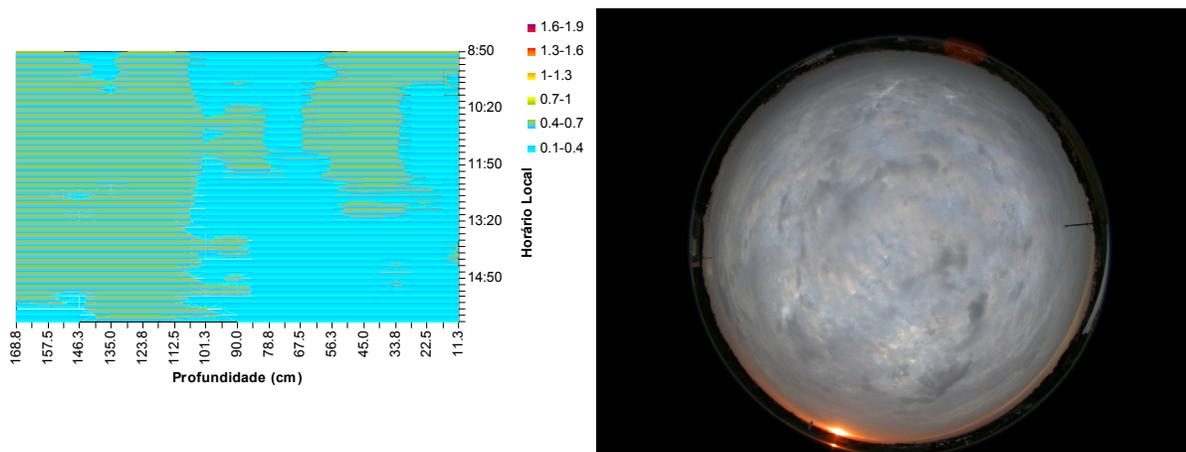


Figura 5.65 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em maio.

5.11 Micro Sun Shielding Louver

Diferente dos outros sistemas o painel Micro Sun Shielding Louvre (MSSL) e o Combisol, (que será visto na próxima seção), são painéis em forma de grade, com suas superfícies cobertas por uma camada de alumínio reflexivo. O painel MSSL assemelha-se a uma grade com lamelas horizontais e verticais que juntas possuem o formato de uma grade quadriculada.

Este sistema mostrou-se eficiente para redirecionamento da luz direta, e a partir de alturas solares de 20° o sistema já consegue aumentar as iluminâncias no interior do módulo, em direção ao fundo, de 25 a 50%. Isto pode ser deduzido pelas áreas roxas e alaranjadas da Figura 5.66 onde de 11:00hs as 12:30hs, a altura solar passa de 60° a 72° , indicando que no fundo do módulo as iluminâncias dobraram. Na Figura 5.67, as áreas amarelas indicam que para alturas solares de 30° a 60° o sistema aumenta a iluminância em até 50%, em relação a um painel de vidro., Figura 5.68. Em junho, com alturas solares mais baixas o funcionamento do painel já sofre alguma redução Figura 5.69 e os valores das iluminâncias aumentam no máximo 50%.

Para maiores alturas solares o sistema consegue redirecionar a luz de modo que a radiação direta não atinja o primeiro sensor situado nas proximidades da abertura, o mesmo não se verifica para alturas solares menores que pode ser percebido pelas áreas azuis claras da Figura 5.66, e Figura 5.67, em contraposição com as áreas amarelas, próxima da abertura da Figura 5.68).

Para céu encoberto este dispositivo mostrou ser ineficiente, além de reduzir a vista para o exterior, em função de sua geometria não contribuiu com o redirecionamento da luz natural, tornando o ambiente até 5 vezes mais escuro do que se utilizado um painel de vidro comum, (Figura 5.70) independentemente da altura solar de cada mês (Figura 5.71).

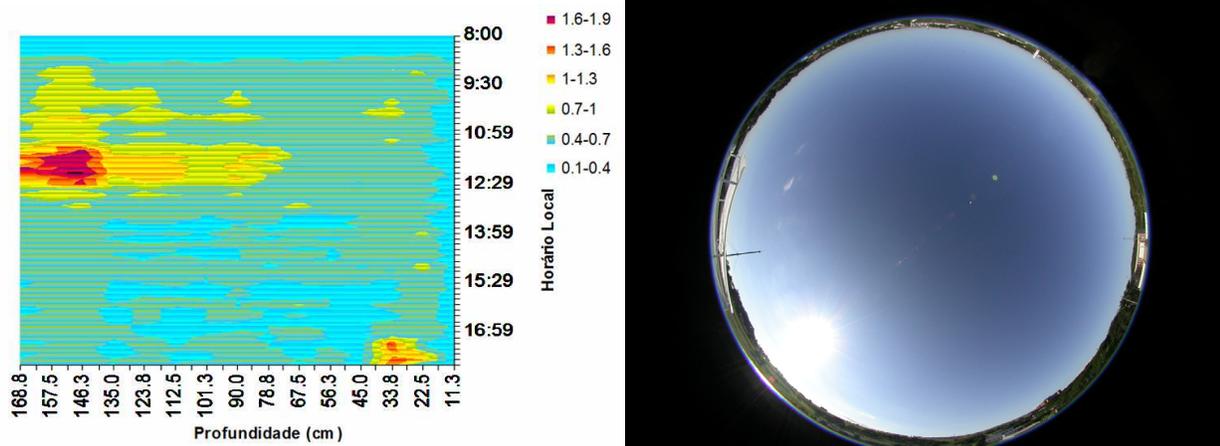


Figura 5.66 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

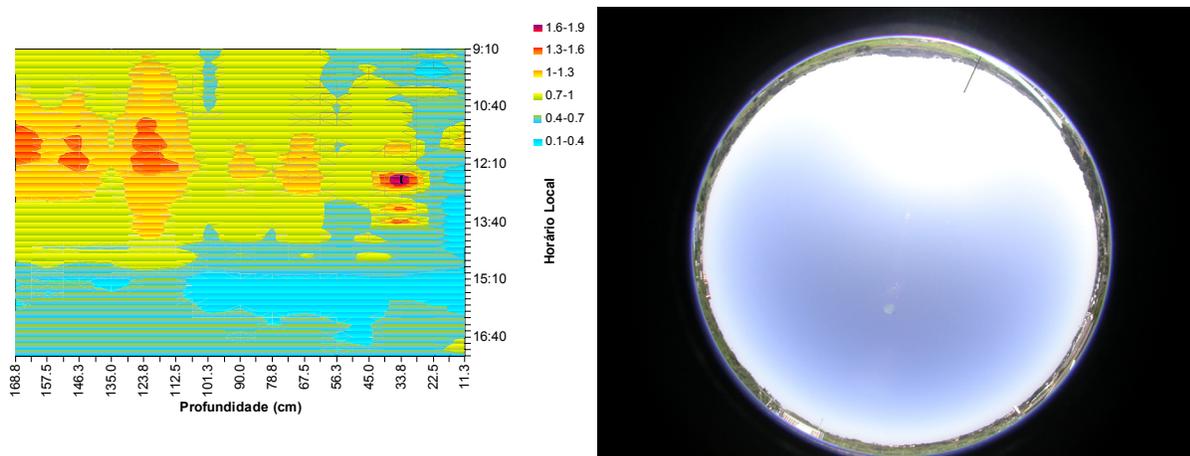


Figura 5.67 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em abril.

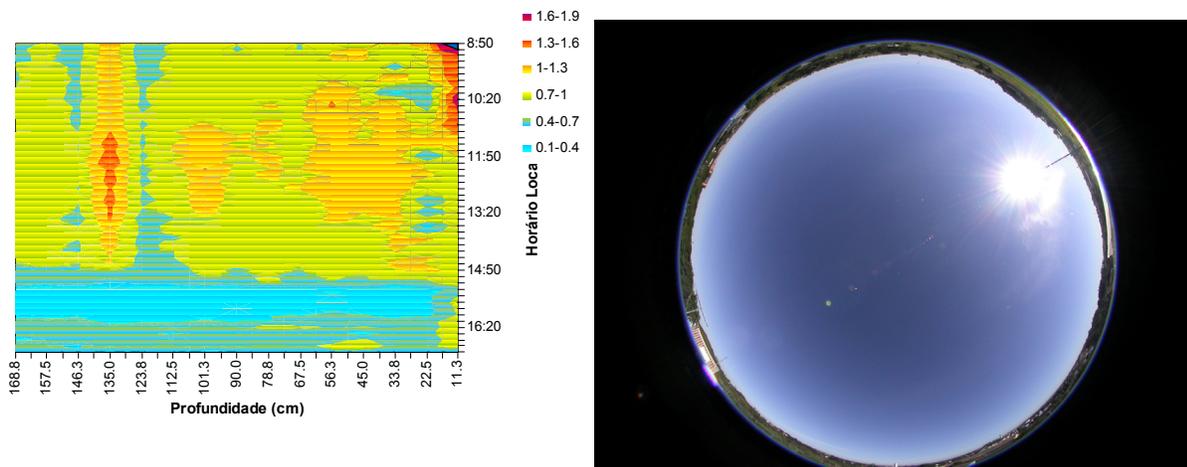


Figura 5.68 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

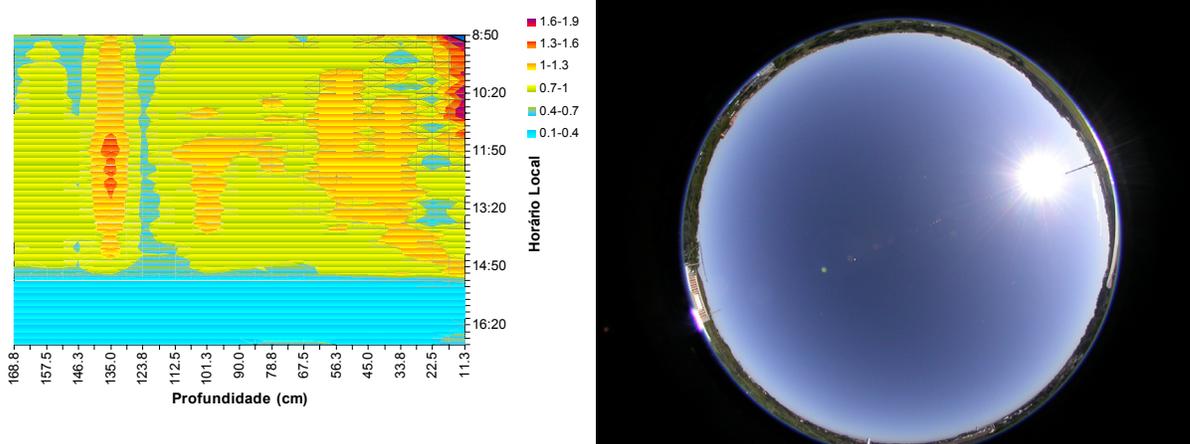


Figura 5.69 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em junho.

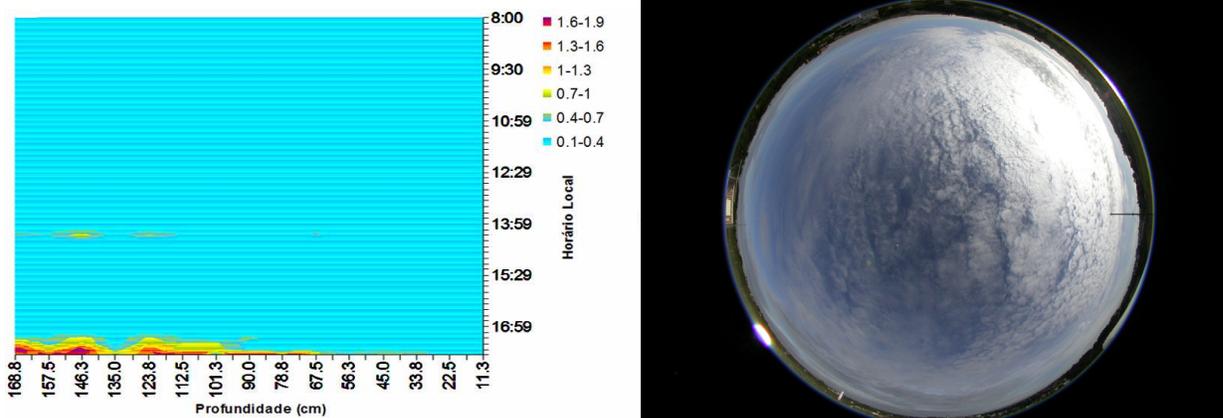


Figura 5.70 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março.

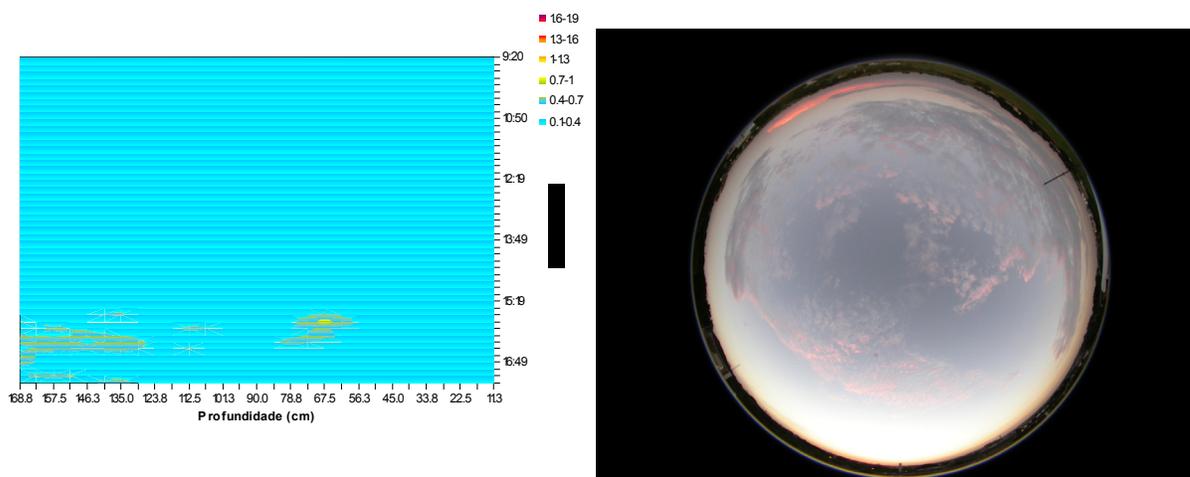


Figura 5.71 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em abril.

5.12 Combisol

A partir das 14:00 hs, para céu claro, o dispositivo se mostrou ineficiente independentemente do mês em que ele foi medido. Isto poderia ter sido causado pelo formato o dispositivo, semelhante a uma colméia, por onde a luz é defletida várias vezes. Para que o painel seja eficiente, é necessário que a luz entre no duto, caso isto não ocorra o painel não redireciona a luz, diminuindo de conseqüência as iluminâncias internas. Note-se que para alturas solares maiores, no mês de Março, (Figura 5.72) o painel aumenta as iluminâncias em ate 25% em relação ao vidro, mas a medida que altura solar diminui o painel vai perdendo sua capacidade de redirecionamento (Figura 5.72, Figura 5.73, Figura 5.74).

Para dias encobertos o painel também não se mostrou eficaz, da mesma forma que o MSSL, sendo que as áreas azuis mostram iluminâncias de até 25% menores que aquelas obtidas com um vidro comum (Figura 5.75).

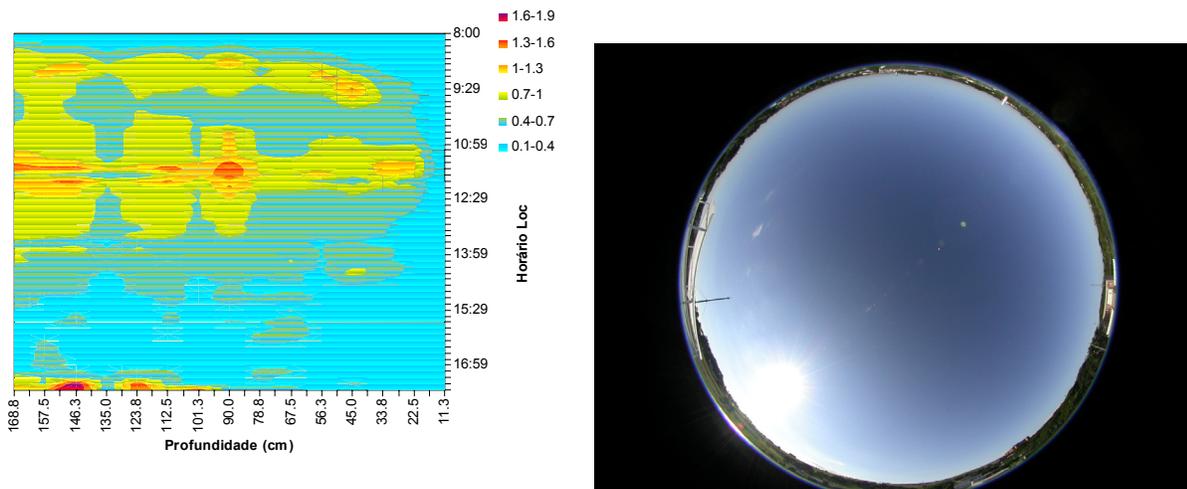


Figura 5.72 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em março.

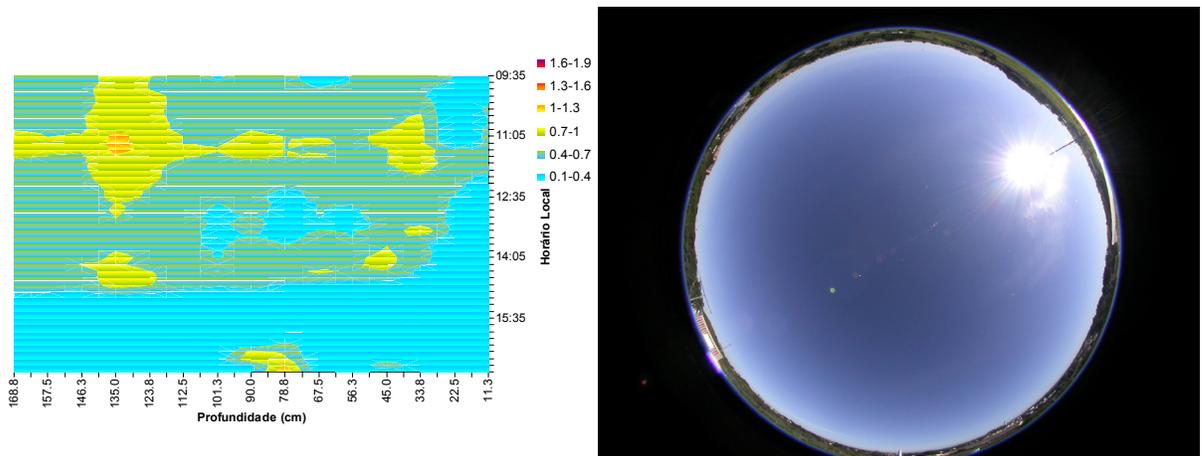


Figura 5.73 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em maio.

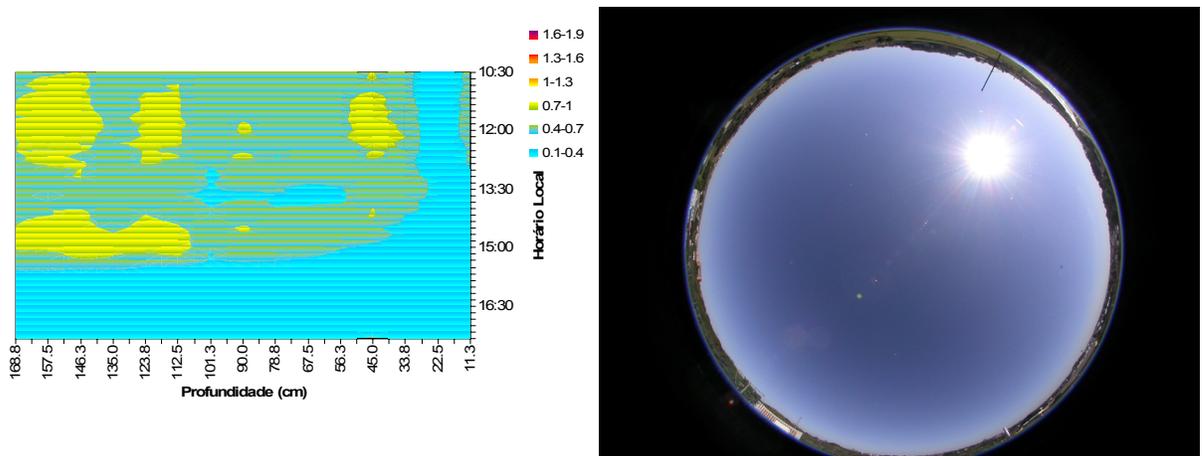


Figura 5.74 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu claro em julho.

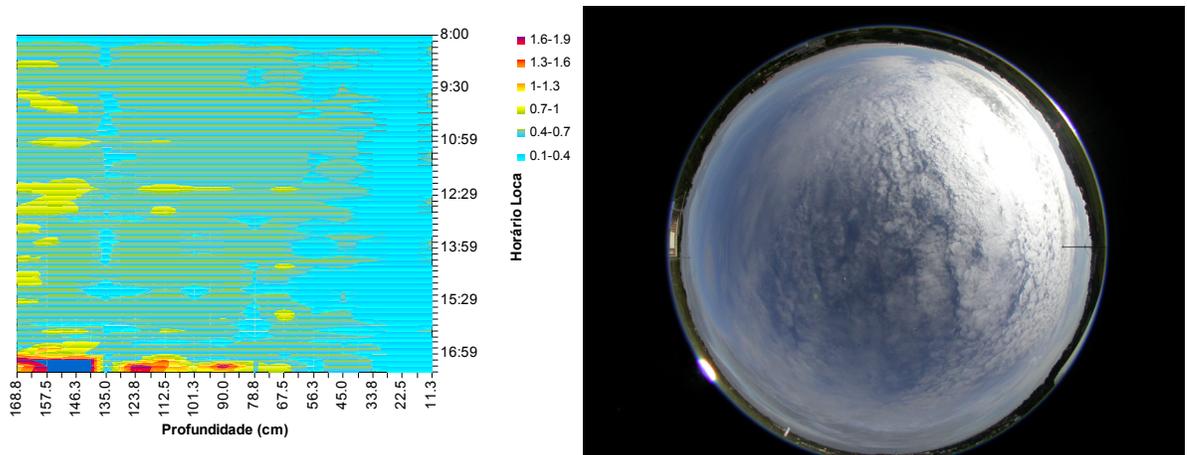


Figura 5.75 - Iluminâncias normalizadas para um dia típico de céu parcialmente encoberto em março.

Nesta seção foi abordado o comportamento de cada painel em relação a uma placa de vidro comum. Normalizando-se as iluminâncias obtidas num dia típico, em outros termos, dividindo-se a iluminância registrada com o painel pela iluminância registrada com o uso de um vidro comum, de mesmo tamanho que os painéis testados. Sendo que, o dia típico, representa o comportamento mais comum, e que se repetiu várias vezes durante cada mês de medição. Na próxima seção será realizada uma avaliação comparativa dos dispositivos, mediante a plotagem dos das iluminâncias absolutas registradas com cada painel

5.13 Médias Mensais

Com a finalidade de avaliar comparativamente os dispositivos e estabelecer a eficiência de cada um, as iluminâncias médias absolutas foram graficadas a seguir. Em função da diferença de dimensões entre alguns dispositivos foi necessário separar os painéis em dois grupos distintos, aqueles de dimensões maiores, equivalente à dimensão da abertura do protótipo (15cm de altura por 50 de largura), que incluem LCP0°, 9°, 12°, Channel Panel, RetroLux, RetroLuxTherm, Retroflex, Micro Sun Shielding Louvres; e aqueles de dimensões menores (15cm de altura por 15 cm de largura) que incluem os dispositivos TIM, Combisol, e Okasolar. Os gráficos foram realizados em função das condições de nebulosidade.

5.13.1 Painéis do Grupo 1

Na **Figura 5.76** aparecem as médias das iluminâncias obtidas durante o período de medição, para o horário de 12:00hs, para os meses de Março a Julho, para

todos os painéis do grupo 1, para céu claro e em seguida para céu parcialmente coberto. A curva do vidro (em verde) mostra claramente o decaimento das iluminâncias com o quadrado da distância da abertura, apresentando altíssimos valores nas proximidades da abertura, acima de 70.000lux, principalmente no primeiro sensor, onde incide a luz direta. Este valor não comparece no gráfico porque optou-se por formatar o eixo y de forma que o desempenho de todos os painéis pudesse ser notado com clareza. (Figura 5.76)

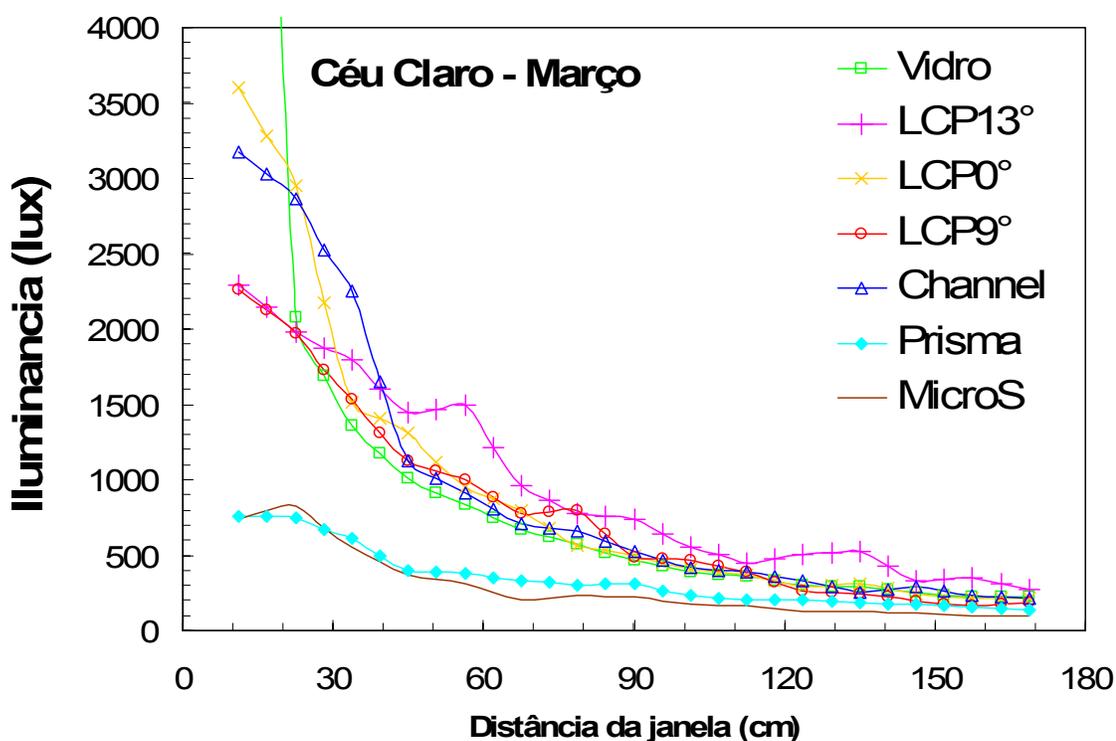


Figura 5.76 – Médias Mensais para Céu Claro no mês de Março, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Chanel Panel

Comparando o desempenho dos painéis tipo LCP, nota-se que o LCP 0° (amarelo) tem um desempenho semelhante ao do vidro, para elevadas alturas solares, (Março), evitando no entanto a entrada da radiação solar direta, que com o vidro incidia no primeiro sensor (situado a 12,5 cm da abertura, sendo que o espaçamento é igual para os 15 sensores, e o externo está a 12,5 cm do lado de fora do modelo). Para este mês o LCP 9° (vermelho) cria uma distribuição mais homogênea, e alcança

praticamente os mesmos valores de iluminância no fundo do módulo que o Channel Panel (azul), embora este consiga um aumento de 100lux no último sensor. O LCP 13°(rosa) tem o melhor desempenho, para esta altura solar, conseguindo uma curva mais suave e portanto uma iluminação mais homogênea, mas com iluminâncias maiores ao longo de todo o módulo (**Figura 5.76**).

O Prisma e o MSSL obtiveram valores bem inferiores, cerca de 800 lux no primeiro sensor o que indica que ambos conseguiram redirecionar a luz de forma que não houvesse uma incidência da radiação direta, no piso, evitando portanto uma mancha solar. As iluminâncias registradas no fundo também foram inferiores aquelas obtidas com o uso do LCP (**Figura 5.76**).

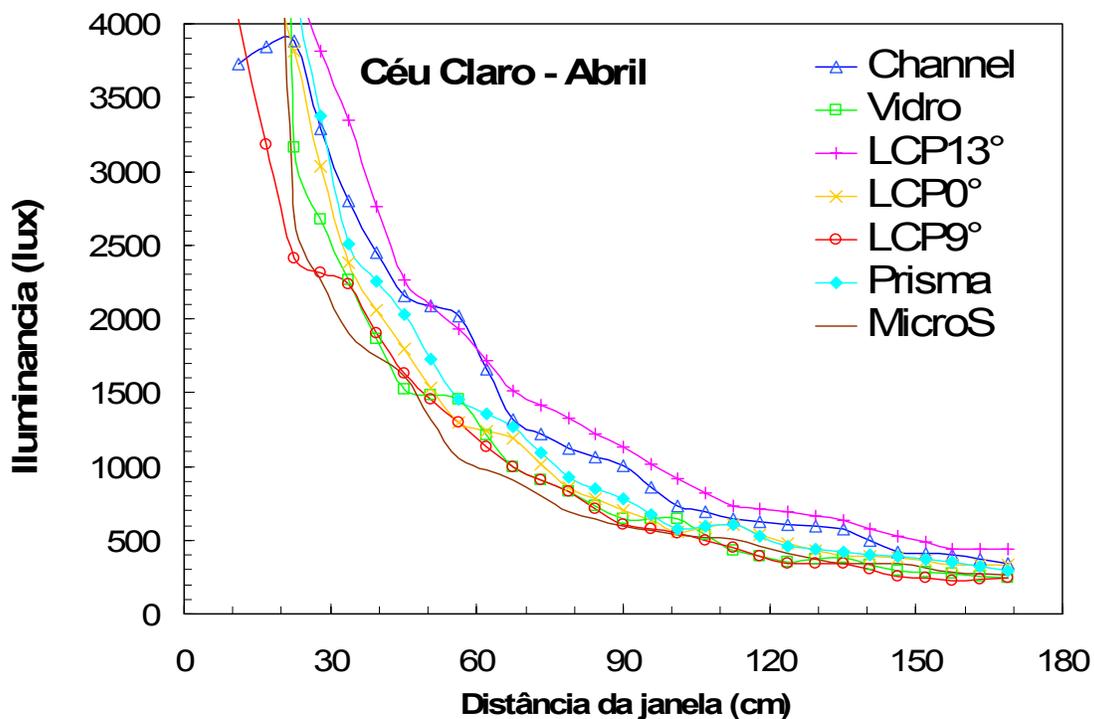


Figura 5.77 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Channel Panel

A medida que a altura solar diminui, (Abril, Figura 5.77) as iluminâncias registradas aumentam. O Channel Panel torna-se o único painel no qual não incide a radiação solar direta no piso, por este motivo a iluminância registrada pelo primeiro

sensor se mantém na faixa de 3800lux, enquanto os outros dispositivos ultrapassam os 50.000lux. De todos, o LCP 13° é aquele que mostra maiores iluminâncias no fundo chegando a 800 lux, em média ,quase o dobro do valor atingido pelo LCP9° no mesmo período.

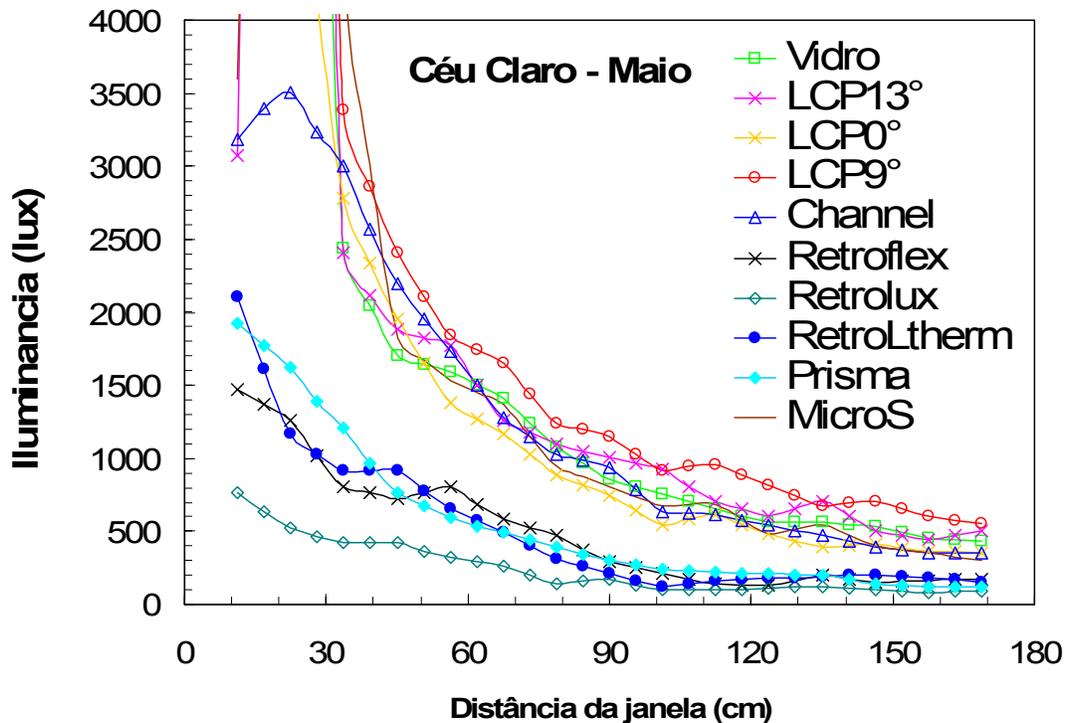


Figura 5.78 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Maio, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Channel Panel

Para o mês de Maio as iluminâncias continuam aumentando, pela Figura 5.78 é possível perceber que o desempenho dos painéis Koster louvres (Retroflex, Retrolux e retroLuxTherm) se aproxima do desempenho do painel prismático, sendo que o dispositivo RetroLuxTherm e Retroflex atingem valores de cerca de 200lux ao fundo do módulo. O aumento das iluminâncias é de forma geral é justificado pela altura solar que vai caindo, desta forma a luz tem um maior alcance dentro do módulo.

Para esta época o dispositivo que conseguiu alcançar maiores iluminâncias foi o LCP 9°, desta forma é possível notar que ha uma inversão na eficiência entre o LCP 13° (mais eficiente em março) e o LCP 9°, (mais eficiente em abril). Note-se que o

Channel Panel manteve o seu desempenho, as iluminâncias nas proximidades da abertura se mantiveram em torno dos 3000lux, enquanto no fundo passaram de 500lux, em Março, para 1000lux, em Abril.

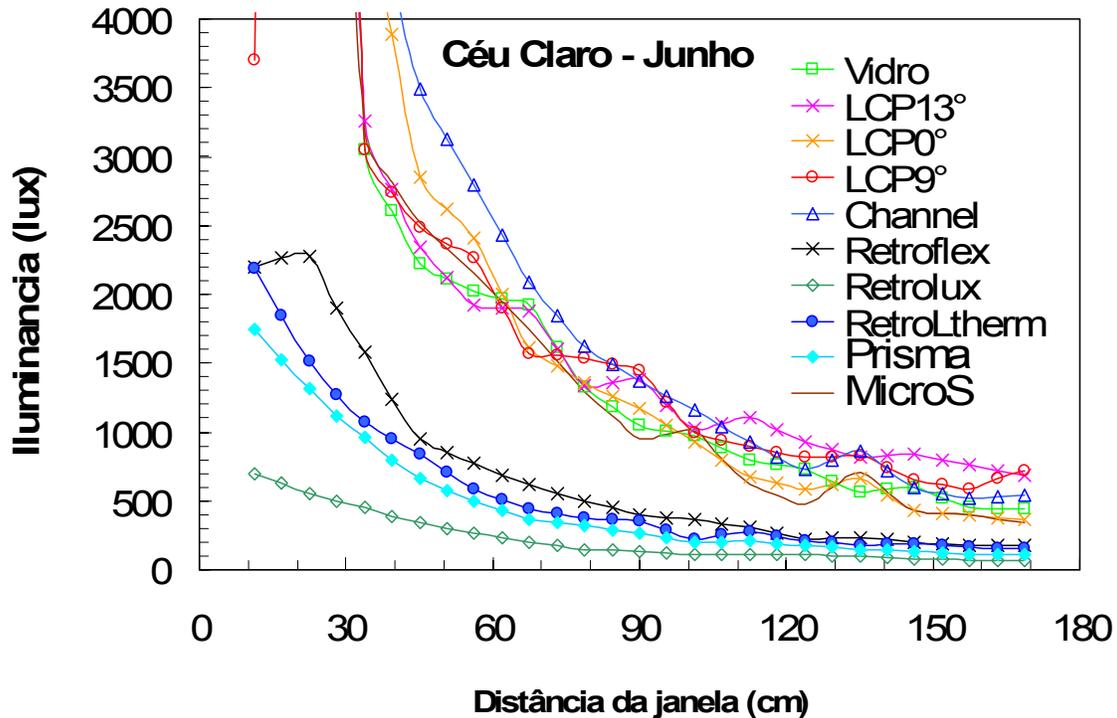


Figura 5.79 Médias Mensais para Céu Claro no mês de Junho, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9°, 13° e Channel Panel, RetroLux, Retroflex e RetroLuxTherm

Em Junho, quando o sol alcança a altura solar máxima, nota-se claramente a presença de duas classes de painéis, uma composta pelos painéis RetroLux, Prisma, RetroLuxTherm, e Retroflex, que deixam uma iluminação mais homogênea, mas obtendo iluminâncias menores, e uma outra classe composta pelos outros painéis.

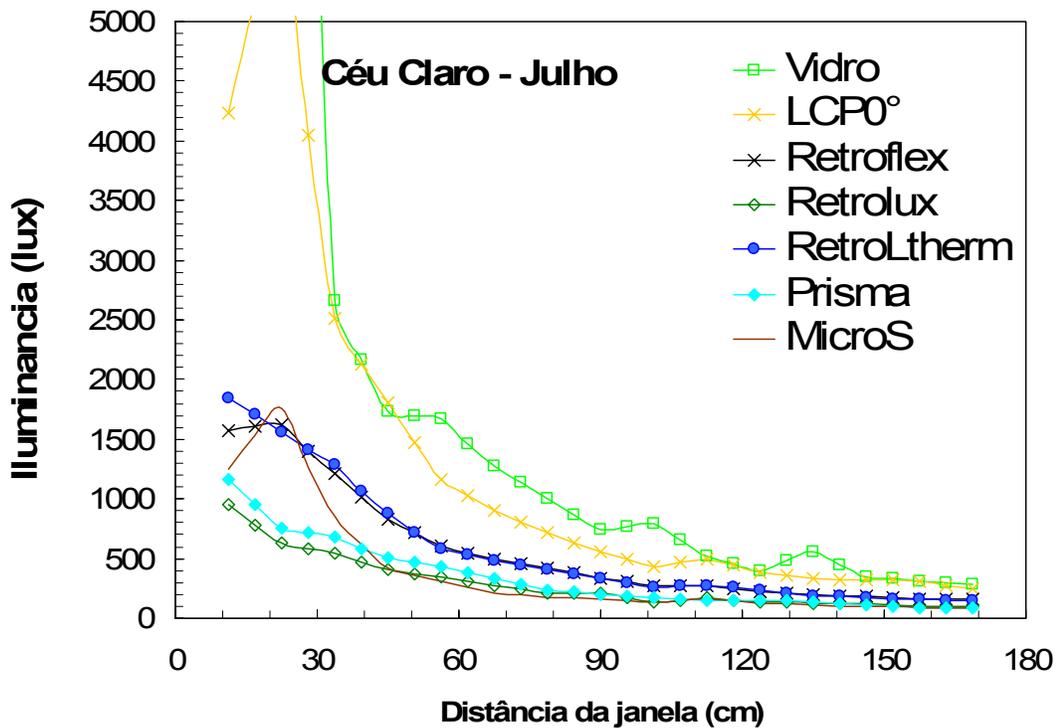


Figura 5.80 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Julho, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, RetroLux, Retroflex e RetroLuxTherm

Como esperado, os valores obtidos em julho são muito semelhantes a aqueles obtidos em junho, isto devido altura solar ser muito semelhante (44,9° em Junho e 44,1° em Julho para 12:00hs). O RetroluxTherm e o Retroflex obtiveram maiores iluminâncias tanto nas proximidades da abertura quanto no fundo do módulo, O MSSL obteve um aumento na iluminância na área próxima da abertura (1770 lux), mas não conseguiu manter o nível de iluminação, caindo bruscamente, e chegando a atingir iluminâncias semelhantes aquelas medidas com o Retrolux (cerca de 100lux) no fundo do modulo (Figura 5.80).

Comparando o LCP 0° com o LCP 9° percebe-se que o primeiro não tem a mesma capacidade de redirecionamento que o segundo. Isto fica evidente nas médias mensais onde, para o mês de março a uma distancia de 150 cm da abertura foi registrada uma media de 250lux e a 90cm da abertura, uma iluminância de 800lux. Já em junho, para as mesmas distâncias foram registrados valores de 800 e 1400lux respectivamente.

As médias mensais mostraram que o Channel Panel conseguiu um bom desempenho tanto para menores alturas solares, como para maiores alturas solares. As iluminâncias registradas em março à 90cm e 150cm foram respectivamente 600lux e 300lux, e em junho 1500lux e 700lux. Pelos gráficos percebe-se que o desempenho do Channel é mais uniforme, ele aumenta as iluminâncias de forma gradativa, em relação aos outros LCP, causando portanto um contraste menor dentro do ambiente.

Para o painel Prismático a média de iluminâncias para distâncias de 90cm e 150cm da abertura foram 250lux e 100lux, para o mês de março e para o mês de junho 500lux e 300lux.

Para o painel Retrolux a média de iluminâncias, para distâncias de 90cm e 150cm da abertura foram 210lux e 180lux, para o mês de maio e para o mês de junho 130lux e 100lux. No entanto esta solução foi aquela que, além de garantir a maior transparência evitou o ofuscamento durante todos os horários do dia. Com estes resultados fica fácil entender o porque dos edifícios que utilizam este tipo de solução serem totalmente compostos de brises de teto ao piso, ao excluir a luz solar direta, as quantidades da componente difusa tem que ser maximizadas e portanto maior a área coberta pelos brises melhor o desempenho do dispositivo.

Para o RetroLuxTherm com as médias mensais foram registrados para distâncias de 90cm e 150 cm da abertura 250lux e 200lux, para o mês de maio e 250lux e 400lux para o mês de junho, note-se que para este período o dispositivo teve um comportamento semelhante em todos os meses.

Dos dispositivos tipo brise, o Retroflex este foi aquele que alcançou as maiores iluminâncias. As iluminâncias registradas em maio a 90cm e 150cm foram 400lux e 200lux, e em junho 500lux e 200lux, respectivamente. Para o MSSL foram registradas como médias mensais, para distâncias de 90cm e 150cm da abertura 400lux e 150lux, para o mês de março e 1300lux e 500lux para o mês de junho.

A mesma avaliação foi realizada para céu encoberto, como será mostrado na próxima seção.

Para céu encoberto não se nota a forte separação de desempenho que ocorre com o céu claro (Figura 5.88). Ainda assim os dispositivos de acrílico (LCPs e Prismas) possuem um melhor desempenho, ainda que o redirecionamento para o fundo do módulo seja praticamente insignificante. Note-se que os valores obtidos com o vidro são quase os mesmos que para todos os outros painéis. O LCP 9° foi o único dispositivo que conseguiu iluminâncias um pouco superiores a aquelas medidas com o vidro (Figura 5.91).

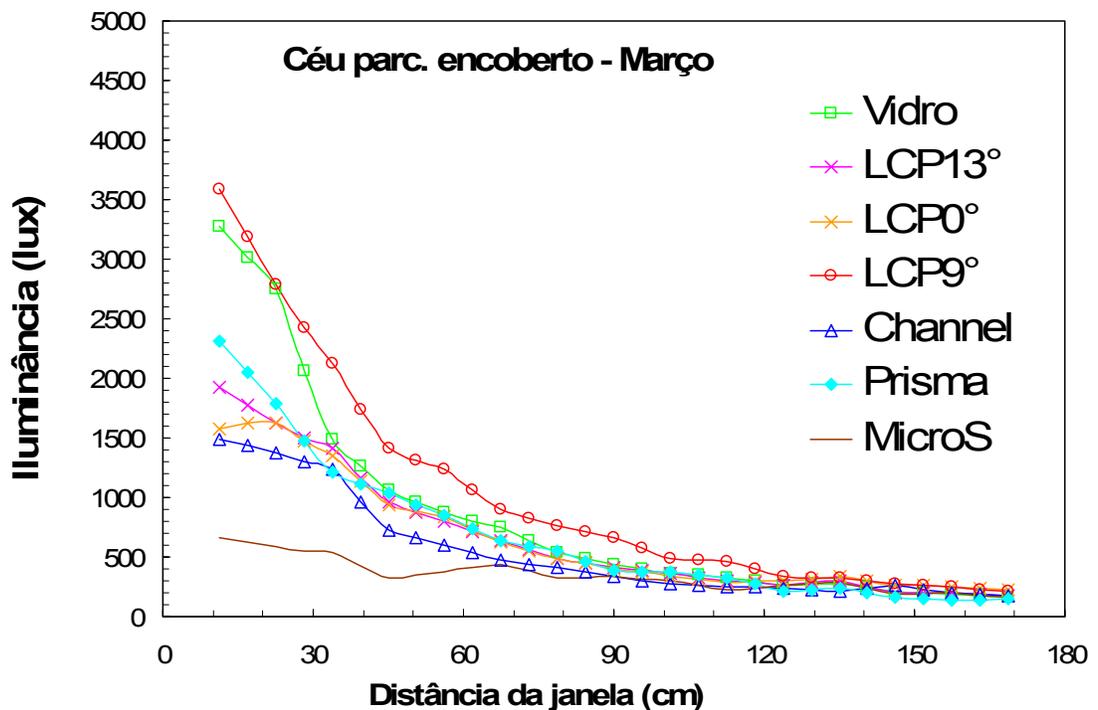


Figura 5.81 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Março, para os painéis de vidro comum, LCP 0° 9°, 13° e Channel Panel

Pelo fato da abobada estar emitindo a luz de forma quase homogênea, para alturas solares elevadas os painéis não apresentaram grandes diferenças quando medidos em Marco e em Abril, nas proximidades da abertura (Figura 5.92). Os dispositivos tipo Koster louveres também não apresentaram um grande desempenho para céu encoberto, mas reduziram bastante as iluminâncias nas proximidades da abertura, se comparados ao vidro (Figura 5.93).

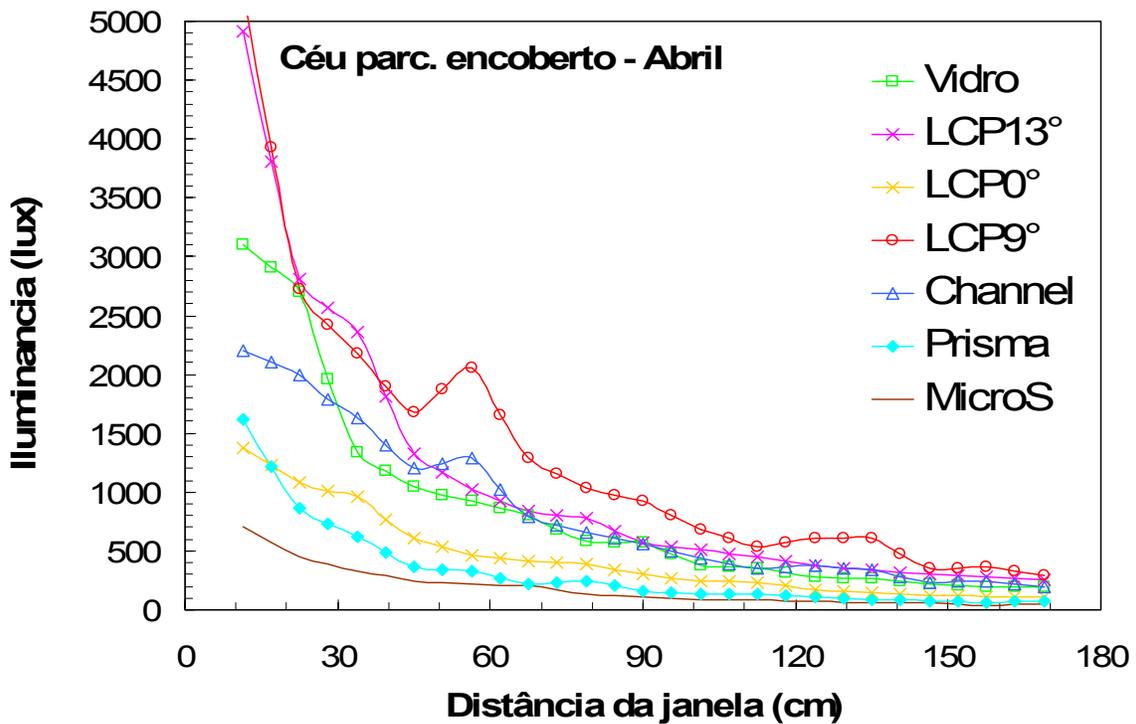


Figura 5.82 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 13° e Channel Panel

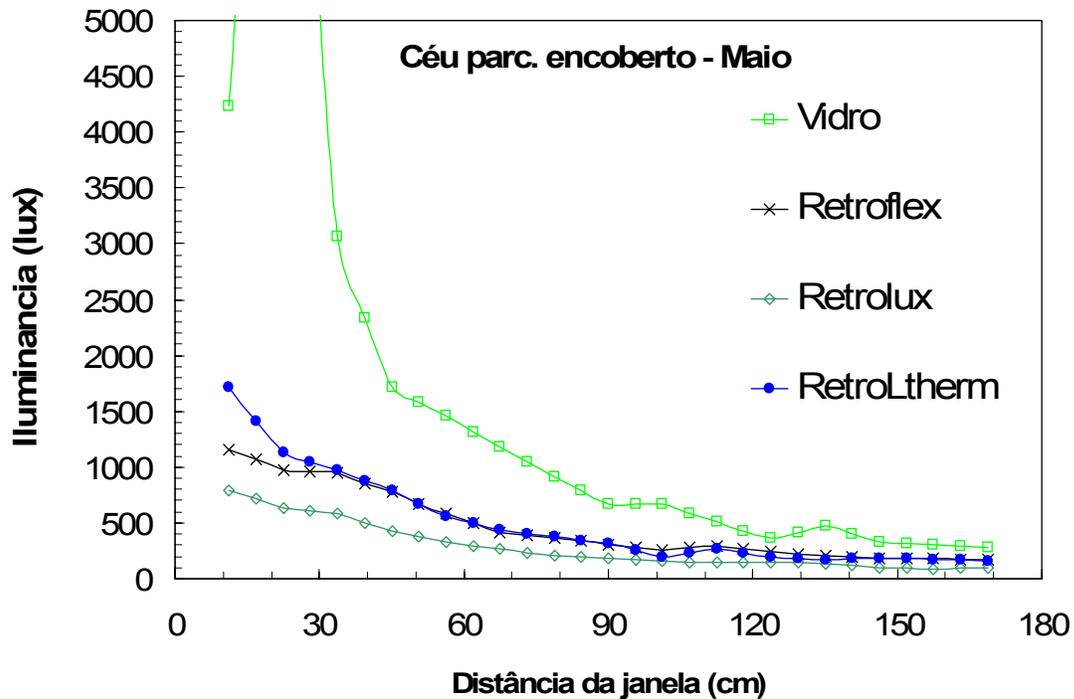


Figura 5.83 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Maio, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, RetroLux, Retroflex e RetroLuxTherm

Em Junho, obtiveram-se valores maiores de iluminâncias, note-se que o LCP 13° mantém um comportamento muito semelhante ao vidro (Figura 5.84) .

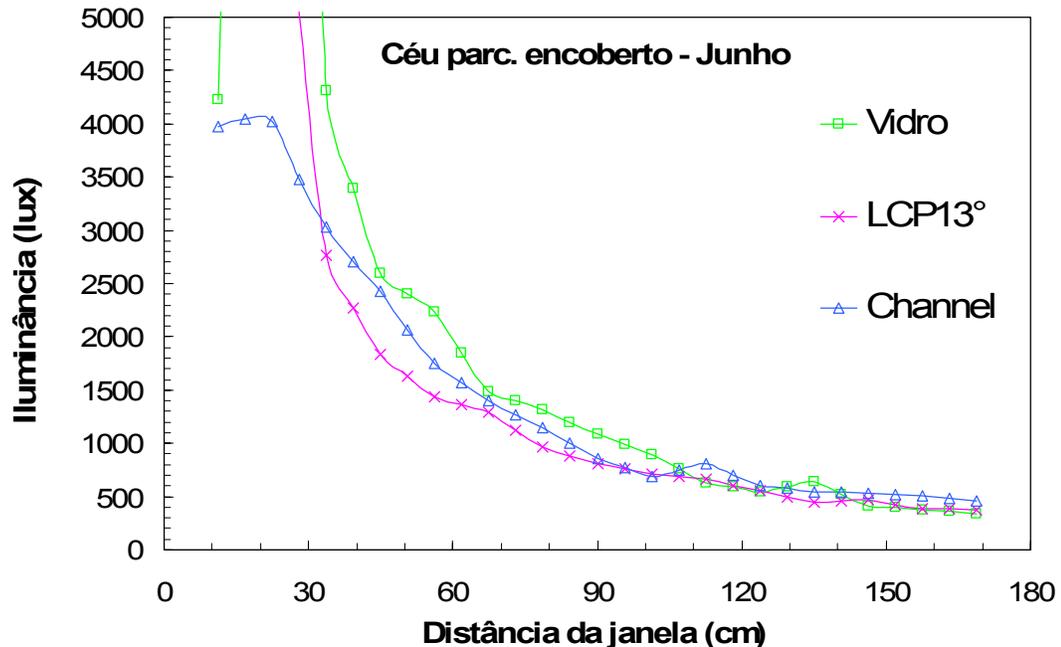


Figura 5.84 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Junho, para os painéis de vidro comum, LCP 0°, 9° e 13°

5.13.2 Painéis do Grupo 2

Pelo fato destes painéis terem dimensões menores, não puderam ser comparados ao primeiro grupo, pelas médias mensais, mas a comparação foi realizada mediante os gráficos das iluminâncias normalizadas. Todos os painéis desta categoria registraram, para céu claro, em todo o período de medição, iluminâncias médias inferiores a aquelas obtidas com o uso de um painel de vidro, de mesmas dimensões., no fundo dos módulos.

De maneira geral, o Combisol teve um bom desempenho para elevadas alturas solares, conseguindo para os meses de Março, Maio e Julho os valores mais elevados

de iluminâncias no fundo do ambiente, alcançando uma média de 200lux, cerca de 25% mais que os outros painéis (Figura 5.1Figura 5.85 a Figura 5.88, curva rosa). As médias mensais registradas, para distancias de 90cm e 150cm da abertura foram de 400lux e 150lux, para o mês de março e 400lux e 250lux para o mês de julho.

Para o painel TIM foram registrados, para distâncias de 90cm e 150cm da abertura 150lux e 100lux, para o mês de março e 250lux e 200lux para o mês de junho estes valores são consideráveis, no sentido que este painel não é transparente. Pelo fato do material tubular estar posicionado paralelamente ao piso, o dispositivo funciona de forma semelhante ao LCP, no entanto em função da manta para isolamento térmico, o dispositivo redireciona apenas uma luz que torna-se difusa ao passar pela manta, que funciona como um filtro do espectro, desta forma as iluminâncias registradas durante todo o período de medição não chegam a variar 20%. (Figura 5.1Figura 5.85 a Figura 5.88, curva azul).

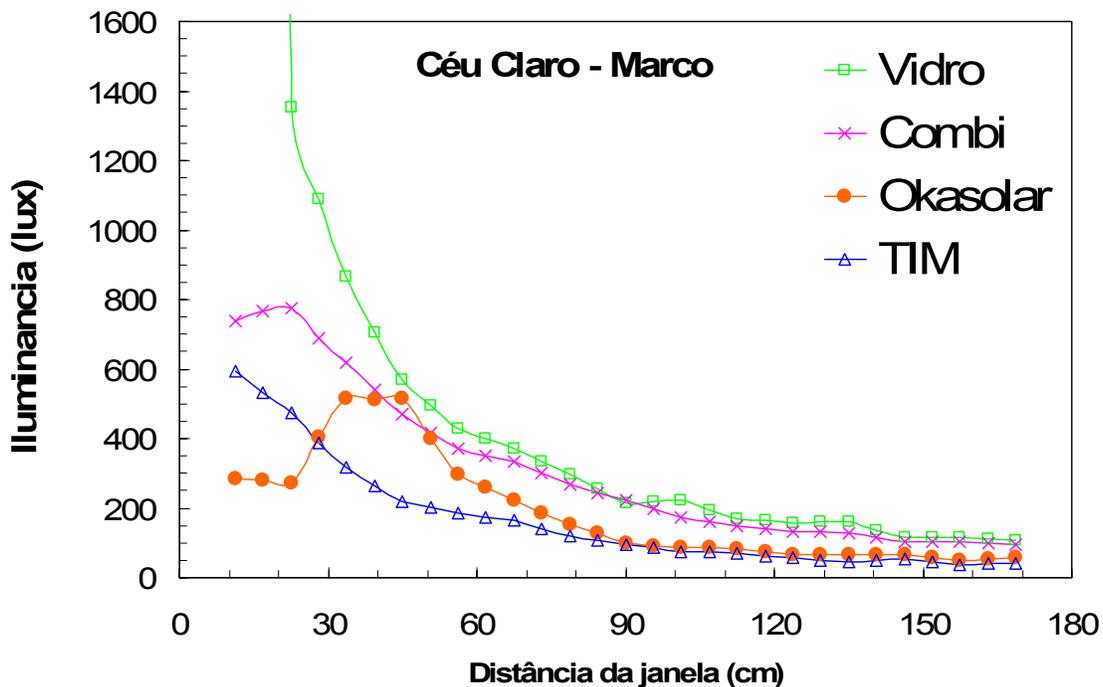


Figura 5.85 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Março, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM

Ao longo dos meses a medida que a altura solar máxima diminui de Março (Figura 5.85) à Julho (Figura 5.88), nenhum destes dispositivos tem iluminância, no fundo, maior que a do vidro comum. Destes o melhor é o Combisol, especialmente para altitudes solares mais baixas.

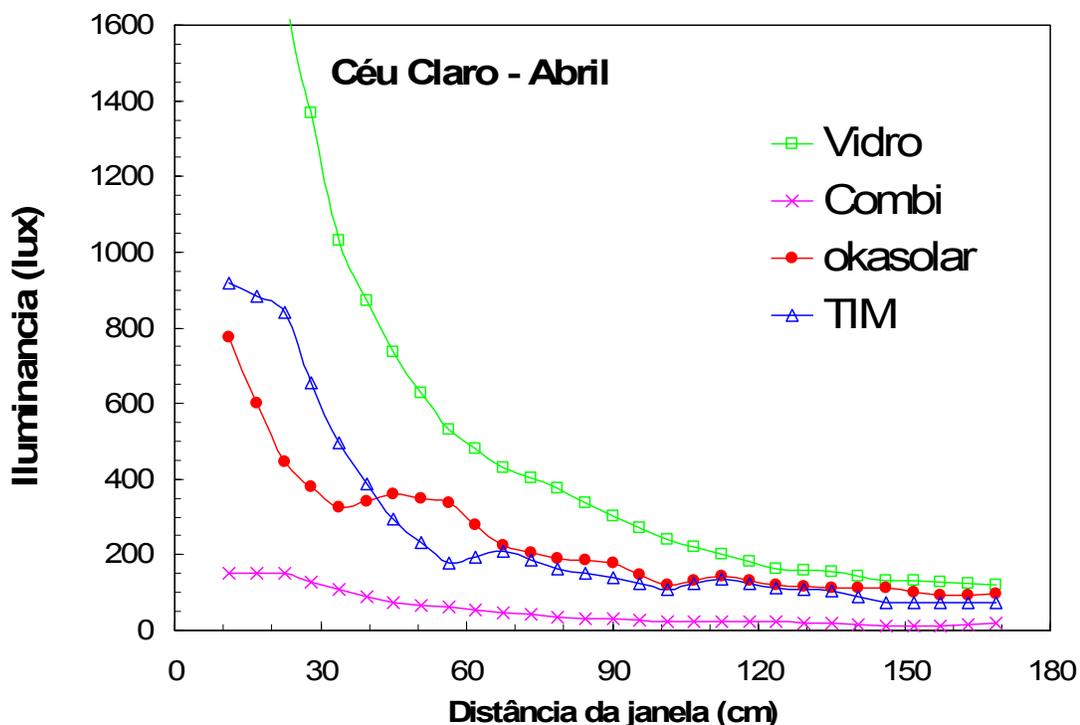


Figura 5.86 - Médias Mensais para Ceu Claro no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM

Como pode ser observado, na Figura 5.89 até Figura 5.91, para os dos países de altas latitudes o céu típico é o de parcialmente ou totalmente encoberto, para estes tipos de céus, foram feitos médias mensais. Cujo desempenho quantitativo é inferior ao do vidro, porem estes painéis são projetados, para preencher completamente uma parede e não ocupando uma área típica de uma janela padrão. Pode-se notar também que o a queda da iluminância em função da distancia da profundidade do modulo, é bastante reduzida, ou seja, existe um contraste bem menor (gerador de ofuscamento) para estes dispositivos. Outra característica destes painéis e sua característica de menor transparência, ou seja, para estes países onde o Sol costuma manter uma baixa altitude durante o ano, evita-se a entrada da luz direta do Sol pela janela.

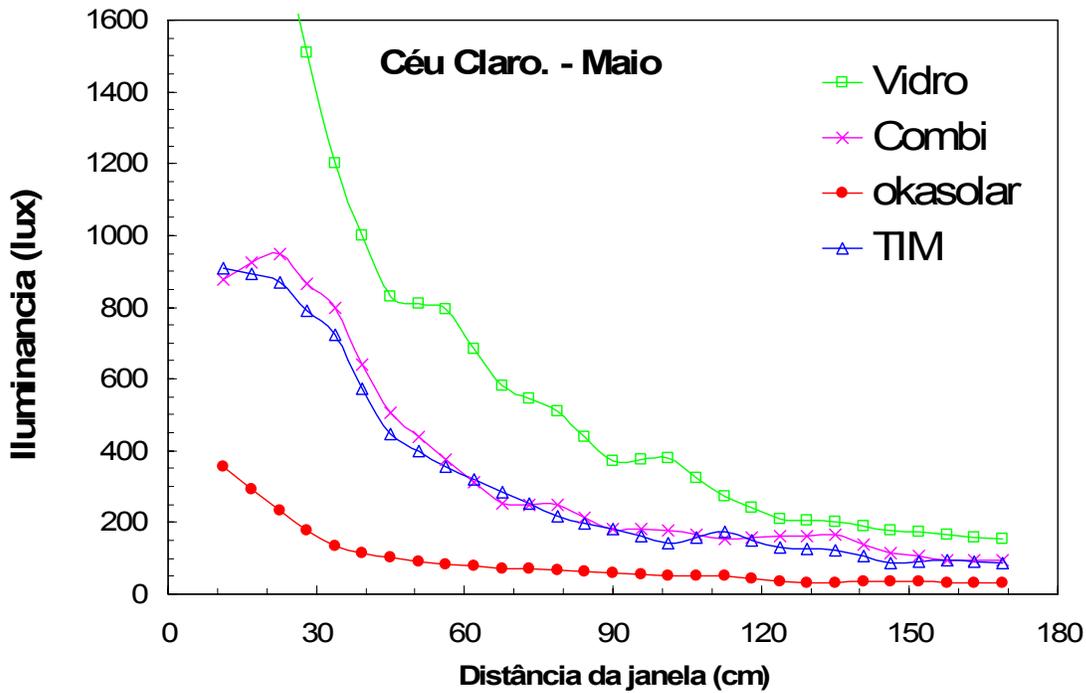


Figura 5.87 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de Maio, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM

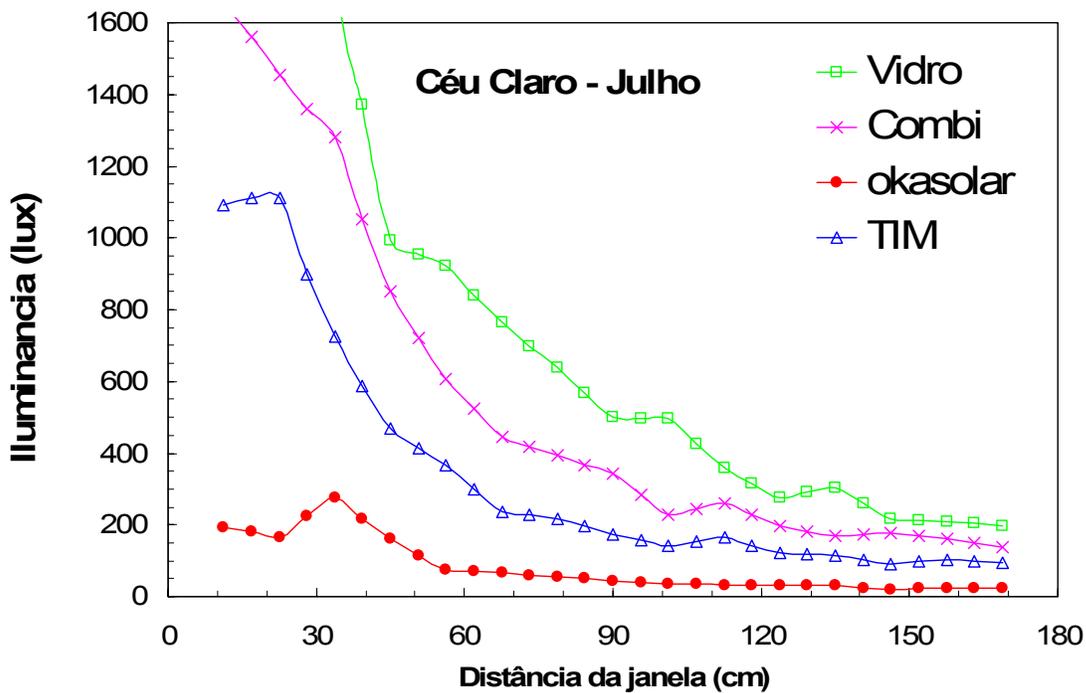


Figura 5.88 - Médias Mensais para Céu Claro no mês de julho, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM

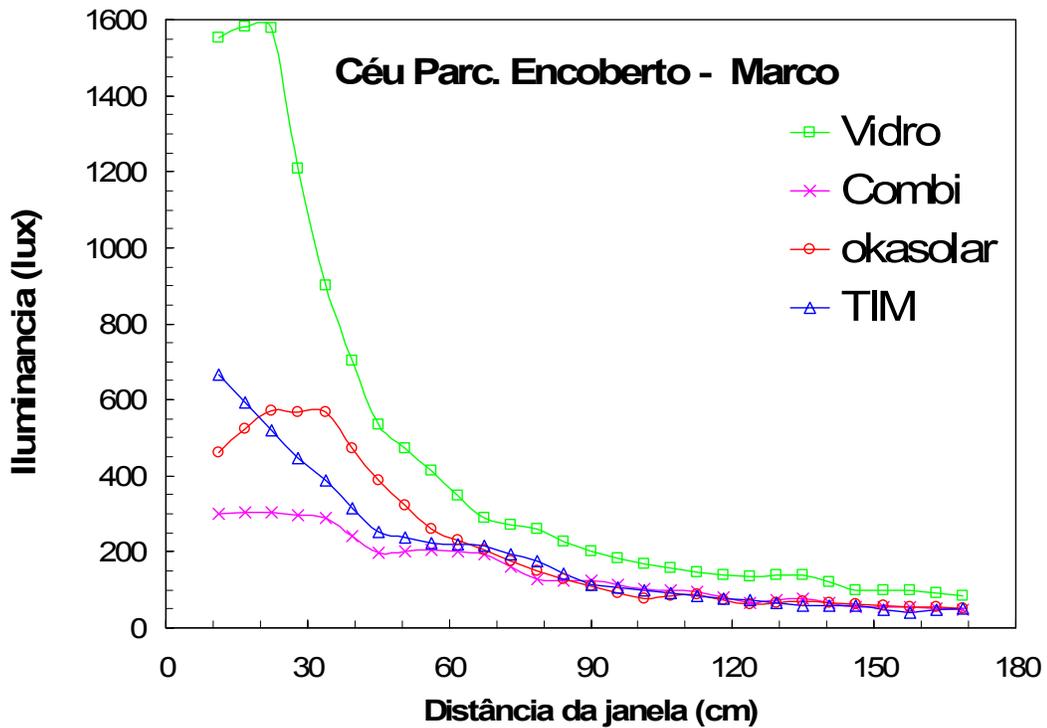


Figura 5.89 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Março, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM

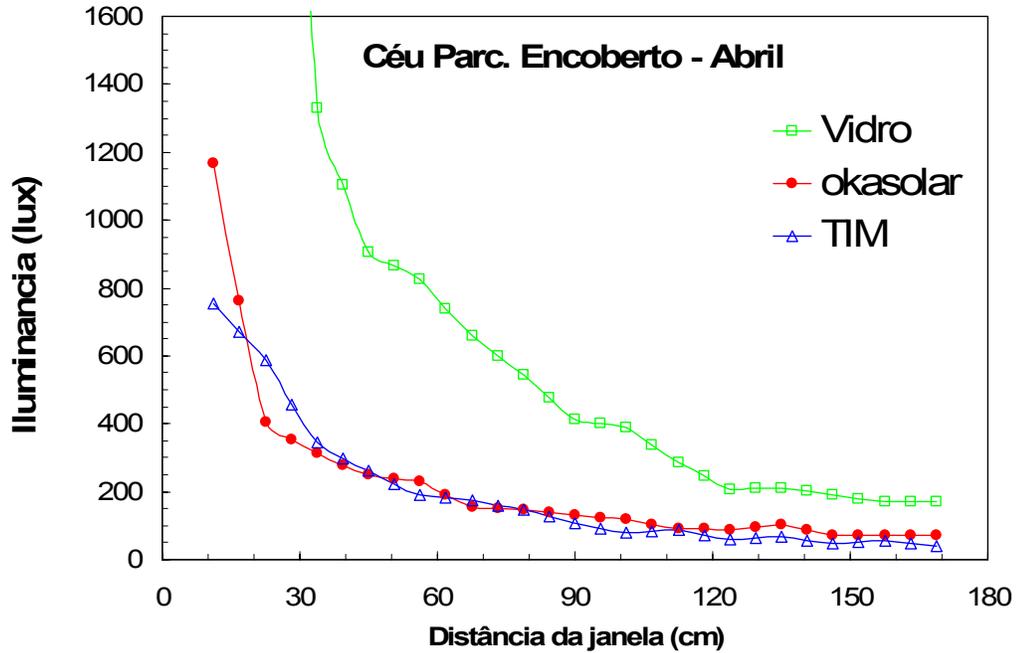


Figura 5.90 - Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Abril, para os painéis de vidro comum, Combisol, Okasolar e TIM

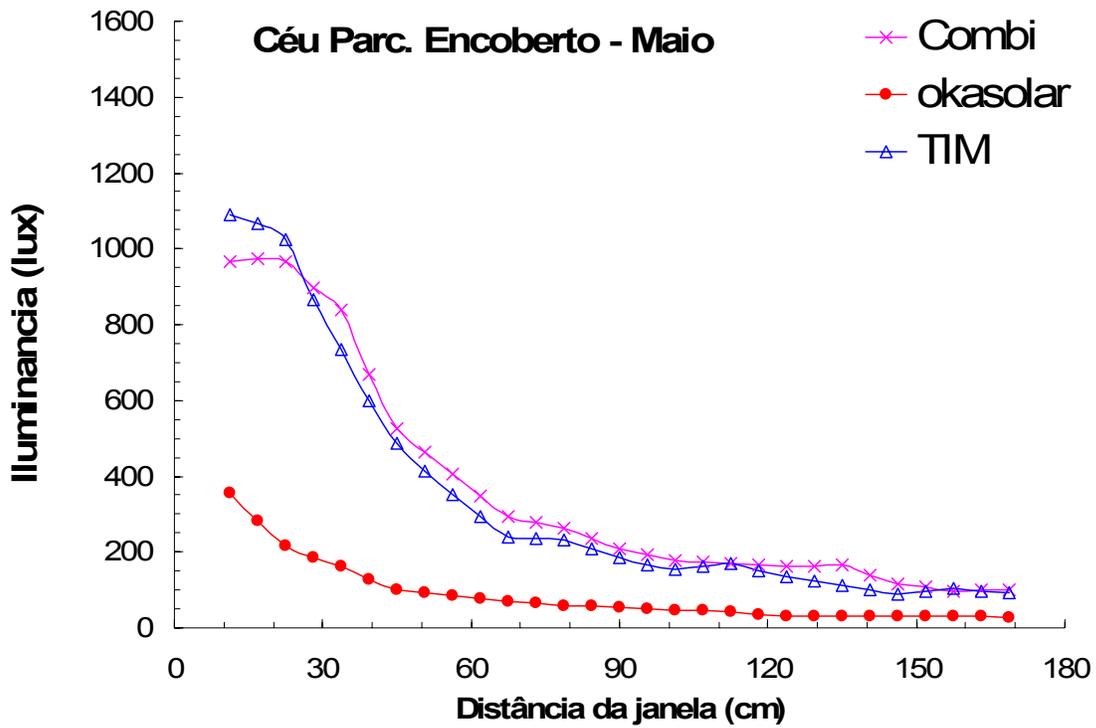


Figura 5.91 Médias Mensais para Céu Parcialmente encoberto no mês de Maio, para os painéis, CombiSol, Okasolar e TIM

Capítulo 6

Conclusões

Este capítulo apresenta uma síntese dos resultados obtidos no decorrer dos estudos dos efeitos de alguns dispositivos de iluminação natural sobre as iluminâncias obtidas dentro de quatro modelos em escala reduzida, para a latitude de Campinas Brasil. No experimento, observou-se a variação nos níveis de iluminação e sua uniformidade, medidos graças a um sistema de medição desenvolvido especialmente, e durante, esta pesquisa, para medição das iluminâncias.

Numa primeira fase foi feito um levantamento sobre os diferentes painéis capazes de redirecionar a luz natural, presentes no exterior. Em seguida foi realizada a caracterização de alguns destes painéis para o entendimento dos princípios físicos que regem o funcionamento de cada painel. Logo, foi possível realizar predições sobre o comportamento de alguns deste dispositivos, mediante a criação de planilhas eletrônicas que trabalham com algoritmos fornecidos pelos idealizadores dos sistemas de redirecionamento.

Num segunda fase, foi feita uma caracterização do desempenho luminoso de cada painel, mediante a obtenção das iluminâncias dentro de protótipos que simulam uma porção de um ambiente. Esta fase da pesquisa abrangeu a montagem, a instalação, a operação e a manutenção do experimento e dos equipamentos desenvolvidos. Através destes experimentos tornou-se possível quantificar o desempenho de cada painel, e a sua capacidade de redirecionar a luz para o fundo dos espaços. O contraste ou ofuscamento gerados pelo equipamento foram monitorados por uma web cam que fotografava o momento exato da medição, e a abobada celeste foi monitorada com fotografias tiradas com uma lente olho de peixe, nos horários de 8:00hs e 17:00hs.

6.1 Ferramenta de Predição

As simulações do comportamento dos dispositivos foram decisivas para a escolha da geometria dos painéis. Também foi possível obter a altura solar com um método de alta precisão que poderia ser utilizado para dispositivos móveis, que necessitem acompanhar a trajetória solar. As planilhas tem uma interface amigável, e são de fácil utilização, principalmente para aqueles que desejem dimensionar painéis LCP, ou Channel Panel para latitudes específicas, a planilha é de grande utilidade.

6.2 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de iluminâncias, foi extremamente valioso para esta pesquisa. Por ser de baixo custo (400 reais) permitiu a utilização de 64 sensores, de forma que fosse possível uma avaliação minuciosa das iluminâncias dentro dos

modelos. A escolha por este tipo de solução, foi impulsionada pelos sistemas normalmente disponíveis para medição de iluminâncias que possuem, devido aos altos custos das fotocélulas, cerca de 12 sensores luminosos, o que não permitiria o estudo simultâneo das iluminâncias da forma como foi realizada nesta pesquisa. Para aquisição dos dados o sistema precisou estar ligado a um PC, e em função disto foi possível fotografar com uma web cam o momento exato das medições, portanto a cada 10 minutos. Com os dados obtidos foram criados gráficos de Iluminâncias Normalizadas e Iluminâncias Médias, que permitiu a comparação do desempenho dos painéis para céu claro e céu encoberto durante o período de medição, de Março a Julho.

6.3 Avaliação do Desempenho dos Modelos

A fase experimental desta pesquisa foi bem sucedida, pois os dados das iluminâncias coletados, juntamente com as imagens do interior dos modelo e do céu permitiram que fosse realizada uma avaliação clara do desempenho destes painéis para Campinas. Originalmente todos os painéis deveriam ser de dimensões 15cmx50cm, no entanto para alguns painéis foi possível importar somente um exemplar do dispositivo, o que prejudicou a comparação entre os dispositivos maiores e menores, ainda assim foi possível confirmar o desempenho de cada dispositivo.

6.4 Limitações

Maiores limitações foram devidas ao desenvolvimento do sistema de medição, e mais precisamente a sensibilidade do sensor luminoso, LDR ao espectro visível. Pelo fato deste sensor enxergar mais no infra-vermelho, foram necessárias constantes calibrações que foram possíveis somente pelo fato que, se considerarmos a distribuição de radiação do corpo negro, para uma mesma temperatura de cor, é possível, fazer uma relação e estimar a quantidade de radiação visível. Em outros termos conhecendo uma parte do espectro é possível determinar o resto da curva, pelo fato da distribuição já ser conhecida. No entanto este fato tornou necessária a calibração mensal dos 64 sensores, um a um, o que consumiu cerca de quatro dias, para cada mês de medição para a realização completa da calibração. Além disto existe o problema que a temperatura de cor deve permanecer a mesma, semelhante à do corpo negro, portanto para os horários do amanhecer e entardecer, logo em função da mudança da temperatura de cor, os dados devem apresentar erros maiores. Ainda assim optou-se por utilizar o sistema de medição porque o objetivo principal da pesquisa era avaliar o desempenho dos painéis no horário comercial.

6.5 Considerações Finais

Dos sistemas testados, os Painéis Prismáticos, os LCP, o Channel Panel, o Micro Sun Shielding Louvers e o Combisol são aqueles que aumentaram significativamente as iluminâncias no fundo do ambiente. No entanto estes sistemas causam ofuscamento quando suas superfícies refletoras se encontram no altura do campo de visão do observador, por este motivo seria adequado utilizar este sistema ou nas aberturas, acima de 1,90 ou com algum outro tipo de proteção acoplada, para que

os feixes que são refletidos nas lamelas do dispositivo não atinjam diretamente o olho do usuário.

Dos resultados das medições das iluminâncias foi possível concluir que o dispositivo Channel Panel é o dispositivo que melhor redireciona as componentes da luz, direta e difusa, para o fundo do módulo. Este dispositivo é capaz de redirecionar a luz, tanto para maiores, quanto para menores alturas solares. Além disso a distribuição de luz que proporciona é mais homogênea, evitando desta forma contraste de áreas dentro do espaço. Estas propriedades custaram a este dispositivo a sua transparência, assim se um LCP é praticamente transparente, o Channel Panel tende a ser translúcido, se atingido por raios solares.

Diferentemente dos painéis acrílicos da família do LCP, o painel prismático, limita a entrada da luz solar direta, proporcionando uma proteção para os horários do dia nos quais a alta concentração da luz causa ofuscamento, no ambiente. A distribuição de luz que propicia também é homogênea, no entanto este sistema cria uma dispersão de cores bastante intensa que causa uma sensação visual desconfortável.

Os brises, Okasolar, RETROLux, RETROFlex, e RETROLuxTherm, desenhados para retro-refletir a luz vinda de maiores alturas solares, desempenharam seu papel de forma brilhante, ao excluir os feixes incidentes, evitando o contraste nas proximidades da abertura. No entanto desta forma o ambiente tornou-se mais escuro do que o esperado. Este resultado explica o porque das construções que utilizam este tipo de dispositivo, adotarem sempre um pé-direito alto, e o fato da fachada ser composta inteiramente por brises deste tipo. Este tipo de material exige, para obtenção de um bom aproveitamento da luz natural, que uma grande área seja recoberta por este material, de modo a aproveitar a componente difusa da abobada celeste. Provavelmente se os modelos em escala reduzida testados fossem com suas paredes inteiramente compostas deste material, as iluminâncias registradas no interior seriam maiores. A transparência obtida com estes perfis é livre de ofuscamento permitindo um contato com o exterior através dos brises.

Os experimentos mostraram que todos os dispositivos poderiam facilmente ser adaptados ao clima luminoso de Campinas, no entanto cada um destes dispositivos tem as suas limitações. Com isto concluímos que uma solução ótima para alcançar um aproveitamento otimizado da luz natural dentro dos espaços seria posicionar na parte superior da abertura um Channel Panel (acima de 1,90m) e na parte inferior os brises que trabalham com o princípio da retro-reflexão. Eventualmente uma prateleira de luz poderia ser posicionada entre estes para que não houvesse interferência de um dispositivo no outro. O conforto visual do usuário não seria perturbado pelo redirecionamento intenso para o teto em função da reflexão ou da luz direta, a transparência seria mantida e baixos níveis de contraste, a medida que o ambiente fica mais profundo, seriam alcançados.

6.6 Perspectivas

Ao mesmo tempo que observamos e interpretamos os vários efeitos da luz dentro dos modelos em escala reduzida, este trabalho abriu questões que merecem uma continuidade da pesquisa. Em particular uma solução que agrupa dois ou três diferentes dispositivos, aliando características de redirecionamento da luz direta para o interior, mantendo transparência perto das aberturas e evitando o contraste, buscando um modelo para otimização do uso da luz solar na edificação.

Também acreditamos que vale a pena dar continuidade ao trabalho de criação de sistemas de medição de baixo custo. Atualmente esta linha de pesquisa continua com alunos da Universidade Estadual de São Paulo (USP), que ao invés de utilizarem como sensores Luminosos os LDR utilizam fotodiodos, que é uma grande vantagem pois os sensores utilizados neste trabalho necessitaram de calibração mensal para evitar os erros causados pela memória luminosa do sensor e em função de sua sensibilidade com a temperatura.

Medições durante períodos mais compridos, abrangendo o solstício de verão, poderiam fornecer dados interessantes para avaliação do desempenho deste tipo de dispositivos para as nossas latitudes.

Encontra-se atualmente na USP um projeto para desenvolvimento de um sistema de medição com o uso de fotodiodos, que aparentam ser de maior precisão, e embora mais caros, ainda acessíveis. Nesta linha de pesquisa também começou a ser estudado um *data logger* para ser acoplado ao sistema de medição, desta forma não será mais necessário um PC no local das medições.

O estudo do céu levou ao desenvolvimento de uma planilha, que incorpora as equações da norma da CIE, ISO 2004 capaz de prever as luminâncias da abóbada celeste. Esta planilha deve ser acoplada ao programa DLN, que introduz o conceito de dia luminoso típico (SCARAZZATO, 1995), para atualização do banco de dados que fornece as previsões da luminância, do mesmo.

Referências

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-15215-4 (2005). Iluminação Natural - Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações. Rio de Janeiro, 2004.

AIZZLEWOOD M.E: Innovative daylight Systems : An experimental evaluation International Journal of lighting research and technology. Volume 25 n 4 pp 141-152, 1993.

ANDERSEN M. Generalization of the direct sky component calculation to openings of arbitrary angle. Leukos V.1 n 2 October 2004 pg 39-56

ARCHITECTS COUNCIL OF EUROPE. A Green Vitruvius, principles and practice of sustainable architectural design. James e James, Londres, 1999.

BAKER N., A. FANCHIOTTI, K. STEAMERS. Daylight in architecture- A european reference book. Commission of the european communities directorate-general XII for science, research and development. James e James, Londres. 1998.

BAKER N., STEAMERS K. Daylight design of buildings. Londres, James e James 2002.

BAKER, N.FANCHIOTTI A., STEEMERS, K. 1993 ver se tenho esse....Daylight in Architecture – A European Reference book. James e James Lndon 1993.

BARTENBACH C. MUNICH FÉ. Rep Germany; Martin Moeller Rum, Rudolf lanzenberger Innsbruck, Austria Arrangement for illuminating a room with daylight Int CI G02B 27/00 US patent 4,699,467 13 outubro 1987

BARTENBACH C. Rinner starss 39 A 6020 Innsburg Aldrans Austria. Protection device against solar light US Patent 4,517,960 21 maio 1985.

BARTENBACH, CHRISTIAN. Rinnerstrasse 39, A-6020 Innsbruck-Aldrans, Austria. Protection device against solar light. Int CI F24J 3/02 G02B 27/00 US Patent 4,517,960. 1985.

BELTRAN, LEE E.S K.M. PAPAMICHAEL, AND S:E: SELKOWITS. The design and Evaluation of three Advanced Daylight Systems : Light Shelves, Light Pipes and Skylights. In: Solar 94 Golden Opportunities for Solar Prosperity. Proocedings..., San Jose, California June 25-30 1994.

BIANCHI, F. L'architettura della luce. Edizione Kappa, Roma, 1991

BOWMAKER J.K., DARNALL H.J.. Visual Pigment of rods and cones in human retina. J.Physiol. (London) v.298 pp 501-511 1980.

PERFORMANCE COMMERCIAL BUILDING. Façades. Building Technologies Program, Lawrence Berkley Laboratory June 2002. <http://gaia.lbl.gov/hpbf/main.html>

BUILDING RESEARCH ESTABILISHMENT. Estimating daylight in buildins: Part 2. BRE Digest v.310 Building Research Establishment 1986.

REFERÊNCIAS

CABUS, R.C. Análise do desempenho luminoso de sistemas de iluminação zenital em função da distribuição de iluminâncias. Dissertação de Mestrado UFSC Florianópolis SC. 1995

CHAUVEL, P., COLLINS, J.B., DOGNIAUX, E E LONGMORE, J. Glare from windows : current view of the problem lighting Research and technology V 14 n 1 1982.

CHAVES, A. Física :ondas relatividade e física quântica Reichmann & Affonso Editores Volume 3 2001

CIE Committee E-1.1 International Lighting Vocabulary. CIE Publ.17.4 (Central Bureau of the CIE Vienna 1987

CLAROS ST, SOLER A. Indoor daylight climate-influence of light shelf and model reflectance on light shelf performance in Madrid for hours with unit sunshine fraction Building and Environment 37 (6): 587-598 JUN 2002

COBB, S. Totally internally reflecting light conduct Minnesota Mining and manufacturing Company. US 4.805.984, 1989

CIE STANDARD Guide to recommend practice of daylight measurement. Commission Interlacional d'éclerage CIE 108-1994, Vienna Austria, 1994

CIE STANDARD Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky, Commission Interlacional d'éclerage ISO 15469:2004(E) Geneva 2004

COMPAGNON R., PAULE B., SCARTEZZINI J.-L. Design of new daylighting systems using ADELIN software. In: 3rd European Conference on Architecture : Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Proceedings...., Florence, Italy, 1993.

COMPAGNON, R. J.-L. SCARTEZZINI, B. PAULE . Application of nonimaging optics to the development of new daylighting systems. In: ISES Solar World Congress p. 23-27.

August 1993. Proceedings... in Budapest, Hungary, 1993

http://lesowww.epfl.ch/anglais/daylighting/a_ises93.html

DARULA S. E KITTLER R. Cie general sky standard defining luminance distributions
Proceedings the biannual conference of IBPSA Canadá SIM 12 a 13 set 2002.

DIGERT EDWARD NEALI Mini-optical light shelf daylighting system Co (US) Int Cl
G02B 27/00 US patent 6,239,910 29 Maio 2001

EDMONDS IAN R Performnce of laer cut deflecting panels in daylight applications. Solr
Material Solar Cells V29 I1 Feb 1993 p 1-26

EDMONDS IAN R. Transmission of light through right angle corners in hollow light
guides. Applied Optics Volume 34 - n. 28 - 1 october 1995.

EDMONDS IR, Moore GI, Smith G & Swift PD: 'Daylighting enhancement with lightpipes
coupled to laser-cut light-deflecting panels', Lighting Res. Technol. 27(1), pp27-35,
1995.

EDMONDS IR. The Performance Of Bifacial Solar-Cells In Static Solar Concentrators
Sol Energ Mater 21 (2-3): 173-190 DEC 1990.

EDMONDS, I. R. GREENUP, P. J. Daylighting in the tropics. Solar Energy. Volume 73
(2): pp111-121, 2002.

EDMONDS, I. R. The Performance Of Bifacial Solar-Cells In Prism-Coupled Compound
Parabolic Concentrators. Solar Energy. Volume 48 (4): pp. 235-238, 1992.

EDMONDS, I.R. Permanently fixed collimation devices which combine the function of
shading and daylighting buildings interiors Australian patent office 15055/92

REFERÊNCIAS

EDMONDS, R. Ian. Lentara St., Kenmore 4069 Qld Australia. Transparent light deflecting panel for daylighting rooms. Int. Cl. G02B 17/00. U.S. Patent 4,989,952 1991.

GORDON J.M., RABL A., Nonimaging compound parabolic concentrator-type reflectors with variable extreme direction, Applied Optics, Vol. 31, No. 34, 1992.

HARRISON A.W., COOMBES C.A. Angular distribution of clear short wavelength radiance Solar Energy V.40 n 1 pp 57-63 1988

HECHT, E. Optics editora addison Wesley Longman 1998 Massachusetts

HERNANDES-ANDRES , LEE, ROMERO. Clor and luminances asymetries in the clear sky. Applied Optics Vol.42 i3 p458 jan 2003

HERNANDES-ANDRES, LEE, ROMERO. Color and luminances asymmetries in the clear sky- Applied optics Vol. 42 i3 p458 jan 2000

HOPKINSON R. G “Glare from Windows” Construction Research and Development Journal (CONRAD) V.1 1970 pp. 98-105; V.2 I. 4 1970 pp. 169-175; V.3 I.11971 pp.23-28

HOPKINSON R. G. Glare Disconfort and pupil diameter Journal of the Optical Society of America V.46 n 8 pp 646 a 656, Agosto 1956.

HOPKINSON R. G. Glare from daylight in Buildings Applied Ergonomics V.3 I.4 1972. pp206-215.

HOPKINSON R.G., LONGMORE J., PETHERBRIDGE P., Daylighting, Heinemann, London, 1966

IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Daylight in Buildings: A source book on Daylighting Systems and Components. Lawrence Berkley National Laboratory, 2000. Disponível em: <<http://www.gaia.lbl.gov/iea21>> Acesso em: 15/03/2003.

IGAWA N., HIROSHI NAKAMURA E KUNIO MATSUURA Sky luminance distribution model for simulations of daylight environment, Proceedings IBPSA International Building Performance Simulation Association Kyoto Japan 13-15 Setembro 1999

IGAWA N.; KOGA Y. MATSUZAWA T.; NAKAMURA H. Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution Solar Energy V77 n2 pp137-157 2004

JENKINS D., WINSTON R.. Integral design method for nonimaging concentrators .JOSA A, Volume 13, Issue 10, pp2106. October 1996

JOHN B., STOREY E., BAIRD. G. Towards the self-sufficient city building . IPENZ Transactions- The Institution of Professional Engineers New Zealand, Volume. 26, No. 1/JAN 1999.

KALTENBACH, F. Translucent Materials. Chronicle Books. April, 2004.

KITTLER R. 1967 Standardisation of the outdoor conditions for the calculation of the daylight factor with clear skies , Proceedings CONF> Sunlight in buildings , Bouwcwntum Rotterdam, 273-286

KITTLER, R. Luminance distribution characteristics of homogeneous skies: a measurement and prediction strategy. Lighting Research and Technology,, vol 17. No. 4, pp183-188. 1985.

KITTLER, R., DARULA, S., PEREZ, R. A set of standard skies, characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design“, American-Slovak grant project US-SK 92 052, 1998.

REFERÊNCIAS

KÖSTER H. ,KARL-BIEBER HOHE. 15 D-60437 Frankfurt am Min (DE) Toothed daylight blinds PCT WO 01/00958 4 janeiro 2001.

KÖSTER H. Dinamic daylight Architecture, basics systems projects. Birkhauser, Basel, 2004.

KÖSTER H. Frankfurt (De). Sun protection Installation comprising sun protection lamellae having a toothed upper side. Int cl G02B 27/00 us patent US 006367937 b2 9 abril 2002

KÖSTER H. Gestufe lamelle zur Lenkung von lichtstrahlung DE patent 1954381. 20 março 1997.

LAAR M. , Grimme, F.W. German Developments in daylight guidance systems: An overview. Building Research and information V30 I4, pp 282-301. 2002

LAAR M. Daylighting for the tropics the example of laser cut panels (Australia) and Plexiglas daylight (Germany). Proceedings of the 7th International IBPSA Conference, p.1329-1333, RJ, Brasil, 2001.

LAAR M. G. F.W.. German developments in daylight guidance systems: an overview. Institute of technology in the tropics ITT University of Applied Sciencies Cologne Betzdorfer strabe 2 d 50679 cologne germany 1998

LADSLAO P. S., Visões de luz , o pensamento de arquitetos modernistas sobre o uso da luz na arquitetura Sao Paulo, Universidade Mackenzie 1995

LITTLEFAIR P.J., AIZLEWOOD M.E., BIRTLES AB. The Performance Of Innovative Daylighting Systems. Renewable Energy 5 (5-8): 920-934 AUG 1994.

LITTLEFAIR, P., The Luminous Efficacy Of Daylight : A Review. Lighting Research and Technology 9 set 1985.

LORENZ W. A glazing unit for solar control, daylighting and energy conservation. Solar Energy Volume 70, p. 109-130, 2001.

LORENZ W. Design guidelines for a glazing with a seasonally dependent solar transmittance. Solar Energy 63 (1998), p. 79-96.

LOZANO, R.D. El color y su medicion editora America 1978 buenos Aires

MCCLUNEY. Advanced Fenestrations and daylight systems. In: daylighting 98: International Conference on daylighting technologies for energy efficiency in buildings. Proceedings.... Ottawa, Canada 1998.

MILNER, PETER JAMES. Gifford, Krass, Groh, Sprinkle Anderson and Citkowski; Pc 280 N old Woodard ave suite 400 Birmingham MI 48009 (US). Optical Components for Daylighting and Other Purposes. Int. CL. G02B 27/00. US Patent 2002/0159154 A1

MILNER, PETER JAMES. RED BUS SERRAGLAZE LIMITED (GB) stowe ouse high street knowle Solihull B93 0LN (GB), 2 Transparent Optical component having internal voids 3 ago srto 2001 WO 02/16977 A1

MONCADA G., GIUDICE L. e SANTOLI L. de. Fisica Tencica Ambiental casa editrice Ambrosiana terceiro volume 1999a

MONCADA G., GIUDICE L. e VOLLARO. A de L. Illuminotecnica Editora Ambrosiana Roma 1999b

MOORE, F.. Concepts and practice of architectural lighting 1984

MURIEL, Manuel B.; PADILLA, Diego, C., A.; MORTALLA Teodoro L.; CAIRA Martim L. Computing Solar Vector. Solar Energy Volume 70 n°5, pp.431-441, 2001.

REFERÊNCIAS

NAKAMURA, HOKI MAND HAYASHI Y (1985) luminance distribution of intermediate sky J.Light and Vis. Envir 9,1,6-13

NEBHUTH, T. C.; Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich, Fed. Rep. Of Germany: Device from protection from the sun. INT CL E=5F 15/20 . US Patent 4,841,672 27 Junho 1989.

NETO DOS SANTOS, A. A.; Automação de traçado de máscaras de sombras para avaliar dispositivos de proteção solar: uma aplicação compugráfica. Dissertação de Mestrado UFSC 1995

OKALUX 2002. Catalogo de especificações Técnicas de produtos

OKALUX 2002b. Architecture book. Catalogo de produtos.

OVERHEIM, R.D. E WAGNER D.L. Light and Color (New York) John Wiley and Sons, 1982.

PEREIRA, F.O.R. Luz solar direta :Tecnologia para melhoria do ambiente lumínico e economia de energia na edificação. (1993). In: 2º Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, ANAIS. Florianópolis: ANTAC, ABERGO, SOBRAC.

PEREZ, R., SEALS, R., MICHALASKY, J. AND INEICHEN P., 1993, Geostatistical properties and Modelling of Random Cloud Patterns for Real Skies, Solar Energy vol 51 (1) jul1993 pg7-18

PETHERBRIDGE P e LONGMORE J., Solid Angles Applied to visual confort problems Light and Lighting V 55 pg 146 (1962)

ROBBINS Claude L. Daylight design and analisys Van Nostrand Reinhold Company new York 1986

ROY et al. "Sky luminance: Standard digital form for modelling" Lighting Research and Technology Vol. 27 (3) pp161-167 .1995 .

SCARAZZATO, P. "O Conceito de Dia Típico de Projeto Aplicado à Iluminação Natural: Dados referenciais para localidades brasileiras" São Paulo: s.n, 1995, 2v. 483 p. Tese (Doutoramento) apresentada à FAUUSP. Download em <http://www.usp.br/fau/ensino/graduacao/disciplinas/paginas/conforto.html>

SCARTEZZINI J.-L.. Anidolic daylighting Systems. Solar Energy Volume. 73 n2 pp123-135 Abril, 2002.

SIMMONDS, P. ELETRONICS . Compact, low cost PC-Based Daq Module Austrália, January 1997.

SNYDER, J. P. Map Projections – A Working Manual. U.S. Geological Survey Professional Paper 1. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, pp.145-153, 1987

SOBEL I. M. Light University of Chicago 1987 Chicago

STEVENS S.S Galanter E.H. Ratio Scales and category scales for a dozen perceptual continua. Journal of experimental psychology 54 (6) 377-411 1957

STEVENS S.S On the Psychophysical law. Psychological Review 64 (3): pp153-181 1957

STEVENS S.S. On the theory of scales measurement Science 103 (2684) : pp677-680 1946

STIERLIN, H. Islão de Bagdadea Córdoba. A arquitectura primitiva do século VII ao Século XII TASCHEN 1997

REFERÊNCIAS

THANACHAREONKIT A., SCARTEZZINI J.L., ANDERSEN M. Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules. Solar Energy V79 (2) 2005. pp168-182

TORRICELLI M. C., SALA M. SECCHI S. Daylight, La Luce del Giorno Tecnologie e strumenti per la progettazione. Alinea Edidtrice, Firenze, 1995.

WELFORD W.T., WINSTON R. High Collection Nonimaging Optics, Academic Press, San Diego, California, 1989.

WILLFRIED P. Daylight and Sunshading new concepts and techniques.
www.bartenbach.com/homepage/en/start.htm 2005

I. Anexo I

A Estrutura do Olho

O olho é um órgão periférico da visão e tem características e dimensões diferentes para cada espécie. Possui a capacidade de atribuir uma qualidade (cor) à luz, que varia em função do comprimento de onda da radiação. O estudo de seu funcionamento é importante na medida em que todas as informações visuais que recebemos são assim percebidas em função das características e mecanismos que aqui acontecem.

O olho possui uma dupla função, receptor da mensagem luminosa e processador das informações para sua transmissão ao cérebro, que é o interprete final. Pode ser entendido como um sistema duplo de lentes, que cria uma imagem numa superfície sensível a luz. Tem formato semelhante ao de uma esfera (24mm de comprimento e 22mm de secção) na qual está contida uma massa gelatinosa com uma concha flexível, a esclerótica, Figura I.1, (HECHT, 1998).

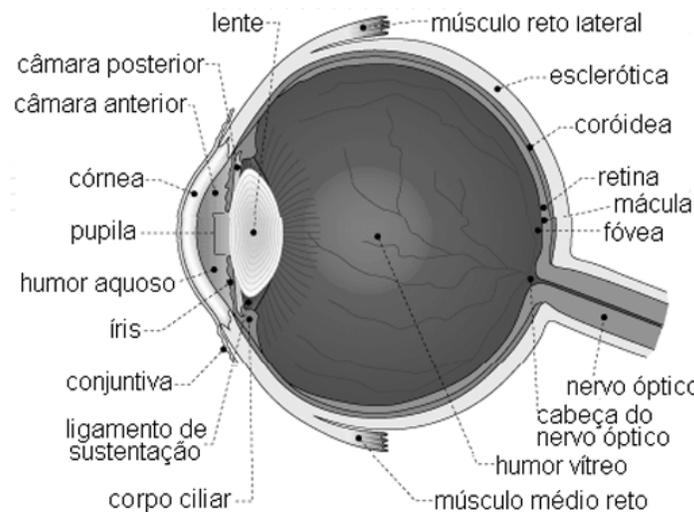


Figura I.1 - Desenho esquemático da estrutura do olho humano
 Fonte: http://www.escolavesper.com.br/olho_humano.htm

Exceto pela sua porção frontal, que denomina-se córnea e é transparente, a esclerótica é branca e opaca. Ao redor do corpo da esclerótica, a córnea tem sua superfície curva, levemente achatada que é o primeiro e o mais forte elemento convexo do sistema de lentes. É responsável pela refração dos raios que acontece na interface ar-córnea. De fato uma das razões pela qual não é possível enxergar bem, embaixo da água, é que o índice de refração da água é 1,33, muito próximo do da córnea de 1,376. A luz que emerge da córnea passa através de uma câmara preenchida com um fluido claro e pouco denso (Humor aquoso, $n_{HA}=1,336$) que preenche a porção anterior do olho. Um raio que passe pela interface ar-córnea sofrerá um leve redirecionamento pela interface córnea-fluido, devido aos índices de refração serem muito semelhantes. Imerso no humor aquoso está a íris, que serve para regular a abertura pela qual entra luz. É a íris que dá ao olho sua cor, (azul, castanho, preto etc.). Composta de músculos circulares e radiais a íris pode expandir e contrair a pupila até 2mm se exposta a luz intensa e até 8mm em condições de baixa luminosidade, também responsável pelo foco.

Imediatamente atrás da íris está o cristalino. É uma massa fibrosa, (rodeada por uma membrana elástica) composta de 22000 finas camadas num total de 9mm de diâmetro e 4mm de espessura. Também são responsáveis pelo mecanismo de foco fino em função da mudança de formas. Atrás das lentes existe uma outra camada

preenchida com uma substância transparente gelatinosa feita de colágeno. Conhecido como Humor Vítreo ($n_{HV}=1,337$) este gel dá sustentação á esfera do olho. Contém partículas microscópicas flutuando livremente.

Colada na parede interna da esclerótica existe uma concha, a coróide. É uma camada escura, com muitos vasos sanguíneos e ricamente pigmentada com melanina. A coróide absorve a luz direta, da mesma forma que acontece com a câmara escura da maquina fotográfica. Uma camada fina de células receptoras de luz (0,5mm e 0,1 mm de espessura) cobre a maior parte da superfície interna da Coróide, é a retina, onde os feixes focados são absorvidos, mediante reações eletroquímicas.

A retina possui terminais de fibras nervosas distintas em cones e bastonetes que são delicados foto-receptores. Existem cerca de 6 a 7 milhões de cones e 75 a 150 milhões de bastonetes distribuídos na inteira superfície da retina, mas a maioria está concentrada em uma região denominada macula lútea de cerca de 1,5mm de diâmetro cuja zona central, (0,4mm de diâmetro) que é denominada fóvea. Esta possui a maior concentração de cones, que reagem aos estímulos de uma certa intensidade, e que são responsáveis pela visão diurna, também denominada visão fotóptica. A performance dos cones na luz clara fornece detalhes coloridos das imagens, mas não respondem em baixos níveis de iluminação, onde atuam os bastonetes. Existem três tipos de cones sensíveis a três cores do espectro, vermelho, verde e azul. Do estímulo em diversas proporções destes receptores deriva toda a percepção das cores.

Logo abaixo do centro da retina existe uma pequena depressão, de 2,5 a 3mm de diâmetro denominada mácula. Nela encontram-se duas vezes mais cones que bastonetes. Existe uma pequena região de aproximadamente 0,3mm de diâmetro com a presença única de cones no centro da macula, esta região denomina-se Fóvea Centralis. Aqui os cones são finos e densamente próximos (0,003 a 0,0015mm de diâmetro). Sendo que a fóvea é o ponto que fornece as informações mais detalhadas. O globo ocular está em constante movimento para que a luz refletida de um objeto de interesse seja direcionada para esta região, assim uma imagem é constantemente deslocada através de diferentes células receptoras, por estes movimentos do olho. Sem

a fóvea o olho perderia de 90 a 95% de sua capacidade, conservando apenas a visão periférica. Distanciando-se da fóvea aumenta o número de bastonetes que servem para a visão em ambientes com baixa luminosidade (visão noturna ou scotópica) e são insensíveis às variações de cor. Os bastonetes (0,002mm de diâmetro) tem como característica a alta velocidade e a expressão de imagens em branco e preto. Em função da sua sensibilidade não respondem a cor e as imagens têm baixa resolução, mas são extremamente sensíveis às variações dos níveis luminosos e à movimentação. Desta forma cones são mais bem adaptados para a visão diurna e bastonetes para a visão noturna.

A área de saída do nervo óptico do olho, também conhecida como ponto cego, não contém receptores e é insensível a luz. O nervo óptico espalha-se para dentro do olho na forma de retina, ou seja, a retina é uma continuação e ligação do nervo e os impulsos são transmitidos de um para outro em direção ao cérebro. Uma vez estimulados pela luz, os bastonetes transmitem a informação recebida, que é modificada de várias formas pelas células amácrinas, bipolares e horizontais. A mensagem é então transferida para as células ganglionares (neurônios localizados na retina e que podem gerar potenciais de ação), cujos axônios convergem para o disco óptico, onde unem-se para formar o nervo óptico. Posteriormente, suas fibras se cruzam no quiasma óptico (nos caso dos mamíferos), de onde parte o trato óptico em direção ao núcleo geniculado lateral dorsal. Devido ao cruzamento que ocorre no quiasma óptico, fibras do trato óptico conduzem informação do hemisfério visual oposto para ambos olhos. A visão é finalmente formada no córtex visual.

A Figura I.2 mostra a absorção dos bastonetes e dos três tipos de cones como função do comprimento de onda. Existem três tipos de cones que se distinguem pela parte do espectro á qual respondem. Os cones do tipo S respondem a um comprimento de onda curto, (dentro do espectro visível), os cones do tipo M que respondem a uma faixa intermediária e os cones do tipo L para as ondas longas. Para níveis de iluminação muito baixos, os cones não conseguem distinguir o comprimento de onda, e por isso a visão não tem cor. No entanto neste caso os bastonetes são sensíveis e portanto ainda é possível enxergar. O sentido da cor advém da comparação das

respostas dos diferentes tipos de cones. Por exemplo enxerga-se o vermelho porque os cones do tipo L são estimulados mais que os outros, (LOZANO,1978).

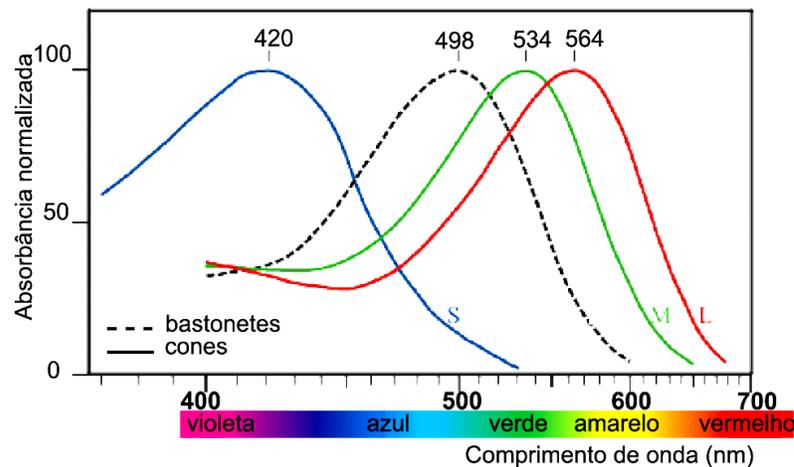


Figura I.2 - Absorção dos bastonetes e dos três tipos de cones como função do comprimento de onda. Fonte: BOWMAKER e DARTNALL, 1980

I.1.1 A Visão

Como visto até agora, o olho humano responde somente a um modesto intervalo de radiações do espectro solar e além disto a sensibilidade da visão às radiações não é a mesma para todos os comprimentos de onda. É necessário portanto que a potência emitida para cada comprimento de onda seja “pesada” de acordo com o estímulo que exerce sobre o olho, de modo que a sensibilidade do olho humano a este estímulo, seja considerada. O olho percebe com mais eficiência a faixa de cores intermediárias (amarelo), assim para obter a mesma percepção visual com cores como vermelho ou violeta é necessário utilizar mais energia por unidade de tempo do que se fosse utilizada uma luz amarela (GIUDICE E VOLLARO, 1999).

Graças a um adequado numero de medidas subjetivas chegou-se a definição de uma função que representa a sensibilidade média do olho humano à diferentes radiações, de igual energia. Tal função é o fator de visibilidade $K(\lambda)$ que representa a

quantificação numérica da sensibilidade visiva do olho humano médio. O fator de visibilidade $K(\lambda)$ é definido de modo que seja satisfeita a seguinte equação:

$$k(\lambda_1)P(\lambda_1) = k(\lambda_2)P(\lambda_2) \quad (1.1)$$

Sendo que as potências radiantes $P(\lambda_1)$ e $P(\lambda_2)$ relativas à ondas monocromáticas de diferentes comprimentos de onda (λ_1) e (λ_2) foram reguladas de forma a gerar sensações de visibilidade equivalentes por intensidade luminosa. O fator $K(\lambda)$ é uma constante, fixada de acordo com a definição de uma outra grandeza fotométrica, a intensidade luminosa. O máximo da sensação de visibilidade, isto é $K(\lambda) = K(\max)$, é obtido para uma radiação monocromática cujo comprimento de onda é de $(\lambda) = 555\text{nm}$ e este valor máximo é dado por $K(\max) = 683\text{lm/watt}$ onde o lumem é a unidade de medida do fluxo luminoso (quantidade de luz irradiada por uma fonte, na unidade de tempo, $1\text{lm}=1 \text{ cd sr,}$). Por comodidade, é estabelecido o coeficiente de visibilidade $V(\lambda)$, também denominado coeficiente espectral de visibilidade e é dado por:

$$V(\lambda) = \frac{k(\lambda)}{k_{\max}} \quad (1.2)$$

Na Figura I.3 é mostrado o comportamento do coeficiente de visibilidade em função do comprimento de onda (λ) da radiação monocromática. Da curva preta é possível perceber que a maior sensibilidade do olho, acontece para um comprimento de 555nm , em condições de luz diurna (visão fotóptica) (GIUDICE E VOLLARO, 1999). A curva tracejada mostra como se modifica a percepção em condições luminosas de menor intensidade (visão scotóptica) e neste caso, a maior sensibilidade do olho é obtida para uma fonte monocromática azul/verde (LOZANO, 1978). É importante lembrar que a visão scotópica se verifica para valores de luminâncias menores que 10^{-3} cd/m^2 e visão fotóptica para valores superiores a 3 cd/m^2 .

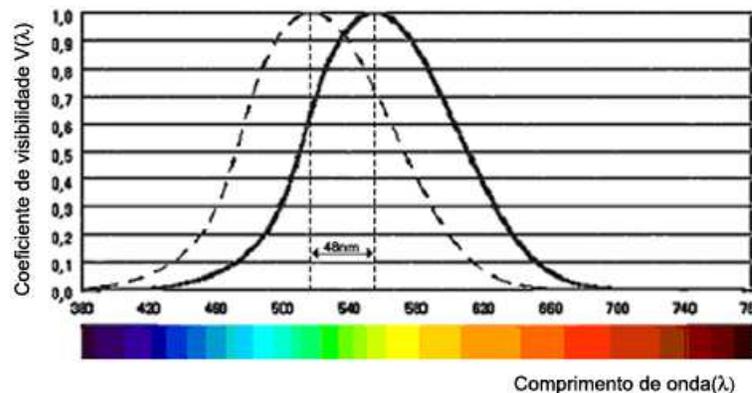


Figura I.3 - Visão Fotóptica e Escotóptica - Comportamento do coeficiente de visibilidade em função do comprimento de onda da radiação monocromática. Fonte: LO GIUDICE, 1999

I.2 Grandezas Fotométricas

As grandezas fotométricas tem como objetivo estabelecer uma avaliação objetiva da sensação de luminosidade. As principais são: o fluxo luminoso e a intensidade luminosa, (características da própria fonte); a iluminância, que representa o efeito que a fonte produz sobre uma superfície, e a luminância, grandeza representativa tanto de fontes como de superfícies iluminadas.

A distribuição da iluminância (1 lumem/m^2), ligada ao fluxo luminoso, representa a medida de como a luz varia de ponto a ponto através do plano de uma superfície para obtenção de uma boa visibilidade para desenvolvimento de uma tarefa. A luminância ($1 \text{ nit} = 1 \text{ cd/m}^2$), ligada à intensidade emitida por uma fonte luminosa por unidade de superfície emitente é utilizada para evitar o fenômeno do ofuscamento. Para uma boa visibilidade é necessária uma certa uniformidade no plano de trabalho visto que gera-se desconforto visual se o olho for forçado a se adaptar rapidamente à áreas com níveis de iluminação contrastantes no mesmo espaço, podendo gerar um desconforto visual denominado ofuscamento (GIUDICE e VOLLARO, 1999).

1.2.1 O Fluxo Luminoso

O fluxo luminoso é a grandeza fotométrica que mede a energia (watt) que sensibiliza o olho (que o olho consegue enxergar), por unidade de tempo (segundo). A unidade de medida do fluxo luminoso é o lúmen (lm) que é o fluxo de energia espectral total (Watt) “pesado” de acordo com a eficiência visual, como função do comprimento de onda, para as radiações monocromáticas

$$\Phi_m = k(\lambda)P(\lambda) \quad (1.3)$$

Onde Φ_m é o fluxo luminoso monocromático, K é a constante de visibilidade para aquele comprimento de onda e P é a potencia radiante (watts). Por exemplo, 1Watt de energia radiante, cujo comprimento de onda ($\lambda=555\text{nm}$; comprimento ao qual o olho é mais sensível), é equivalente a um fluxo luminoso de 683 lumens.

O fluxo luminoso policromático é ligado a energia radiante emitida no campo do visível. Assim para determinar o fluxo de uma fonte é necessário integrar todos os comprimentos no campo visível considerando a taxa de variação da potência energética emitida por comprimento de onda (MONCADA, LO GIUDICE E VOLLARO 1999):

$$\Phi_v = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \frac{dP(\lambda)}{d\lambda} k(\lambda)d\lambda \quad (1.4)$$

Onde $\frac{dP(\lambda)}{d\lambda}$ é a taxa de variação da potência energética emitida por comprimento de onda. Considerando que $K_{\text{max}} = 683\text{lm/Watt}$ e substituindo a equação de visibilidade na equação de fluxo policromático obtêm-se a equação (1.5) (GIUDICE e SANTOLI, 1999b):

$$\Phi_v = 683 \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \frac{dP(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda)d\lambda \quad (1.5)$$

O fluxo luminoso também pode ser definido em função da iluminância (E) por superfície atingida em m² (A) pela equação:

$$\phi = EA \quad (1.6)$$

I.2.2 Intensidade Luminosa

A intensidade luminosa exprime o fluxo luminoso (Φ) emitido ou refletido por uma fonte puntiforme, no ângulo sólido elementar ao redor de uma dada direção r (Figura I.4). Assim:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1.7)$$

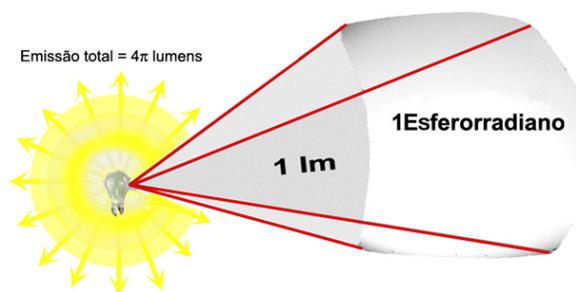


Figura I.4 - Desenho esquemático onde a Intensidade luminosa é dada pelo fluxo luminoso (Φ) em função do ângulo em esferorradiano ω obtido dividindo-se a área projetada pelo raio ao quadrado.
 Fonte: modificado de www.squ1.com

A unidade de medida é o lumem/esferorradiano (lm/sr) ou candela (cd) definida como a intensidade luminosa emitida em uma dada direção por uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz ($\lambda = 555$ nm) e com intensidade energética naquela direção de $1/683$ W/sr. Esta frequência foi escolhida porque a ela corresponde o máximo de sensação de visibilidade ($K(\lambda) = K_{\max}$) (GIUDICE e SANTOLI, 1999b). Portanto,

$$1cd = k_{\max} \frac{1}{683} \frac{W}{sr} \text{ ou } k_{\max} = 683lmW^{-1} \quad (I.8)$$

Para definição de intensidade luminosa é interessante a introdução da grandeza: Intensidade Media Esférica (I_o), definida como a intensidade luminosa constante, em cada direção possível, vinda de uma fonte, que emite em todo o espaço, um fluxo luminoso, sendo que todo o espaço corresponde ao ângulo sólido 4π . Ou seja, uma fonte de intensidade I de uma candela emite um lumem por unidade de ângulo sólido (1lumem/sr), ou 4π lumens em todas as direções (GIUDICE e SANTOLI, 1999b). De acordo:

$$I_o = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (I.9)$$

A intensidade luminosa também pode ser obtida em função da iluminância (E) e da distância entre a fonte e a superfície iluminada (d), em metros e de acordo com a fórmula:

$$I = Ed^2 \quad (I.10)$$

1.2.3 Iluminância

A iluminância em um dado ponto é definida como sendo a taxa de variação do fluxo luminoso incidente (lumem) num ponto, em função do ângulo sólido que atinge uma área aparente (m^2), (Figura I.5), de acordo com a seguinte fórmula:

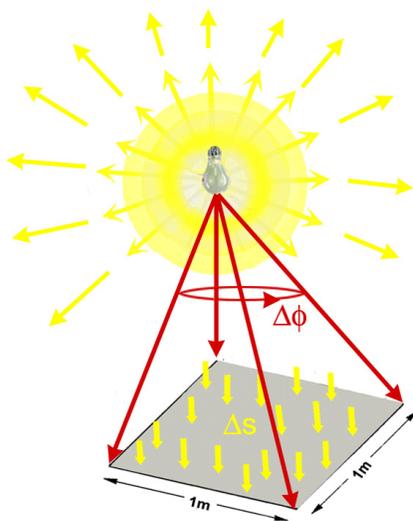


Figura I.5 - Fluxo luminoso incidente sobre uma superfície unitária. Fonte: www.squ1.com

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.11)$$

Sua unidade de medida é portanto lumem/m², grandeza denominada lux. Desta forma 1lux equivale à iluminância de uma superfície de 1m² que recebe um fluxo luminoso de 1lumen igualmente distribuído. Pelo fato da iluminância ser dada em função da área aparente atingida isto implica que se o plano receptor estiver normal á fonte luminosa, ou inclinado, os valores da iluminância se alteram. Se a superfície é perpendicular á direção dos raios luminosos então:

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (1.12)$$

Onde E é a iluminância, I é a Intensidade luminosa e d é a distância da fonte ao plano receptor. Desta forma nota-se que a iluminância é inversamente proporcional ao quadrado da distância (da fonte á superfície iluminada). Se a superfície é inclinada, será preciso corrigir os valores em função do ângulo de inclinação (α) então:

$$E = \left(\frac{I \cos \alpha}{d^2} \right) \quad (1.13)$$

Onde α é o ângulo de incidência compreendido entre a direção dos raios luminosos e a normal à superfície. Portanto a iluminância pode ser calculada para um plano horizontal (E_o) ou para um plano vertical (E_v) (Figura I.6).

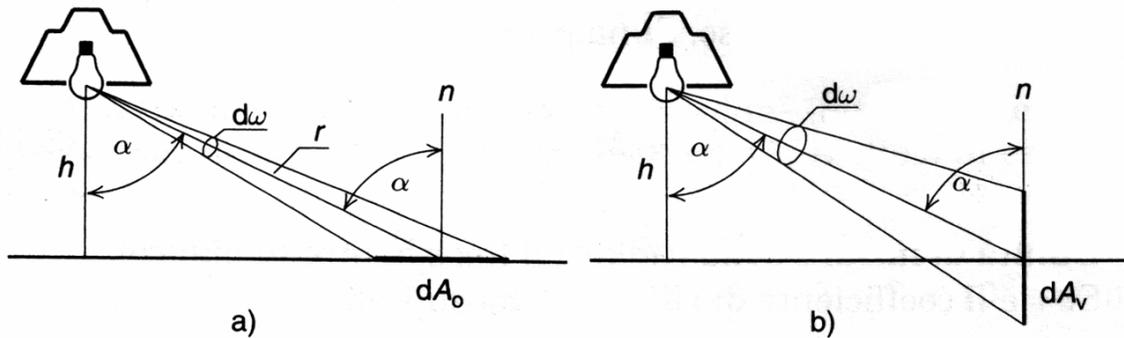


Figura I.6 - Iluminância no plano a) horizontal e b) vertical. Fonte: GIUDICE e SANTOLI, 1999b

No plano horizontal, sendo a variação da área $dA_o = \frac{r^2 d\omega}{\cos \alpha}$ a iluminância horizontal pode ser expressa pela lei do cosseno como:

$$E_o = \frac{d\Phi}{d\omega} \frac{1}{r^2} \cos \alpha; \tag{I.14}$$

$$E_o = \frac{d\Phi}{d\omega} \frac{1}{h^2} \cos^3 \alpha \tag{I.15}$$

$$E_o = I_\alpha \frac{\cos^3 \alpha}{h^2} \tag{I.16}$$

Estas relações podem ser claramente entendidas como mostrado a seguir: O ângulo sólido é dado pela área em função do raio que liga, a fonte, à área tingida, de acordo com a seguinte formula,

$$\omega = \frac{A}{r^2} \tag{I.17}$$

Desta forma a taxa de variação do ângulo sólido é dada pela variação da área que o observador consegue enxergar pela distância até a fonte:

$$d\omega = \frac{dA_1}{r^2} \quad (1.18)$$

onde $d\omega$ é o elemento de ângulo sólido, A_2 é área superficial normal ao observador, A_1 é a área que o observado enxerga e r é o raio que separa a fonte da superfície. Mas se a área realmente vista pelo observador varia em função do ângulo que o olho faz com a normal da superfície, então a área vista pelo observador será a área superficial multiplicada pelo co-seno do ângulo que seu olho faz com a normal, Figura I.7. Desta forma:

$$A_2 = A_1 \cos \alpha \quad (1.19)$$

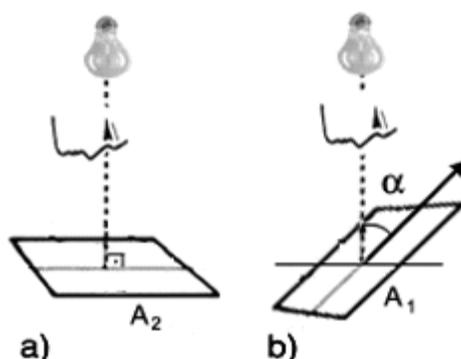


Figura I.7 - (a) A área A_2 é vista em sua totalidade pelo observador, isto porque a normal do plano, coincide com o ângulo de visão do observador. (b) Na medida em que o plano é inclinado forma-se um ângulo entre a normal do plano e o ângulo de visão do observador (α), desta forma a área $A_2 = A_1 \cos \alpha$. Fonte: LO GIUDICE, 1999

Substituindo (1.19) em (1.18)

$$d\omega = \frac{d(A_1 \cos \alpha)}{r^2} = d\omega = \frac{\cos \alpha dA_1}{r^2} \quad (1.20)$$

$$\frac{1}{dA_1} = \frac{\cos \alpha}{r^2} \frac{1}{d\omega} \quad (1.21)$$

$$\frac{d\omega}{dA_1} = \frac{\cos \alpha}{r^2} \quad (1.22)$$

Em seguida torna-se interessante escrever a iluminância em termos da Intensidade Luminosa por isso forma multiplicados ambos os termos da equação pela taxa de variação do ângulo sólido ($d\omega$), portanto:

$$E = \frac{d\Phi}{dA_1} \frac{d\omega}{d\omega} = \frac{d\Phi}{d\omega} \frac{d\omega}{dA_1} \quad (1.23)$$

Desta forma percebe-se que o primeiro termo da equação é a intensidade luminosa e diz respeito a fonte luminosa, enquanto o segundo termo refere-se a geometria do sistema em estudo. Ulteriores avanços podem ser obtidos manipulando a geometria. Substituindo (1.22) em (1.23) obtêm-se que:

$$E = \frac{d\Phi}{d\omega} \frac{\cos \alpha}{r^2} \quad (1.24)$$

sendo que, como visto anteriormente $d\Phi/d\omega$ é igual a intensidade luminosa. Pela Figura I.8 é possível obter as seguintes relações:

$$\cos \alpha = \frac{h}{r} \text{ portanto, } \frac{1}{r} = \frac{\cos \alpha}{h} \quad (1.25)$$

Substituindo (1.25) em (1.24) será obtida a seguinte equação:

$$E = \frac{\cos^3 \alpha}{h^2} \frac{d\Phi}{d\omega} \text{ ou } E = I \frac{\cos^3 \alpha}{h^2} \quad (1.26)$$

O mesmo se verifica para a iluminância recebida num plano vertical, (onde A_v é a área vertical) sendo que a área considerada, é $dA_v = \frac{r^2 d\omega}{\text{sen} \alpha}$ e a iluminância pode ser expressa como:

$$E_v = \frac{d\Phi}{d\omega} \frac{1}{r^2} \text{sen} \alpha \text{ ou } E_v = \frac{d\Phi}{d\omega} \frac{1}{h^2} \cos^2 \alpha \text{sen} \alpha \text{ e portanto} \quad (1.27)$$

$$E_v = I_\alpha \frac{\cos^2 \alpha \text{sen} \alpha}{h^2} \quad (1.28)$$

A resposta ao efeito do cosseno é de máxima importância para medição de iluminâncias com fotosensores. À medida em que a angulação solar incidente modifica sua direção, o fotosensor que não possui uma correção em função do cosseno registra valores inferiores aqueles reais, pois a área da fonte luminosa que este enxerga torna-se menor, em função da angulação da própria fonte. (NBR-15215-4).

I.2.4 Luminância

A luminância é o fluxo luminoso emitido por uma superfície aparente, no ângulo sólido elementar, em uma dada direção, cuja unidade de medida é o nit (ou cd/m^2). De acordo com a definição (GIUDICE E VOLLARO, 1999b), em um ponto de uma superfície, em uma determinada direção, a luminância é dada pela taxa de variação da intensidade luminosa emitida naquela direção em função da taxa de variação da área da superfície emitente, projetada sobre um plano, perpendicular a mesma direção. Ao definir a luminância de uma superfície as características de reflexão da própria superfície devem ser consideradas. Assim numa superfície preta é possível obter a mesma iluminância que numa superfície branca, mas as superfícies, mesmo que atingidas pelo mesmo fluxo luminoso terão valores de luminância bem diferentes (TORRICELLI, SALA E SECCHI, 1995)

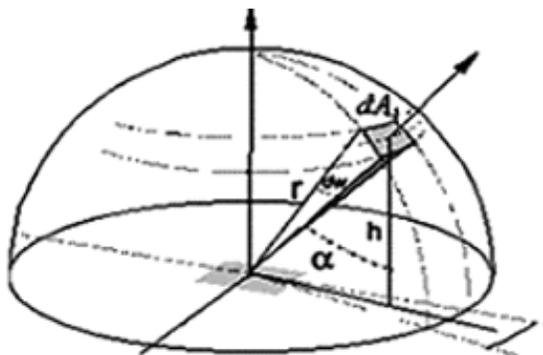


Figura I.8 - Luminância e as variáveis esféricas relevantes. Fonte: ANDERSEN, 2004

A expressão da luminância é:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha} = \frac{d\left(\frac{d\Phi}{d\omega}\right)}{dA \cos \alpha} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dA \cos \alpha} = \frac{dE}{d\omega \cos \alpha} \quad (1.29)$$

Onde d é a distância da fonte ao ponto de medição, I é a intensidade luminosa, A é área da superfície luminosa, α é o ângulo de inclinação do ponto medido em relação à fonte (Figura I.8). A luminância de uma superfície perfeitamente difusora está ligada à iluminância de acordo com a equação (1.30) onde ρ é o fator de reflexão difusa, de acordo com a equação abaixo:

$$L = \rho \frac{E}{\pi} \quad (1.30)$$

Tabela I.1 - Quadro resumo das grandezas fotométricas.

| Nomeação | Expressão | Definição |
|--|----------------------------------|--|
| Fluxo luminoso (Φ) Lúmen (lm) | $\Phi = k(\lambda)P(\lambda)$ | Potencia radiante visível em função do comprimento de onda emitido |
| Intensidade luminosa (I) Candela (cd) ou (lúmen/esferoradiano) | $I = \frac{d\Phi}{dA}$ | Fluxo luminoso emitido por esferoradiano |
| Luminância (L) Nit ou cd/m^2 | $L = \frac{d\Phi}{d\omega}$ | Intensidade luminosa por unidade de área projetada |
| Iluminância (E) Lux ou (lm/m^2) | $dE = \frac{dI}{dA \cos \alpha}$ | Fluxo incidente numa superfície por unidade de área |
| Relação iluminância (E) e luminância | $dE = L \cos \alpha d\omega$ | (L) Lux ou (lm/m^2) |
| | | |

I.3 Ofuscamento

O vocabulário Internacional da CIE (CIE 1987) define o ofuscamento como uma condição de visibilidade na qual existe excessivo contraste ou uma inapropriada distribuição das luminâncias, que causa desconforto e limita a capacidade de distinguir detalhes e enxergar objetos (CIE 1987). Este fenômeno se verifica quando ocorre um espalhamento intraocular da luz no olho, reduzindo o contraste na imagem da retina prejudicando ou impedindo a visão. De fato diante de uma fonte causadora de ofuscamento a pupila não só contrai, mas varia seu diâmetro, abrindo e fechando irregularmente a cada poucos segundos. Estas ações contrárias do sfíncter e dos músculos dilatadores, são devidas á instabilidade das indicações vindas de diferentes partes da retina, enquanto, algumas áreas são altamente estimuladas por uma fonte extremamente luminosa e outras são menos estimuladas por receber a luz, bem menos intensa, do entorno. Em casos de extremos contrastes, o mecanismo subcortical, projetado para proteger a retina de danos, é acionado impedindo a visão por completo (HOPKINSON, 1956). Assim o desconforto pode ser causado tanto por distribuições não uniformes de luz, com elevado contraste, tanto por níveis muito elevados de luz ,ou de brilho intenso. Este processo se verifica quando um observador num ambiente cuja luminância média fica entorno de 100cd/m^2 olha para um ambiente, normalmente externo, onde se verifica uma luminância de 1000cd/m^2 .Esta diferença irá então gerar um desconforto, na medida em que não será vista nenhuma imagem, até que o sistema visual adapte a sua faixa de aceitação, de modo que esta nova faixa seja a de referência, tornando perceptivas as novas imagens, como explicado anteriormente. De acordo com este processo dependendo dos níveis de luminância média de um ambiente (que determina o nível de adaptação do usuário) a mesma luminância de um segundo espaço, pode ser percebida pelo olho tanto como escura, quanto como ofuscante. Em função disto a avaliação da qualidade luminosa de um ambiente deve levar também em conta o contraste de iluminâncias dentro do espaço.

O ofuscamento pode ser vivenciado como desabilitante, quando o observador não consegue distinguir os detalhes; ou desconfortável, quando a presença de fonte

extremamente brilhosas causam um estado de desconforto. Pode ser subdividido em três classes: direto, indireto ou refletido. O primeiro, é causado pelas fontes de luz diretamente visíveis no campo de visão, (que compreende uma faixa angular entre 60° e 180°). Dentro deste intervalo os níveis aceitáveis de luminâncias variam de acordo com o ângulo de incidência no olho, visto que o olho humano não aceita altos níveis de brilho diretamente na área de visão foveal.

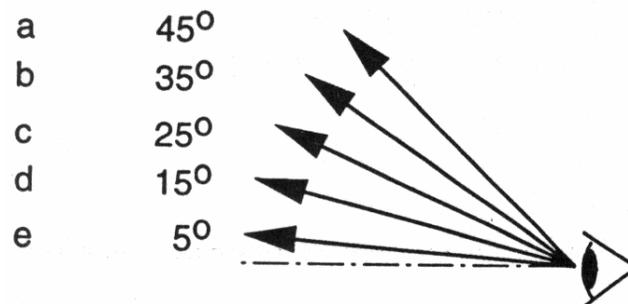


Figura I.9 - Níveis aceitáveis de luminâncias para cada ângulo de visão: (a) 2500cd/m² (b) 1800cd/m² (c) 1250cd/m² (d) 850cd/m² (e) 580cd/m². Fonte: ROBBINS, 1986

O ofuscamento indireto, pode ser “reflected glare ou veiling reflections”. O primeiro é causado por superfícies brilhosas que refletem imagens da fonte de luz nos olhos. O segundo ocorre quando pequenas áreas na área de trabalho refletem luz de uma fonte brilhosa (janelas ou lâmpadas) reduzindo o contraste entre a área de trabalho e o entorno imediato. Este tipo de ofuscamento ocorre quando o ângulo de incidência da luz se encontra no plano de trabalho no campo visual do observador. Normalmente o ângulo que mais causa ofuscamento é o de 25° como mostra a figura abaixo. As áreas sujeitas á ofuscamento podem ser facilmente identificadas com o uso de um espelho no plano horizontal, sobre o plano de trabalho. (BAKER, FANCHIOTTI e STEEMERS, 1993).

Para evitar o ofuscamento é necessário que as fontes de luz estejam localizadas fora do ângulo de reflexão dos feixes incidentes (Figura I.10) ou que as superfícies de trabalho não estejam voltadas para elas. É necessário evitar planos de trabalho com elevadas refletâncias, (como mesas brancas) preferindo cores mais opacas com cerca de 35 a 50% de refletância. Os espaços adjacentes devem possuir

uma iluminação uniforme para evitar contraste excessivo. Uma das estratégias mais eficientes é projetar o ambiente com uma segunda abertura em outra parede para aumentar os níveis médios da iluminação.

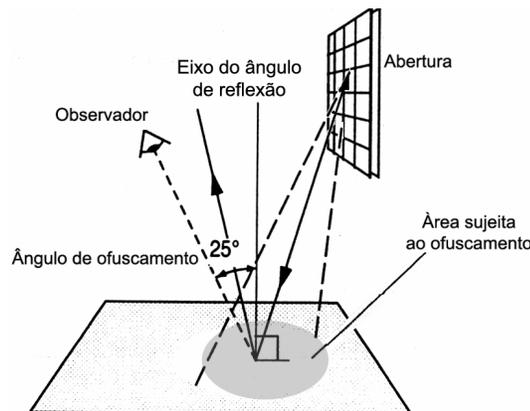


Figura I.10 - Ofuscamento em superfícies horizontais.
Fonte: BAKER, FANCHIOTTI e STEEMERS, 1993

I.3.1 Índices de Desconforto para o Ofuscamento

Diferentes métodos de análise para uma avaliação quantitativa do ofuscamento foram desenvolvidas em função da relação da luminância entre uma fonte luminosa e o fundo. No entanto vários destes algoritmos são válidos para fontes que tenham subentendido ângulos sólidos de até 0,01 radianos e portanto somente para análise de sistemas de iluminação artificial. Para ambientes iluminados artificialmente a IES (*Illuminating Engineering Society*) definiu uma expressão que determina o contraste causado pelo ofuscamento (*glare discomfort, G*) mostrada pela equação (I.31).

$$G = KP \left(\frac{L_s^{1.6}}{L_b} \omega^{0.8} \right) \quad (I.31)$$

Onde: K é a constante que depende das unidades empregadas, P é o fator de posição, dependente da posição da fonte luminosa em relação á linha de visão; L_s é a

Note-se que, a escala logarítmica, na qual coloca-se o problema, foi escolhida em função da magnitude da resposta da sensibilidade humana, que é proporcional ao logaritmo do estímulo, de acordo com o modelo psicofísico de Stevens (STEVENS 1946,1957). Desta forma a medida que o estímulo da sensação aumenta (I), a magnitude da resposta (S), aumenta de forma logarítmica (Figura I.11). de acordo com a equação (I.33):

$$S = kI^a \quad (I.33)$$

e portanto

$$\log S = a \log(I) + \log k \quad (I.34)$$

onde S é a magnitude da sensação K é a constante de proporcionalidade em função das unidades, I é a intensidade do estímulo e a é o expoente que varia em função da modalidade (representado pela inclinação da reta).

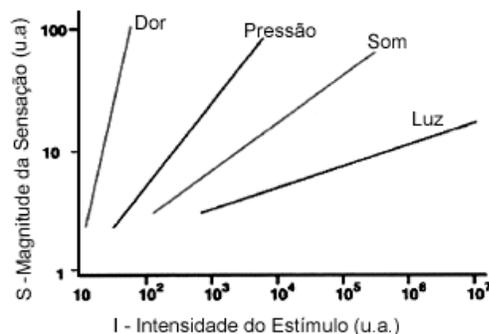


Figura I.11 - Magnitude da sensação, modelo de Steven. Fonte: STEVENS, 1946

II. Anexo II

Circuito Eletrônico

Nesta seção será apresentado o circuito de aquisição, controlado por um programa escrito em linguagem C para ler e controlar e armazenar o fluxo de dados representando a intensidade luminosa em cada um dos 64 LDR, ambos desenvolvidos exclusivamente para esta pesquisa. Abaixo será descrito passo a passo o circuito da Figura II.1, incluindo a descrição dos componentes elétricos, como é realizada a escolha dos resistores de ganho (R_G) dos LDRs, (em função da iluminância em relação a profundidade do módulo) e como a captura é realizada passo a passo. Por fim a placa foi projetada em circuito impresso com o software ULTIBOARD 7 que como vantagem reduziu o tamanho da placa do protótipo do circuito eletrônico de 15x 18 cm para 10x10 cm (placa impressa).

A fonte se aplica ao circuito (Figura II.1) através do adaptador AC/DC de 9V que transforma a corrente alternada de 110V em corrente contínua de 9V. O diodo D1 serve para evitar danos caso o usuário inverta as conexões e portanto a corrente. O regulador

de tensão é um 78L05 que converte a tensão de alimentação (+9V) para +5V (VCC+). Esta mudança é necessária porque os +5V também são aplicados ao conversor analógico digital de 12 bits MAX186 (CAD), sendo que antes da alimentação, a tensão é filtrada com a resistência R1 e o condensador C1.

Toda a comunicação é efetuada através dos terminais Clock (CLK), DI (entrada de dados) e DO (saída de dados), (Figura II.2). O dado se aplica empregando uma serie de pulsos do relógio. Em primeiro lugar, para ordenar o começo da leitura de dados, uma linha CS (seção de chip) é ligada e desligada (linha CS, Figura II.2). Isto fornece o sinal para passagem de dados da linha DI, através da autorização no START. A partir deste ponto, o START da entrada DI indica que o dispositivo está pronto para ler as entradas SEL2, SEL1 e SEL0, que juntas determinam qual canal será lido, de acordo com a seqüência de bits. Assim se, por exemplo, os bits recebidos em SEL2, SEL1 e SEL0 forem todos zeros, o canal que será lido será o CH0. A relação entre os bits enviados e os canais correspondentes, que serão lidos, está de acordo com a Tabela II.2.

Os bits enviados para a entrada UNI/DIP e SCL/DIFF determinam qual a configuração da leitura. A primeira indica a maneira simples (lê cada um dos oito canais individualmente) ou diferencial (faz uma média de dois em dois canais). Para este circuito a leitura será sempre adotada como simples e portanto o bit enviado terá sempre valor=1, de acordo com a Tabela II.1 que mostra o significado do byte de controle aplicado ao MAX186 para configurar o funcionamento. Os bits enviados para a entrada SCL/DIFF configuram se a leitura deverá ser unipolar (tensão varia entre 0 e 5 V) ou bipolar (varia entre -5 e +5V). Para este circuito a leitura será unipolar e portanto o bit enviado será sempre 1, (SIMMONDS, 1997) como mostrado na Tabela II.1. Em seguida, ao ligar novamente o CS se verifica a conversão, num tempo de 10ms que será transmitida pela linha DO. Na Figura II.2 é mostrado o diagrama do processo.

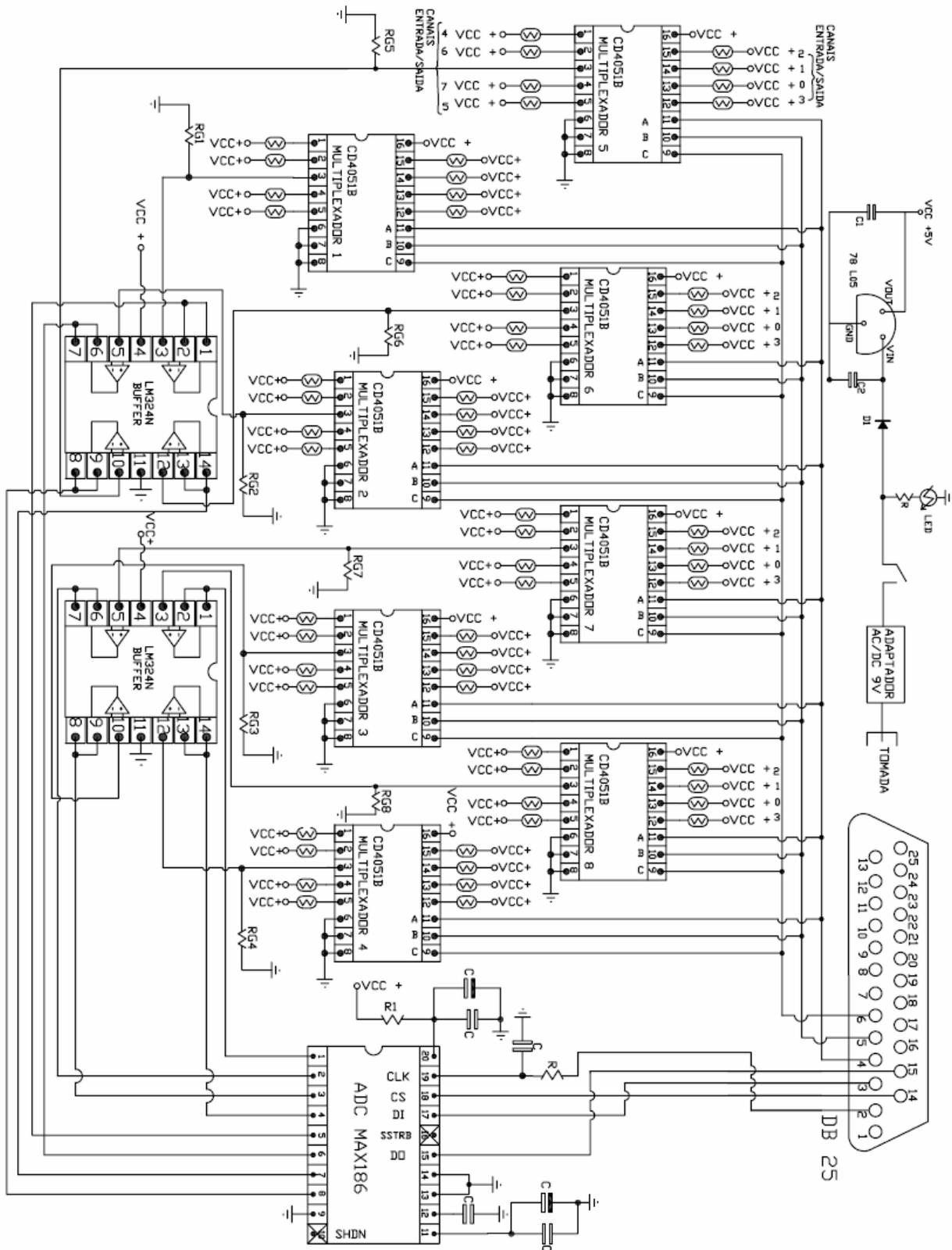


Figura II.1 - Desenho esquemático do circuito eletrônico.

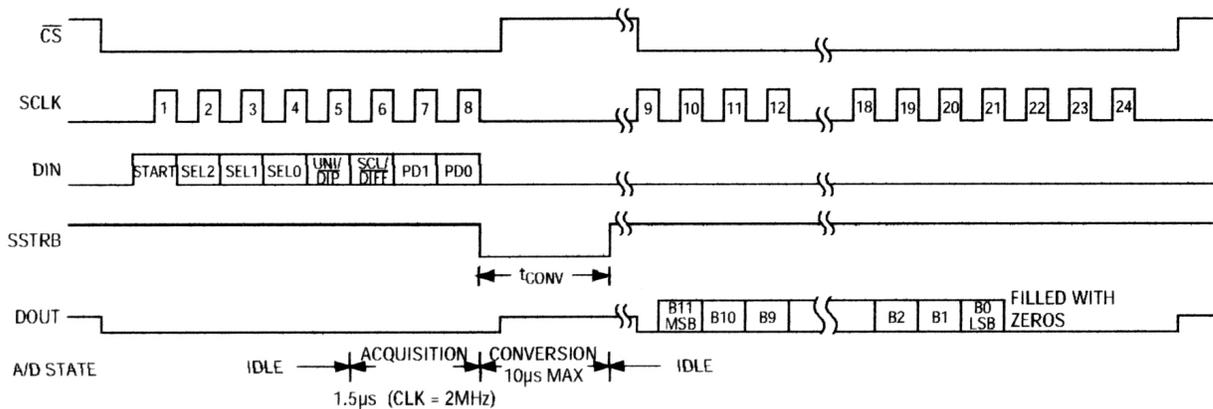


Figura II.2 - Escolha do Canal, como o conversor analógico digital escolhe o canal que será lido e faz a conversão dos dados que entraram. Fonte: datasheet da Maxim.

Tabela II.1 - Controle dos bits pelo MAX186, funcionamento das linhas CS, CLK, DIN e DOUT com os bits correspondentes. Esta tabela mostra o significado do byte de controle aplicado ao MAX186 para configurar o funcionamento. Fonte: datasheet da Maxim.

| BIT | NAME | DESCRICAO |
|---------|---------|--|
| 7(MSB) | START | O primeiro bit "1"depois do CS define o começo do controle de byte SEMPRE 1 |
| 6 | SEL2 | Estes tres bit indicam qual canal será lido, ver sequencia na tabela 2 |
| 5 | SEL1 | |
| 4 | SEL0 | |
| 3 | UNI/BIP | o BIT será 1 para unipolar , deste modo o sinal varia de 0V a VREF SEMPRE 1 |
| 2 | SGL/DIF | o BIT será 1 para simples, todos os canais são computados um a um SEMPRE 1 |
| 1 | PD1 | Seleciona o relógio PD1 PD0 Modo 0 0 0 pleno 0 1 1 rapido 1 0 0 relógio interno 1 1 1 relógio externo |
| 0 (LSB) | PD0 | |

Tabela II.2 - Seleção dos canais de entrada, combinação de bits que seleciona os canais de entrada que serão lidos pelo conversor analógico digital mostrando como se empregam os bits SEL2 SEL1 e SEL0, para selecionar os canais de entrada e os modo de saída simples.

Fonte: datasheet da Maxim.

| SEL2 | SEL1 | SEL0 | CH0 | CH1 | CH2 | CH3 | CH4 | CH5 | CH6 | CH7 |
|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 0 | 0 | + | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | | + | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | | | + | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | | | | + | | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | | | + | | | |
| 1 | 1 | 0 | | | | | | + | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | | + | |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | + |

O passo seguinte foi acoplar um operador amplificacional quádruplo, Figura II.3, para aumentar a impedância do sistema, ou seja, para que não houvesse perdas de sinal, canalizando melhor a energia. Com esta finalidade, foram utilizados dois componentes LM324N da Philips, alimentados por +5V no pino 4 e aterrados no pino 11. De acordo com a Figura II.3 é possível perceber que a entrada de dados se verifica pelas entradas 2 e 3, 5 e 6, 12 e 13 e 9 e 10. É importante considerar que a voltagem que entra está sendo mantida. As saídas de dados acontecem pelos canais 1, 7, 8 e 14, respectivamente, também denominados saídas 1, 2, 3 e 4.

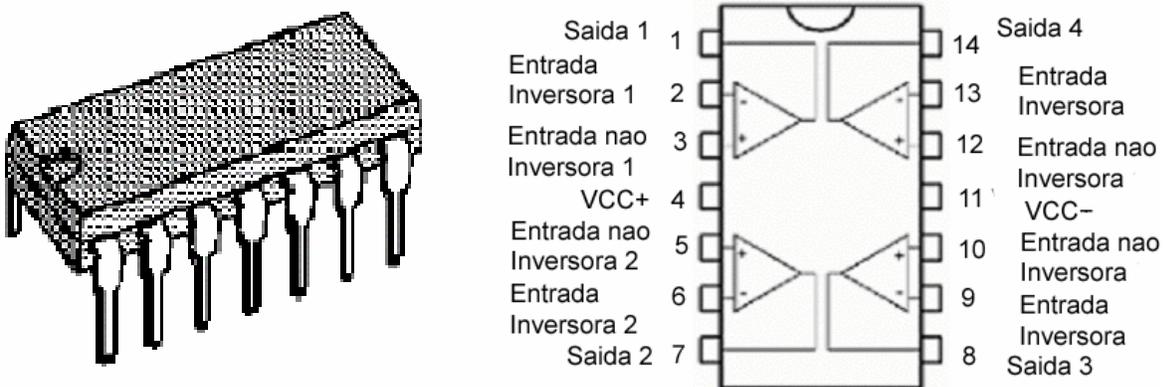


Figura II.3 - Operador amplificacional quádruplo (LM324N). Fonte: Datasheet LM324N <http://www.datasheetarchive.com/search.php?search=lm324n&sType=part>

Tabela II.3 - Transmissão de dados entre o operador amplificacional LM324N e o conversor analógico digital MAX186, de acordo com a montagem do circuito realizado

| CANAL MAX186 | SAIDA DO OPERADOR LM324n | |
|--------------|--------------------------|------------|
| | CH0 | OPERADOR 1 |
| CH1 | OPERADOR 1 | SAIDA 2 |
| CH2 | OPERADOR 1 | SAIDA 3 |
| CH3 | OPERADOR 1 | SAIDA 4 |
| CH4 | OPERADOR 2 | SAIDA 1 |
| CH5 | OPERADOR 2 | SAIDA 2 |
| CH6 | OPERADOR 2 | SAIDA 3 |
| CH7 | OPERADOR 2 | SAIDA 4 |

Aos dois operadores amplificacionais foram ligados a um total de oito multiplexadores CD4051B, Figura II.4 que permitem o uso de 64 canais. O CD4051B é um multiplexador de oito canais com três entradas binárias A, B e C que selecionam o

canal, de 1 a 8, que deverá ser lido. Todos estão ligados na porta paralela pelo conector DB25, nos canais 4, 5 e 6 respectivamente. A tabela de leitura de canais pode ser vista na Tabela II.4. é alimentado pela fonte pelo canal 16 e aterrado pelos canais 7 e 8. O canal INH (inibitor) é ligado ao canal 7 do conector DB25 e serve para permitir ou impedir a leitura dos canais, caso os bits enviados sejam 1,1,1. Os LDRs, que funcionam como resistores, se ligam, por um de seus terminais aos canais 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 do multiplexador. O outro terminal é ligado ao VCC+5.

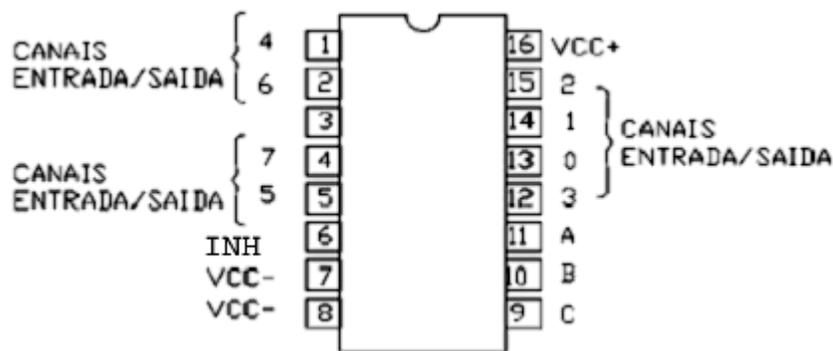


Figura II.4 - Multiplexador CD4051B. Fonte: Datasheet Texas Instruments

Tabela II.4 - Seleção dos canais de entrada pelo multiplexador CD4051B, combinação de bits que seleciona os canais de entrada que serão lidos pelo CD4051B.

Fonte: Datasheet Texas Instruments

| A | B | C | CH0 | CH1 | CH2 | CH3 | CH4 | CH5 | CH6 | CH7 |
|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 0 | 0 | + | | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | | + | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | + | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | + | | | | |
| 1 | 0 | 0 | | | | | + | | | |
| 1 | 0 | 1 | | | | | | + | | |
| 1 | 1 | 0 | | | | | | | + | |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | + |

Com um divisor de tensão é possível escolher a resistência do ganho, diferente para cada multiplexador, escolhida em função da faixa de voltagem que vai ser criada para cada LDR e que portanto muda com as diferentes incidências solares. Um divisor de tensão, Figura II.5, é constituído por duas resistências ligadas em série, a do LDR e uma RG (resistência do ganho), e é utilizado para obter tensões contínuas inferiores ao valor da tensão da fonte, que como dito é de 5V. A resistência do ganho, diferente para cada multiplexador, é escolhida em função da faixa de voltagem que vai ser criada para

cada LDR e que portanto muda com as diferentes incidências solares. Isto significa que todos os LDR que estiverem na primeira linha, ou seja logo abaixo da janela terão um divisor de tensão com uma determinada resistência de ganho, enquanto aqueles que estiverem mais distantes da abertura terão uma outra resistência de ganho. Assim a voltagem que será transmitida ($V_{leitura}$) pelos canais do multiplexador, aos amplificadores operacionais, será obtida pela equação **Error! Reference source not found.**:

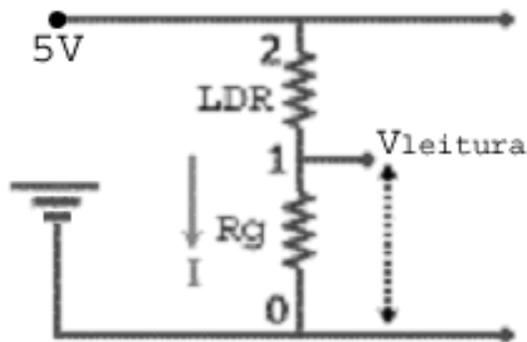


Figura II.5 - Divisor de Tensão

O princípio deste circuito, alimentado por uma fonte de 5V, é o mesmo que se aplica a um divisor de tensão. Utilizando-se dois resistores, um sendo variável (o LDR varia sua resistência de acordo com a luz incidente) e um fixo (R_G) é possível fazer a leitura da voltagem, no ponto 1 (Figura II.5), que será proporcional à variação do nível de luz no interior dos módulos, de acordo com a equação **Error! Reference source not found.**

A resistência do LDR varia em função da incidência de luz, quanto maior o nível, maior a resistência gerada e vice-versa. Assim sendo é importante perceber que o posicionamento do sensor no módulo (nível de profundidade do sensor) também influencia sua resposta. O valor estimado da resistência R_G será aquela que representa as condições de iluminação em lux esperadas para cada uma das 16 posições onde os LDR estão afixados. As iluminâncias esperadas em cada um dos pontos foram deduzidas das medições feitas com luxímetro MINOLTA no período de novembro e dezembro (Figura II.6), acordo com estes valores foram escolhidas as resistências R_{G1} a R_{G8} (Tabela II.5). Se a iluminância estimada, for próxima da medida

experimentalmente, o valor V_{leitura} deve ficar em torno de 2,5 V. Caso a iluminância esteja numa faixa diferente daquela estimada, pelo fato da resistência do LDR ser proporcional a incidência de luz, a voltagem lida será menor que 2,5V. Se a incidência de luz for menor que o esperado, então a resistência do LDR diminui e a leitura tende a 5V. Se a faixa de iluminação estimada for muito diferente daquela medida o sensor pode saturar, então a voltagem lida será 0V ou 5V. Nota-se então que a condição melhor para as medições se verifica se $R_G = R_{\text{LDR}}$.

Tabela II.5 - Valores das resistências de ganho (R_G) do circuito

| | | | |
|-----|------|-----------|---------------------------|
| RG5 | MUX5 | 1,2kohms | Maro verm verm ouro preto |
| RG6 | MUX6 | 1,64kohms | Marro verd verm our |
| RG7 | MUX7 | 1,82kohms | Marro cinz verm our |
| RG8 | MUX8 | 2,2kohms | Verm verm ouro preto |
| RG1 | MUX1 | 271ohms | Verm viol marrom our |
| RG2 | MUX2 | 680ohms | Azul cinza marrom our |
| RG3 | MUX3 | 830ohms | Cinza marro verm cinza |
| RG4 | MUX4 | 1kohms | Marro pret verm our |

Na Figura II., um esquema lógico do circuito mostra os 64 LDRs ligados a 8 multiplexadores, portanto a cada multiplexador estão ligados 8 LDRs. A ordem de leitura dada pelo computador é a que prepara a leitura de cada canal dos multiplexadores. Em seguida o conversor analógico digital MAX186 escolhe qual multiplexador será lido. A leitura de todos os LDRs leva em média dois segundos. Como para cada multiplexador tem uma resistência R_G acoplada, isto significa que 8 LDRs estarão ligados num divisor de tensão com o mesmo R_G . Por este motivo os LDRs ligados ao mesmo multiplexador são enfileirados, ou seja aqueles LDRs ligados ao multiplexador 1 estarão localizados, na primeira e na segunda fileira de cada módulo.

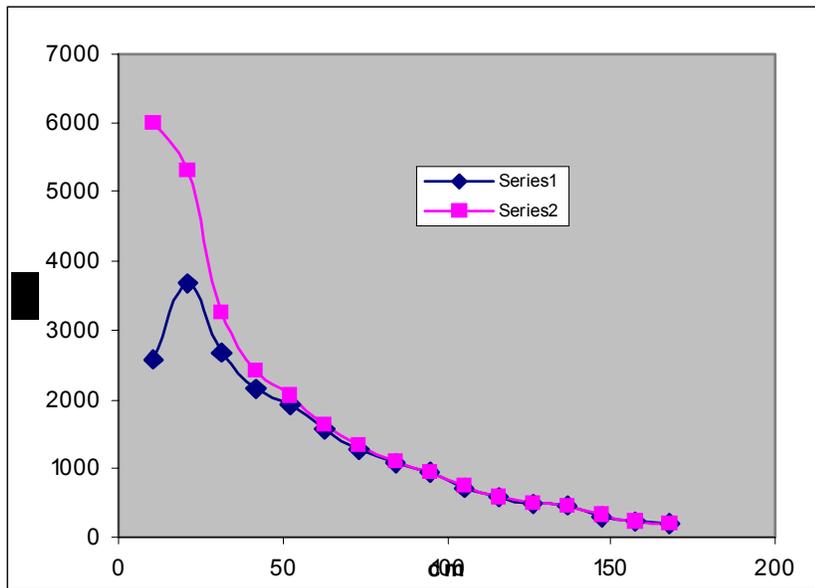


Figura II.6 - Valores médios da iluminação obtida no interior do modelo. As medições foram realizadas nos meses de Novembro a Fevereiro. A curva azul mostra a média dos valores medidos com o luxímetro. A curva rosa mostra a correção em função do co-seno.

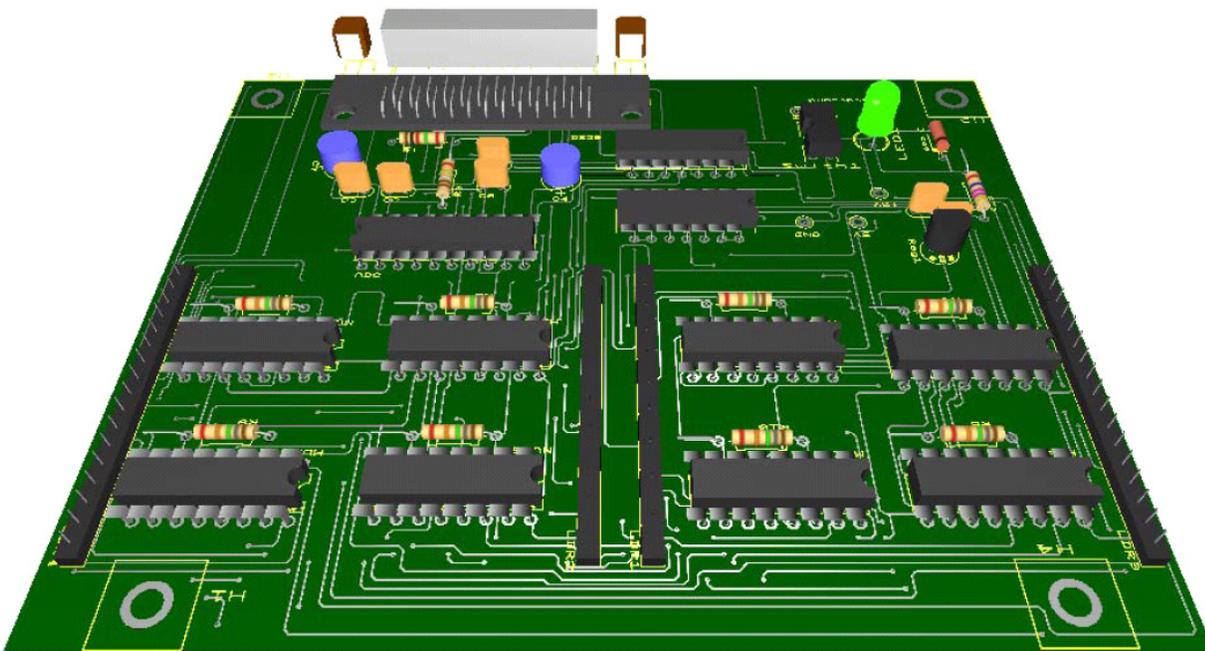


Figura II.7 - Circuito Eletrônico, renderização com utilização do software UTIBOARD

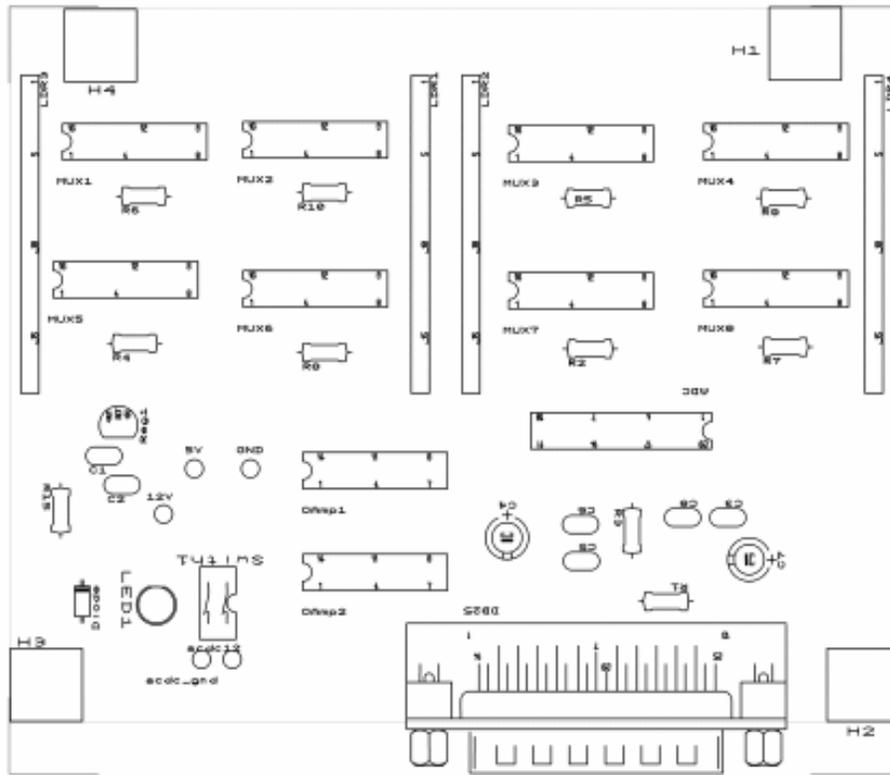


Figura II.8 - Posicionamento dos componentes eletrônicos, vista superior.

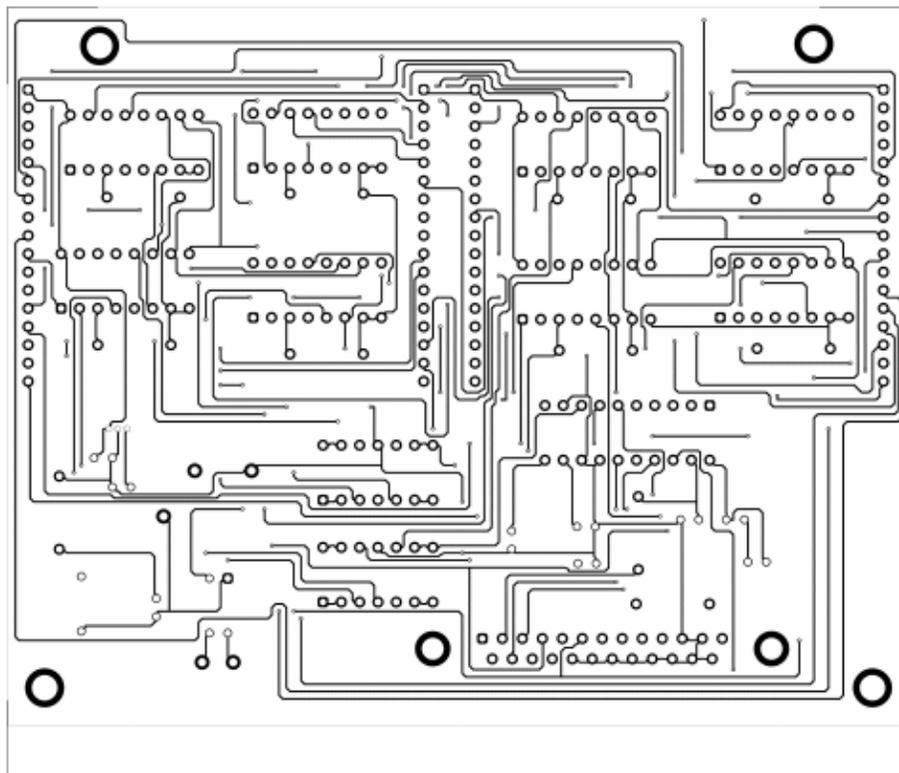


Figura II.9 - Posicionamento dos componentes eletrônicos, vista inferior.

Programa de Aquisição

```
/*=====*/
/* Programa em C para adquirir valores de tensão do LDR      */
/* Antonio Neves                                           */
/* Data 30/10/2004                                         */
/*=====*/
```

```
#include <conio.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>
#include <pc.h>
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
```

```
#define TIMEDELAY 50
```

```
void InitPrinterPort(int LPTNo,int LPTPortAdd,int *error);
void FindPCSpeed();
int ReadADC(int Modulo,int Sensor,int *error);
int ReadLux(int ChanMode,int Channel,int *error);
void Wait(int j);
void WriteAllDOP(int DOValue,int *error);
```

```
int LPTData,LPTStatus,LPTControl;
unsigned char DataReg,StatusReg,ControlReg;
int gSpeed;
```

```
int main();
```

```
int main () {
    unsigned sleep(unsigned seconds);

    struct tm *local, t_ini;
    time_t t,start,stop,t1,t0,t2,t3;
    double elapsed;
    int x,y,horas,minutos,segundos,h,m,s,horasf,minutosf,segundosf;
    long int second;

    int i,j,jl,k,media,Err;
    int ch;
    double valor;
```

```

double Sensor[16][4];
FILE* fp;

FindPCSpeed(); /*Determina a Velocidade do PC*/
media=5; /*Define a quantidade de medicoes para efetuar a media*/
InitPrinterPort(1,0,&Err); /*Inicializa a porta da Impressora */

clrscr();
printf("\nSistema de Aquisicao de Dados\n");

time(&t);
local = localtime(&t);
time(&start);
t_ini = *localtime(&start);

h = local->tm_hour;
m = local->tm_min;
s = local->tm_sec;

printf("Sao %d:%d:%d HH:MM:SS\n", h,m,s);

/*Inicio das Medicoes as 8:00hs horario de Bsb */
t_ini.tm_hour = 8;
t_ini.tm_min = 0;
t_ini.tm_sec = 0;

/*Intervalo das Medicoes de 10 em 10 minutos*/
x=10*60;

printf("\nAguardando a hora de inicio...");
start = mktime(&t_ini);

/*Fim das Medicoes as 18:00hs horario de Bsb */
t_ini.tm_hour = 18;
t_ini.tm_min = 1;
t_ini.tm_sec = 0;

stop = mktime(&t_ini);

while( start > (t2=time(NULL)) ) {
sleep(1);
printf(".");
};

y=0;
do {

```

```

y++;

for(i=1;i<=16;i++) /*Para cada sensor*/
{
    for(k=1;k<=4;k++) /*de cada canaleta*/
    {
        valor=0;
        for(j=1;j<=media;j++)
        {
            valor += ReadLux(k, i,&Err);
            delay(500);
        }
        Sensor[i-1][k-1] = (float) valor/media;
    }
}
local = localtime(&t2);
h = local->tm_hour;
m = local->tm_min;
s = local->tm_sec;

/*Grava os Dados*/
fp = fopen("Dados.dat","w");
fprintf(fp, "%d:%d:%d\t",h,m,s);
for(k=1;k<=4;k++) /*Para cada canaleta*/
{
    fprintf(fp, "\t%d",k);
    for(i=1;i<=16;i++) /*Para cada sensor*/
    {
        fprintf(fp, "\t%.3f",Sensor[i-1][k-1]);
    }
}
fprintf(fp, "\n");
fclose(fp);

printf("\n medida %d realizada",y);
sleep(x);
} while ( stop > (t2=time(NULL)) );

local = localtime(&t2);
h = local->tm_hour;
m = local->tm_min;
s = local->tm_sec;

printf("\n\nSao %d:%d:%d HH:MM:SS\n", h,m,s);

exit(0);

```

```

}

/*=====*/
/
/* Esta rotina determina a velocidade do PC tal que os atrasos podem
   calculados para a leitura do CAD
*/
void FindPCSpeed()
{
clock_t start,end;
float diff,timedelay;
long int i,j;
printf("Calculating Speed of PC\n");
j=1000000;
do {
start=clock();
for (i=0;i<j;i++) ;
end=clock();
diff=(float)((end-start)/CLK_TCK);
if (diff<0.2)j=j*10;
} while(diff<0.2);
j=(long int)((float)j*2.0/diff);
start=clock();
for (i=0;i<j;i++) ;
end=clock();
diff=(float)((end-start)/CLK_TCK);
timedelay=diff/(float)i;
if (timedelay<0.000002) {
gSpeed=0.000002/timedelay+1;
}
else {
gSpeed=1;
}
printf("\n PC's timedelay=%10.8fuSec gspeed=%d\n",timedelay,gSpeed);
delay(2000);
}
/*=====*/
/
/* A funcao ReadADC le o valor do CAD MAX 186
* Se ChanMode=0 entao a leitura eh diferencial
* e o canal pode ser de 1 a 4.
* Channel 1=ADC entradas 1 & 2
* Channel 2=ADC entradas 3 & 4
* Channel 3=ADC entradas 5 & 6
* Channel 4=ADC entradas 7 & 8
* Se ChanMode=1 entao a leitura eh do tipo single ended

```

```

*      Channel pode ser de 1 a 8 onde a entrada tem o mesmo numro do canal
* Se ChanMode ou Channel estiver fora destes limites *error eh retornado com um valor nao
nulo
*/
int ReadADC(int ChanMode,int Channel,int *error)
{
int i,Word,Mask;
char Bit;
    *error=0;
    ControlReg&=0xfd;
    outportb(LPTControl,ControlReg); /* CS High */
    outportb(LPTData,DataReg|0x00); /* SCLK Low, DIN Low */
    switch(ChanMode) {
        case 1: if(Channel<0 || Channel>8) *error=1;
                break;
        case 0: if(Channel<0 || Channel>4) *error=1;
                break;
        default: *error=1;
                break;
    }
    Channel--;
    Word=0;
    if (ChanMode==1) { /* Single Ended */
        if (Channel & 0x01) Word=Word|0x04;
        if (Channel & 0x02) Word=Word|0x01;
        if (Channel & 0x04) Word=Word|0x02;
    }
    else {
        Word=Channel;
    }
    Word=Word<<4;
    ChanMode<<=2;
    Word=Word | ChanMode;
    Word=Word | 0x8a;

    ControlReg=ControlReg | 0x02;
    outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* SCLK Low, DIN Low */
    Wait(gSpeed*10);
    outportb(LPTControl,ControlReg); /* Bring CS Low */
    Wait(gSpeed*10);
    Mask=0x80;
    for(i=0;i<8;i++) { /* send the control word */
        Bit=Word & Mask;
        if(Bit) {
            outportb(LPTData,DataReg | 0x02); /* CS Low SCLK Low, DIN High */
            Wait(gSpeed);
        }
    }
}

```

```

        outportb(LPTData,DataReg | 0x03); /* CS Low SCLK High, DIN High */
        Wait(gSpeed);
    }
    else {
        outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* CS Low SCLK Low, DIN Low */
        Wait(gSpeed);
        outportb(LPTData,DataReg | 0x01); /* CS Low SCLK High, DIN Low */
        Wait(gSpeed);
    }
    Mask>>=1;
}
outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* CS Low SCLK Low, DIN Low */
Wait(20*gSpeed);
Word=0;
for(i=0;i<12;i++) {
    Word<<=1;
    outportb(LPTData,DataReg | 0x01); /* Bring Clk High */
    Wait(gSpeed);
    outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* Bring Clk Low */
    Wait(gSpeed);
    Bit=inportb(LPTStatus); /* read ADC's Data Out */
    Bit &=0x08;
    if(Bit) Word|=0x01;
}
ControlReg=ControlReg & 0xfd;
outportb(LPTControl,ControlReg); /* Bring CS High */
return(Word);
}
/*=====*/
/
/* Esta funcao faz a leitura do sistem
*/
int ReadLux(int Modulo,int Sensor,int *error)
{
int i,Word,Mask,ChanMode,inc,sens,Channel;
char Bit;
    *error=0;
    ControlReg&=0xfd;
    ChanMode=1;
    static unsigned char Mux[8]={0x00,0x04,0x08,0x0C,0x10,0x14,0x18,0x1C};

    switch(Sensor)
    {
        case 1:
            Channel=5;
            DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];

```

```
break;
case 2:
    Channel=5;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
break;
case 3:
    Channel=6;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];
break;
case 4:
    Channel=6;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
break;
case 5:
    Channel=3;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];
break;
case 6:
    Channel=3;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
break;
case 7:
    Channel=4;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];
break;
case 8:
    Channel=4;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
break;
case 9:
    Channel=8;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];
break;
case 10:
    Channel=8;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
break;
case 11:
    Channel=7;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];
break;
case 12:
    Channel=7;
    DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
break;
case 13:
```

```

        Channel=2;
        DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];
    break;
    case 14:
        Channel=2;
        DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
    break;
    case 15:
        Channel=1;
        DataReg = Mux[2*(Modulo-1)];
    break;
    case 16:
        Channel=1;
        DataReg = Mux[2*(Modulo-1)+1];
    break;
    default:
        printf("opção inválida\n");
}

outportb(LPTControl,ControlReg); /* CS High */
outportb(LPTData,DataReg|0x00); /* SCLK Low, DIN Low */
switch(ChanMode) {
    case 1: if(Channel<0 || Channel>8) *error=1;
            break;
    case 0: if(Channel<0 || Channel>4) *error=1;
            break;
    default: *error=1;
            break;
}
Channel--;
Word=0;
if (ChanMode==1) { /* Single Ended */
    if (Channel & 0x01) Word=Word|0x04;
    if (Channel & 0x02) Word=Word|0x01;
    if (Channel & 0x04) Word=Word|0x02;
}
else {
    Word=Channel;
}
Word=Word<<4;
ChanMode<<=2;
Word=Word | ChanMode;
Word=Word | 0x8a;

ControlReg=ControlReg | 0x02;
outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* SCLK Low, DIN Low */

```

```

Wait(gSpeed*10);
outportb(LPTControl,ControlReg); /* Bring CS Low */
Wait(gSpeed*10);
Mask=0x80;
for(i=0;i<8;i++) { /* send the control word */
    Bit=Word & Mask;
    if(Bit) {
        outportb(LPTData,DataReg | 0x02); /* CS Low SCLK Low, DIN High */
        Wait(gSpeed);
        outportb(LPTData,DataReg | 0x03); /* CS Low SCLK High, DIN High */
        Wait(gSpeed);
    }
    else {
        outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* CS Low SCLK Low, DIN Low */
        Wait(gSpeed);
        outportb(LPTData,DataReg | 0x01); /* CS Low SCLK High, DIN Low */
        Wait(gSpeed);
    }
    Mask>>=1;
}
outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* CS Low SCLK Low, DIN Low */
Wait(20*gSpeed);
Word=0;
for(i=0;i<12;i++) {
    Word<<=1;
    outportb(LPTData,DataReg | 0x01); /* Bring Clk High */
    Wait(gSpeed);
    outportb(LPTData,DataReg | 0x00); /* Bring Clk Low */
    Wait(gSpeed);
    Bit=inportb(LPTStatus); /* read ADC's Data Out */
    Bit &=0x08;
    if((Bit) Word|=0x01;
}
ControlReg=ControlReg & 0xfd;
outportb(LPTControl,ControlReg); /* Bring CS High */
return(Word);
}
/*=====*/
/
void Wait(int j)
{
int i,k;
    for(i=0;i<j;i++) k=k+1;
}
/*=====*/
/

```

```

/* A funcao InitPrinterPort inicializa a porta da impressora
* "LPTNo" eh o numero da porta, 1, 2, ou 3
* "LPTPortAdd" se for nao nulo LPTNo eh ignorado
* LPTPortAdd eh o endereco de base
* Se "LPTNo" estiver fora do intervalo a variavel"*error" torna-se nao nula.
*/
void InitPrinterPort(int LPTNo,int LPTPortAdd,int *error)
{
    *error=0;
    if(!LPTPortAdd)
        switch(LPTNo) {
            case 1: LPTData=0x378;
                    break;
            case 2: LPTData=0x278;
                    break;
            default: *error=1;
                    break;
        }
    else LPTData=LPTPortAdd;
    if(!(*error)) {
        LPTStatus=LPTData+1;
        LPTControl=LPTData+2;
        DataReg=0;
        WriteAllDOP(0,error);
        ControlReg=0x0b; /* Strobe baixo Autofd alto */
        outportb(LPTControl,ControlReg);
    }
}
/*=====*/
/
/* A funcao WriteAllDOP seta as quatro saidas digitais
* de acordo com o valor "DOValue"
* DOValue pode ter valores de 0 a 15
* Caso esteja fora de intervalo a variavel
* "*error" torna-se nao nula.
*/
void WriteAllDOP(int DOValue,int *error)
{
    *error=0;
    if(DOValue<0 || DOValue>15) *error=1;
    if(!(*error)) {
        DataReg=DOValue;
        outportb(LPTData,DataReg);
        ControlReg &= 0xfe; /* bring strobe low then high */
        outportb(LPTControl,ControlReg);
        ControlReg |= 0x01;
    }
}

```

```
        outportb(LPTControl,ControlReg);  
    }  
}
```