UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# INFLUÊNCIA DA LUZ NATURAL REFLETIDA PELO ENTORNO NA ILUMINAÇÃO DE EDIFÍCIOS NO TRÓPICO ÚMIDO

IURI ÁVILA LINS DE ARAÚJO

Maceió
2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO

DISSERTAÇÃO

# INFLUÊNCIA DA LUZ NATURAL REFLETIDA PELO ENTORNO NA ILUMINAÇÃO DE EDIFÍCIOS NO TRÓPICO ÚMIDO

APRESENTADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ARQUITETRA E URBANISMO

Iuri Ávila Lins de Araújo

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús

BANCA EXAMINADORA

| | | |
|---|---|---|
| Presidente: | Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús | _____ |
| Examinadores: | Prof. Dr. Flávio Antonio Miranda de Souza | _____ |
| | Prof. Dr. Leonardo Salazar Bittencourt | _____ |
| | Prof. Dr. Maurício Roriz | _____ |

Maceió
2006

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. Ricardo Carvalho Cabús, que orientou este trabalho com competência e compreensão, indispensáveis para os resultados alcançados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos, que possibilitou o desenvolvimento desta dissertação.

À Comissão Examinadora e ao prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, pelas contribuições ao aprimoramento da dissertação.

Aos colegas de mestrado pelo apoio e amizade.

**SUMÁRIO**

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO ..... 1

1.1 Objetivos ..... 2

1.1.1 Objetivo geral ..... 2

1.1.2 Objetivos específicos ..... 2

1.2 Estrutura da dissertação ..... 3

2 REVISÃO DE LITERATURA ..... 5

2.1 A luz ..... 5

2.1.1 A reflexão da luz ..... 6

2.1.2 Fontes de luz e iluminação ..... 12

2.1.3 Fotometria ..... 14

2.2 A visão ..... 19

2.2.1 Visão e iluminação ..... 20

2.3 A luz natural ..... 23

2.3.1 Fontes de luz natural ..... 24

2.3.2 Luz natural e clima ..... 25

2.3.3 O Sol ..... 26

2.3.4 O céu ..... 30

2.3.5 Maceió: sol e céu ..... 38

2.4 Determinação da iluminação ..... 47

2.4.1 O entorno ..... 53

2.4.2 Iluminação natural nos trópicos ..... 61
2.5 Conclusão ..... 74
3 METODOLOGIA ..... 76
3.1 O programa ..... 76
3.2 A sala de referência ..... 77
3.3 Modelos de entorno ..... 80
3.4 Simulações ..... 84
4 RESULTADOS E ANÁLISES ..... 88
5 CONCLUSÕES ..... 105
5.1 Conclusões e objetivos específicos ..... 105
5.2 Conclusões e objetivo geral ..... 106
5.3 Limitações do Trabalho ..... 107
5.4 Sugestões para trabalhos futuros ..... 108
6 REFERÊNCIAS ..... 109
APÊNDICE A

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1-Intervalo do Espectro Eletromagnético que forma a luz visível. Adaptado de Silva (1977). ..... 6

Figura 2-2 - Comportamento da luz ao incidir em uma superfície. ..... 7

Figura 2-3 – Comportamento de uma superfície cinza e de uma seletiva de cor vermelha. ..... 8

Figura 2-4 - Leis fundamentais da reflexão. ..... 8

Figura 2-5 – reflexão regular e irregular. Efeito da textura sobre a reflexão da luz. ..... 9

Figura 2-6 - Classificação dos tipos de reflexão baseada no ângulo de dispersão. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998). ..... 10

Figura 2-7 - Reflexão perfeitamente difusa. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998) (LAM, 1986). ..... 10

Figura 2-8 – Tipos de reflexão. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998). ..... 11

Figura 2-9 - Casos particulares de reflexão. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998). ..... 11

Figura 2-10 – Forma das fontes e feixes de luz. ..... 13

Figura 2-11 – Espelho refletindo iluminação direcional e difusa. Fonte (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998). ..... 13

Figura 2-12 – Ângulo sólido. ..... 15

Figura 2-13– Lei dos Quadrados Inversos. ..... 16

Figura 2-14 – Lei do Cosseno. ..... 17

Figura 2-15 – Lei do Cosseno e área aparente. ..... 18

Figura 2-16 – Indicação da posição do Sol na abóbada celeste através dos ângulos de altura (at) e azimute solar (as). Processo de projeção estereográfica para criação da Carta Solar. ..... 27

Figura 2-17 – Carta Solar para latitude 0°. Fonte: Figura gerada pelo programa TropSolar V 2.0 (CABÚS, 2005). ..... 28

Figura 2-18 – Gráfico da Equação do Tempo, mostrando os seus valores para todo o ano. Fonte TropSolar V 2.0 (CABÚS, 2005)..... 29

Figura 2-19 - Relação entre altura solar, latitude e massa de ar óptica (m). .. 29

Figura 2-20 – Iluminância solar direta em Maceió-AL. Observa-se o alto nível de contraste. Fonte Ricardo Cabús..... 30

Figura 2-21 – Distribuição de luminâncias um céu claro em Estocolmo, 2 de outubro de 1953, hora solar: 14h25m – 14h50m, hora de Estocolmo: 14h00m-14h25m. A posição do Sol é indicada pela letra S. Unidade de luminância: blondel (0,27 cd/m²). Adaptado de Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975). ..... 32

Figura 2-22 – Céu claro em Maceió-AL. Fotografia tirada com lente "olho de peixe" apontada para o zênite. Fonte Ricardo Cabús..... 33

Figura 2-23 – Distribuição de luminâncias de um céu encoberto em Estocolmo, sem nuvens individuais nem manchas brilhantes, 10 de outubro de 1953, hora solar: 9h55m-10h15m, hora de Estocolmo: 9h30m-9h50m. A posição do Sol é indicada pela letra S. Unidade de luminância blondel (0,27 cd/m²). Adaptado de Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975)..... 34

Figura 2-24 – Céu encoberto em Maceió-AL. Fonte Ricardo Cabús..... 34

Figura 2-25 – Exemplos de céus parcialmente nublados em Maceió-AL. A fotografia foi tirada com lente olho de peixe apontando para o zênite. Fonte (CABÚS, 2002)..... 35

Figura 2-26 – Nuvens cúmulos na cidade de Maceió-AL. Fonte Ricardo Cabús..... 35

Figura 2-27 – Ângulos utilizados para designar um ponto no céu em relação ao zênite e a posição do Sol: azc é o azimute do elemento de céu, atc é o ângulo de altura do elemento, Z é a distância angular entre o elemento e o zênite, Zs é a distância angular entre o sol e o zênite (complementar da altura solar) e $\chi$ é a menor distância angular entre o elemento de céu e o Sol. Adaptado de (CIE, 1999). ..... 37

Figura 2-28 – Céu número 13 da CIE (céu claro). A abóbada celeste é representada dividida em 145 partes em projeção equidistante. Maceió, 16/08/2001, 15h30m, a letra S representa a posição do Sol. Fonte (CABÚS, 2002)..... 37

Figura 2-29 – Maceió – AL: Foto de satélite entre 36°O e 35°O, e 9°30'S e 10°S, indicando a localização da cidade na costa do Estado de Alagoas. Fonte (IBGE, 2005)..... 39

Figura 2-30– Maceió – AL. Fonte (GAZETAWEB, 2006) e Ricardo Cabús. ..... 39

Figura 2-31 – Carta Solar de Maceió (9°40' de latitude Sul). Fonte: Figura gerada pelo TropSolar v. 0.2 (CABÚS, 2005). ..... 40

Figura 2-32 – Média de horas de insolação por mês para Maceió. Fonte (CABÚS, 2002)..... 41

Figura 2-33 – Nebulosidades mensais para Maceió. A linha representa a nebulosidade média. Fonte (CABÚS, 2002)..... 42

Figura 2-34 – Nebulosidades horárias para Maceió. A linha representa a nebulosidade média. Fonte (CABÚS, 2002)..... 43

Figura 2-35 – Probabilidade de ocorrência de céu encoberto, parcialmente nublado e claro, em Maceió-AL. Fonte (CABÚS, 2002). ..... 44

Figura 2-36– Probabilidade horária de ocorrência de tipos de céu. Fonte (CABÚS, 2002)..... 45

Figura 2-37 – Probabilidade mensal de ocorrência do tipo de céu. Fonte (CABÚS, 2002)..... 46

Figura 2-38 – Céu 10 da CIE (parcialmente nublado). Projeção eqüidistante da abóbada celeste, dividida em 145 partes. Maceió, 16/08/2001, 15h30m, a letra S representa a posição do Sol. Fonte (CABÚS, 2002)..... 47

Figura 2-39 – Princípio do Ângulo Sólido Projetado..... 48

Figura 2-40 – Medidor de ângulos horizontais e verticais feito por projeção estereográfica. Figura gerada pelo programa Tropsolar v. 2.0 (CABÚS, 2005). ..... 49

Figura 2-41 – Traçado da Máscara de Obstrução. A sobreposição da máscara à Carta Solar indica o período do dia e do ano em que o Sol será visível pelo ponto e através da abertura..... 49

Figura 2-42 - Ângulo Vertical de Céu Visível (AVC) e Ângulo vertical de obstrução (AVO). ..... 50

Figura 2-43 – Linha de obstrução (a) e Linha de obstrução equivalente (b). Fonte (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). ..... 51

Figura 2-44 – Componentes de iluminação natural. Fonte (ABNT, 1999). ... 53

Figura 2-45 Fotos da cidade de Hong Kong utilizando uma lente "olho de peixe" apontada para o zênite. Fonte (NG, 2002). ..... 54

Figura 2-46 – Indicadores de Alturas Admissíveis utilizado pelo governo britânico para estudo de edifícios adjacentes, no tocante à obstrução do céu. Fonte (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). ..... 56

Figura 2-47 - Comparação entre arranjos de blocos com mesma área construída. Os arranjos "a" e "c" são menos favoráveis. Fonte (STEVENS, 1969) 57

Figura 2-48 – Configurações espaciais mais comuns na malha urbana: cânion urbano (a); cruzamento de ruas (b) e espaços abertos (c). Fotos com lente "olho de peixe" apontada para o zênite. Fonte (ELIASSON, 2000). ..... 58

Figura 2-49 – Cânion Urbano em Maceió. Fonte Ricardo Cabús. ..... 58

Figura 2-50 - Cidade de Hong Kong. Fonte (NG, 2002). ..... 59

Figura 2-51 – Primas de Sol para limitação de volumetrias em Toronto, Canadá. Fonte (BROWN; DEKAY, 2004). ..... 60

Figura 2-52 – Prismas de iluminação. Estudo de zoneamento de Nova York de 1916 e edifício Look, na mesma cidade, em 1949, Emery Roth & Sons. Fonte (BROWN; DEKAY, 2004). ..... 60

Figura 2-53 – Rua coberta no Cairo, Egito. Fonte (FATHY, 1986). ..... 64

Figura 2-54 – Vista aérea da cidade de Marrakeche, no Marrocos. Os pátios aparecem em grande quantidade e as ruas mal podem ser notadas. Fonte (FATHY, 1986). ..... 64

Figura 2-55 – Pátio interno em uma residência no Cairo, Egito. Fonte (FATHY, 1986). 65

Figura 2-56 – Relação entre tipo de céu, entorno e iluminação natural: "A" céu claro, "B" céu encoberto e "C" céu parcialmente nublado. Adaptado de (BAKER, FANCHIOTTI, STEEMERS, 1998) e (LAM, 1986). ..... 65

Figura 2-57 – Fotografia da cidade de Hong Kong, feita com lente "olho de peixe". Fonte (NG, 2005). ..... 68

Figura 2-58 – Demonstração do princípio da refletividade média. Ao se projetar em um ponto, as diferentes luminâncias do campo visual do ponto considerado se fundem em uma luminância média. ..... 68

Figura 2-59 – Tela do programa Troplux. Fonte (CABÚS, 2006). ..... 70

Figura 2-60 – Gráfico da função de iluminação horizontal difusa, por altura solar. Fonte: imagem gerada pelo programa TropLux V. 2.13 (CABÚS, 2006). ..... 72

Figura 2-61 - Gráfico da função de iluminância solar normal, por horário do dia, para o padrão de céu 10 da CIE (parcialmente nublado) na localização de Maceió – AL, no dia 22 de dezembro. Fonte: imagem gerada pelo programa TropLux V. 2.13 (CABÚS, 2006). ..... 73

Figura 3-1 - Tela do programa TropLux V 2.13 (CABÚS, 2006). ..... 77

Figura 3-2 – Sala de referência mostrada em planta baixa, corte longitudinal e em perspectiva isométrica externa e interna, mostrando ainda o plano de trabalho considerado no presente estudo. ..... 78

Figura 3-3 – Propriedades do vidro da janela da sala de referência. Fonte: imagem gerada pelo programa TropLux V 2.13 (CABÚS, 2006). ..... 79

Figura 3-4 – Modelos de cânion utilizados nas simulações. Na figura é mostrada a posição da sala de referência. A figura mostra ainda o Ângulo Vertical de Obstrução (AVO) de cada cânion, em relação a um ponto no peitoril da janela da sala de referência. ..... 81

Figura 3-5 - Máscara de Obstrução dos modelos adotados. ..... 83

Figura 3-6 - Máscara de Obstrução e fatores de céu para as diferentes alturas, nos modelos 1, 2 e 3. ..... 83

Figura 3-7 – Protetores solares utilizados na janela da sala de referência para as duas orientações analisadas – leste e sul. A Máscara de Obstrução indica que a proteção abrange o período entre 8h00m e 18h00m, durante o ano inteiro. ..... 85

Figura 3-8 - Fatores de céu do Modelo-1. ..... 86

Figura 3-9 - Fatores de céu do Modelo-2. ..... 86

Figura 3-10 - Fatores de céu do Modelo-3. ..... 87

Gráfico 1 - Comparando os modelos 0, 1, 2 e 3, para janela sul, no dia 22 de março. ..... 89

Gráfico 2 - Comparando os modelos 1, 2 e 3, para janela sul, no dia 22 de dezembro..... 90

Gráfico 3 - Comparando os modelos 1 e 2, com alturas 20m e 60m, para janela sul, no dia 22 de junho. ..... 92

Gráfico 4 - Comparando os modelos 1 e 2, com altura 20m e 60m, para janela sul e leste, no dia 22 de dezembro ..... 92

Gráfico 5 - Comparando as alturas 10m, 20m, 40m e 60m, para janela leste e sul, no dia 22 de março. A figura também mostra a projeção de sombra numa seção dos cânions, para três horários e duas orientações. ..... 95

Gráfico 6 - Comparando as alturas 10m, 20m, 40m e 60m, para janela leste e sul, no dia 22 de junho. A figura também mostra a projeção de sombra numa seção dos cânions, para três horários e duas orientações. ..... 96

Gráfico 7 - Comparando as alturas 10m, 20m, 40m e 60m, para janela leste e sul, no dia 22 de dezembro. A figura também mostra a projeção de sombra numa seção dos cânions, para três horários e duas orientações. ..... 97

Gráfico 8 - Comparando os cânions 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3, para janela leste. ..... 99

Gráfico 9 - Comparando os cânions 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3, para janela sul. ..... 100

Gráfico 10 - Comparando as contribuições do sol refletido e da Componente de Céu, para janela leste, no dia 22 março. ..... 102

Gráfico 11 - Comparando a contribuição do sol refletido e da Componente de Céu, para janela sul, no dia 22 de março ..... 103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Iluminâncias por classe de tarefa visual. Fonte NBR-5413 (ABNT, 1992). ..... 22

Tabela 2 – Tabela com 15 modelos de céu da CIE. Fonte (CABÚS, 2002)..... 38

Tabela 3 – Parâmetros da IES para cálculo da Iluminância Horizontal Difusa. Fonte IES (1984)... 71

## RESUMO

A construção do espaço urbano é uma atividade de grande impacto sobre a disponibilidade de luz natural. O desenho urbano pode conduzir a cidade a um maior aproveitamento da luz natural pelas edificações. Por outro lado as condições climáticas influenciam a disponibilidade dessa luz, devendo ser levadas em consideração pelos instrumentos normativos que condicionam o desenho da cidade. No trópico úmido, as proteções solares utilizadas para sombrear as aberturas podem reduzir consideravelmente o fator de céu, que tem sido o principal parâmetro para controlar a influência do entorno construído na iluminação natural. Esse efeito pode ser compensado pela disponibilidade considerável de luz refletida. O presente trabalho tem por objetivo analisar a influência do entorno construído e da luz refletida para a iluminação natural de edificações no trópico úmido, avaliando a eficácia do parâmetro fator de céu, a influência da orientação da abertura e a contribuição percentual da luz refletida pelo entorno. A metodologia adotada consiste em um estudo comparativo de diferentes modelos de entorno, através de simulações computacionais com o programa TropLux. As simulações adotaram a localização da cidade de Maceió-AL e o céu parcialmente nublado. Os resultados mostraram uma grande contribuição da luz refletida para a iluminação das edificações. O uso do parâmetro fator de céu para estimar o desempenho dos modelos mostrou-se mais eficaz quando utilizado em conjunto com a orientação da abertura. A partir dos resultados concluiu-se que uma abordagem mais adequada ao trópico úmido, para a definição de instrumentos normativos, deve dar atenção especial às refletâncias do entorno e à orientação das aberturas. Espera-se com isso contribuir para formar diretrizes de desenho urbano que orientem projetistas e planejadores no desenvolvimento de modelos urbanos que propiciem um aproveitamento adequado da luz natural no trópico úmido.

**PALAVRAS-CHAVE:** iluminação natural; espaço urbano; simulação computacional; TropLux.

## ABSTRACT

The development of the urban space has a great impact on daylight availability. Urban design can improve the use of daylight in buildings. Climatic conditions influence the availability of daylight considerably and should be taken into account by Urban Codes. In the humid tropic, the sky factor may decrease due to the use of the solar protection. That has been the main parameter to control the influence of obstructions on daylighting of buildings. This loss can be compensated by the considerable availability of reflect light. The present work aims to analyse the influence of the reflect light on luminous performance of buildings in the humid tropic. It was evaluated the efficacy of the sky factor parameter, the influence of opening orientation and the contribution of the reflect light on ground and obstructions. The methodology is a comparative study for different urban space models by computer simulation with TropLux. The simulations were done for Maceió-AL with partly cloudy sky. Results showed a great contribution of the reflect light for tropical daylighting. The use of sky factor parameter showed more effective when used together with opening orientation. More appropriate approach for Daylighting Code in the humid tropic should pay more attention to reflected light on the ground and obstructions as well as to opening orientation. This work aims to contribute in some way to create urban design guidelines that help designers and planners to develop urban models that allow a proper use of daylight in the humid tropic.

**KEYWORDS:** daylighting; urban space; computer simulation; TropLux.

# 1 INTRODUÇÃO

A iluminação natural provém de três fontes: o Sol, o céu e o entorno. No meio urbano, entre essas fontes, o entorno construído é a única feita pelo homem. A construção do espaço urbano é a atividade humana de maior impacto sobre a disponibilidade de luz natural para as edificações, podendo ampliar ou prejudicar o seu aproveitamento.

O desenho urbano é a ferramenta que pode conduzir o espaço da cidade a um maior aproveitamento da luz natural nas edificações, no entanto, ele também envolve questões de uso do solo, adensamento e valorização. Cabe ao poder público promover ações que regulem os padrões urbanos, a fim de garantir a disponibilidade de luz natural e também de ampliá-la, contribuindo assim, para a redução do consumo de luz artificial e para a sustentabilidade das construções.

Os principais métodos utilizados para atingir este objetivo, baseiam-se no Fator de Céu, como parâmetro de desempenho luminoso. Esse fator relaciona a obstrução da visão do céu às iluminâncias. Combinado ao Fator de Luz Diurna-FLD, ele tem servido de referência para o controle da disponibilidade da luz natural no meio urbano.

As condições climáticas locais influenciam consideravelmente a disponibilidade de luz natural. Os instrumentos normativos que controlam a construção no espaço urbano para o aproveitamento da luz natural devem ser adequados a essas condições.

No trópico úmido, a necessidade de sombreamento combina-se às de iluminação, sob céus parcialmente nublados e intensa radiação, direta e difusa. As proteções solares podem reduzir consideravelmente o Fator de Céu das aberturas, o que representa uma perda de desempenho luminoso. No entanto, isto pode ser compensado pela quantidade significativa de radiação difusa e direta incidindo no entorno e tornando-o uma fonte de luz considerável.

A abordagem utilizada no desenvolvimento dos instrumentos normativos comumente usados para o controle da iluminação natural no meio urbano, que se baseia em Fator de Céu, combinado ou não ao FLD, não menciona o uso de

proteções solares nas aberturas, nem a sua orientação, tipo de céu e refletâncias do entorno, limitando-se aos ângulos de obstrução e dando pouca atenção à luz refletida, particularmente à luz do Sol. Provavelmente, isto se deve ao fato de ter se baseado, sobretudo, em estudos para regiões temperadas, onde predomina os céus encobertos.

## 1.1 Objetivos

A análise das condições do trópico úmido sugere que a luz refletida pelo entorno tem um papel significativo para a iluminação natural. Ela está relacionada às refletâncias do entorno e ao total de radiação incidente. A luz do Sol refletida pelo entorno oferece um potencial luminoso que deve ser considerado, sugerindo que a orientação da abertura e das obstruções pode ser um parâmetro importante na definição de modelos urbanos.

Assim sendo, a adoção do Fator de Céu, associado ou não ao FLD, como único parâmetro considerado na definição dos instrumentos que regulam a edificação, parece ser insuficiente para o trópico úmido, por não considerar a orientação, as proteções solares e a luz refletida.

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo analisar a influência do entorno construído e da luz refletida para a iluminação natural de edificações no trópico úmido.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o uso do Fator de Céu, enquanto parâmetro único, para a definição de modelos urbanos adequados ao aproveitamento da luz natural no meio urbano, no trópico úmido.
- Avaliar a importância do uso da orientação da abertura e das obstruções, enquanto parâmetro adicional, para a definição de modelos urbanos

adequados ao aproveitamento da luz natural no meio urbano, no trópico úmido.

- Avaliar a contribuição da luz do Sol e do céu, refletida pelo entorno, para a iluminação das edificações no meio urbano, no trópico úmido.
- Contribuir para formar diretrizes de desenho urbano que orientem projetistas e planejadores no desenvolvimento de modelos urbanos que propiciem um maior aproveitamento da luz natural no trópico úmido.

## 1.2 Estrutura da dissertação

Nesta primeira seção, foi desenvolvida uma apresentação geral do tema proposto. Seguindo-se à relação dos objetivos e à estrutura do trabalho.

A segunda seção traz uma revisão de literatura sobre os pontos mais relevantes para compreensão do tema proposto e da abordagem adotada no trabalho. A revisão de literatura foi subdividida em quatro partes. Primeiro tratou da análise da luz e seu comportamento, com ênfase no fenômeno da reflexão luminosa. Apresentou ainda os principais conceitos da fotometria, que se ocupa da quantificação da luz. A segunda parte trata da relação entre a iluminação e o conforto humano, apresentando parâmetros usados para avaliar essa relação. A terceira parte comenta o potencial da luz natural para proporcionar conforto visual nas edificações, analisa as fontes da luz natural, relacionando-as com o clima. Também descreve as condições de luz natural em Maceió, cidade escolhida como exemplo de trópico úmido para a presente investigação. A quarta parte trata do entorno como fonte de luz natural, apresenta os métodos mais comuns para regular a sua disponibilidade no meio urbano e discute sua aplicação nas condições tropicais.

A terceira seção relata os procedimentos metodológicos para proceder à investigação proposta. A metodologia consiste em um estudo comparativo, que faz uso de simulações computacionais para comparar diferentes modelos de entorno. Descreve-se o programa utilizado, a definição dos modelos adotados e os parâmetros para as simulações.

A quarta seção analisa os resultados obtidos na etapa anterior, descrevendo modelos de análise e comparando os resultados dos diferentes modelos, para a compreensão das questões propostas.

A quinta e última seção finaliza o trabalho, relacionando as principais conclusões e analisando sua aplicabilidade no atendimento dos objetivos propostos. Em seguida comentam-se as principais limitações do trabalho e sugere-se trabalhos futuros relacionados aos resultados alcançados. A seguir lista-se as referências bibliográficas e apresenta-se o Apêndice A.

# 2 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção traz uma revisão da literatura sobre iluminação natural, mais especificamente sobre os pontos relevantes para a compreensão do problema abordado e desenvolvimento da investigação proposta.

Inicialmente, buscou-se definir a luz e entender seu comportamento e tratamento, com ênfase no fenômeno da reflexão luminosa. Em seguida, a seção aborda a visão humana em sua relação com a iluminação, buscando definir o conforto luminoso e entender seus parâmetros. A terceira parte trata da iluminação natural, mostrando suas vantagens e seu potencial para proporcionar conforto nas edificações, com ênfase no estudo de suas fontes. Também descreve as condições de luz natural em Maceió, cidade escolhida como amostra de trópico úmido para a presente investigação. A quarta e última parte desta revisão de literatura trata do entorno como fonte de luz natural, apresenta os métodos mais comuns para regular a sua disponibilidade no meio urbano e discute sua aplicação nas condições tropicais.

## 2.1 A luz

Esta subseção apresenta um estudo da luz e seu comportamento, com ênfase na reflexão luminosa, buscando compreender alguns conceitos básicos, sem os quais, a análise dos fenômenos relacionados à luz torna-se difícil.

A luz é uma radiação que corresponde ao intervalo do espectro eletromagnético entre os comprimentos de onda ($\lambda$) 380 nm e 780 nm (SILVA, 1977). Ela é de grande importância para o ser humano porque pode ser sentida pelo olho. O olho também tem a capacidade de distinguir comprimentos de onda intermediários do intervalo, que são percebidos como as cores básicas. A Figura 2-1 mostra o intervalo do espectro eletromagnético que corresponde à luz em suas diferentes cores.

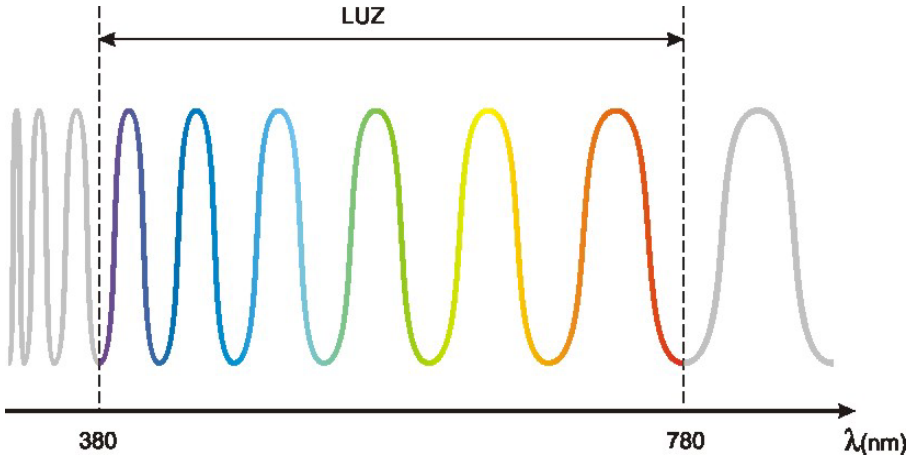



**Figura 2-1-Intervalo do Espectro Eletromagnético que forma a luz visível. Adaptado de Silva (1977).**

A óptica geométrica estuda a luz a partir da trajetória de seus raios e define as leis básicas que regem o seu comportamento:

- Nos meios transparentes e homogêneos, a luz move-se em linha reta;
- Seus raios são independentes entre si;
- Sua trajetória independe do sentido.

### 2.1.1 A reflexão da luz

A luz incide sobre as superfícies e as características da superfície e da luz interagem para gerar os fenômenos luminosos. Ao incidir em uma superfície, a luz pode ser refletida, absorvida ou transmitida, assim como acontece com as outras radiações. Ver Figura 2-2.

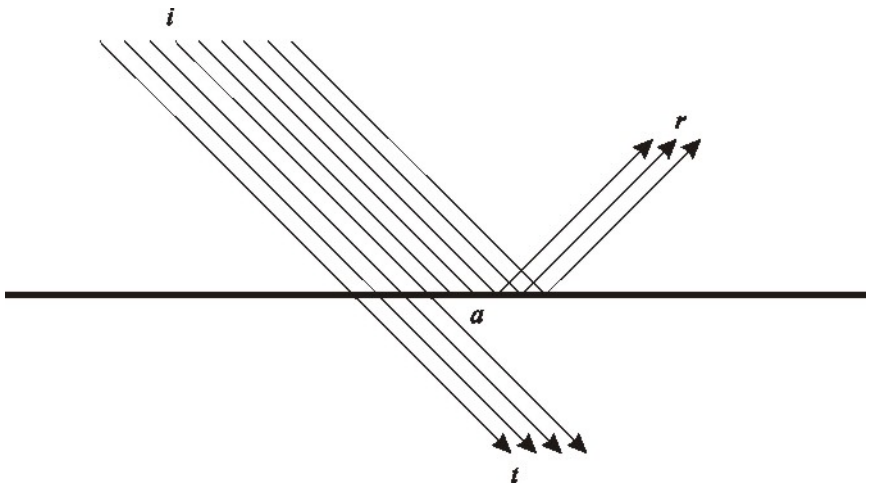



**Figura 2-2 - Comportamento da luz ao incidir em uma superfície.**

A relação entre quanto da luz incidente será refletida, absorvida e transmitida varia de acordo com as propriedades ópticas do material que forma a superfície, mas a soma dessas quantidades é sempre igual à luz incidente.

$$r + a + t = i \qquad (1)$$

Onde $i$ é o raio incidente, $r$, $a$ e $t$ são respectivamente as parcelas refletidas, absorvidas e transmitidas.

A refletância de uma superfície é definida pelo seu coeficiente de reflexão ($\rho$), obtido através da expressão.

$$\rho = r / i \qquad (2)$$

Pelo mesmo processo, encontram-se os coeficientes de absorção e transmissão. A soma dos coeficientes será sempre igual a um. Apenas o coeficiente de transmissão pode assumir valor nulo e isso ocorrerá nos materiais opacos. Os outros dois coeficientes sempre estarão presentes em quaisquer superfícies, pois toda matéria reflete e absorve luz. Cada material tem seus coeficientes, que são específicos para os diferentes comprimentos de onda da luz e das outras radiações.

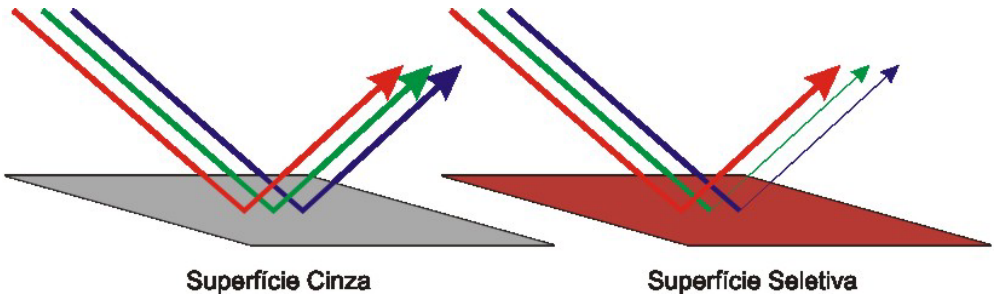



**Figura 2-3 – Comportamento de uma superfície cinza e de uma seletiva de cor vermelha.**

Algumas superfícies apresentam coeficientes de reflexão semelhantes para as diferentes cores do espectro e são chamadas de cinza, não apresentando cor. O preto e o branco são também considerados superfícies cinza. As superfícies que apresentam cor são chamadas seletivas e possuem diferentes coeficientes para as diferentes cores. A Figura 2-3 exemplifica as diferenças.

A energia luminosa absorvida converte-se em calor, aumentando a temperatura. Isso quer dizer que luz em excesso significa ganhos de calor. A luz geralmente está combinada com radiações não visíveis, que se absorvidas, também geram calor.

A reflexão da luz segue duas leis fundamentais:

O raio de luz incidente (*ri*), o raio refletido (*rr*) e a reta normal (*n*) da superfície no ponto de incidência são coplanares, como mostrado na Figura 2-4;

O ângulo de incidência ($\theta$) e o ângulo de reflexão ($\theta'$) são iguais. Esses ângulos são medidos a partir da normal no ponto de incidência. Ver Figura 2-4.

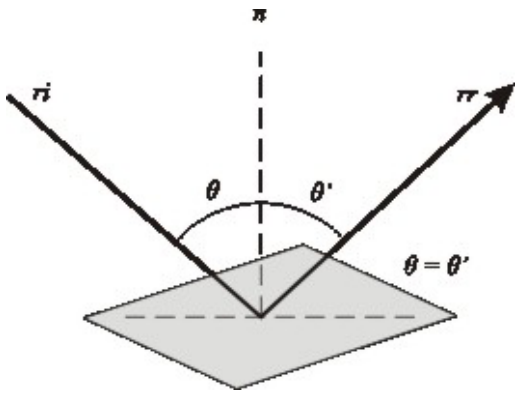



**Figura 2-4 - Leis fundamentais da reflexão.**

Esta expressão se aplica a uma reflexão ideal ou perfeitamente especular, onde os raios refletidos têm a mesma direção, que é simétrica à direção dos raios incidentes com relação à normal da superfície, no ponto de incidência. A intensidade do raio refletido está relacionada ao coeficiente de reflexão da superfície.

Embora o processo de reflexão da luz seja regido pelas leis fundamentais, a textura da superfície gera toda uma variedade de tipos de reflexão. A Figura 2-5 mostra como uma superfície aparentemente plana pode gerar reflexões irregulares devido a mínimas imperfeições.

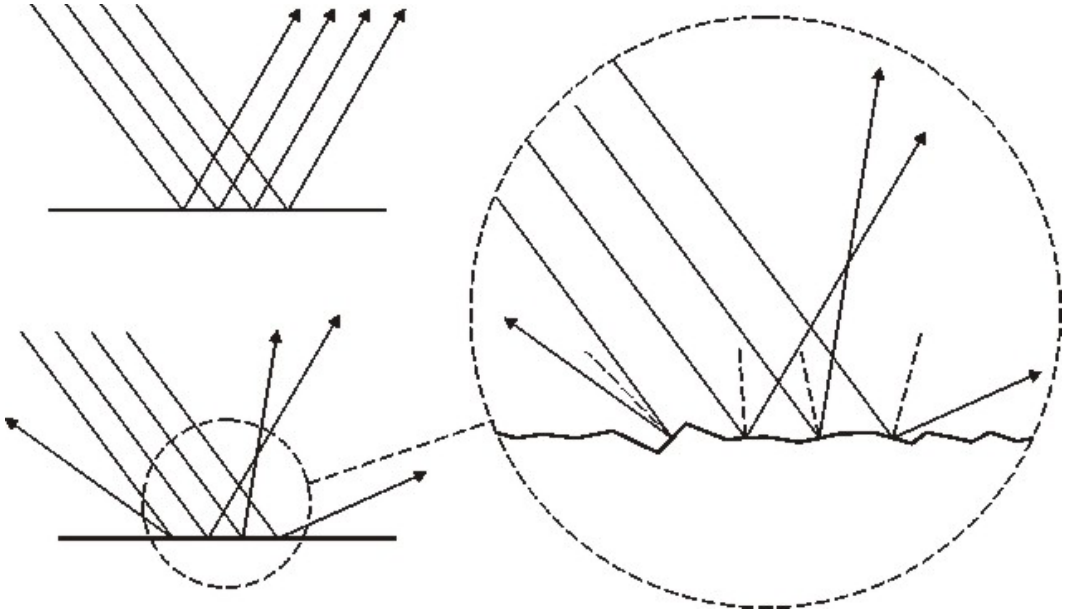


**Figura 2-5 – reflexão regular e irregular. Efeito da textura sobre a reflexão da luz.**

De maneira geral, essas imperfeições refletem os raios de luz em direções diferentes, com maior ou menor dispersão dos raios, podendo refletir desde um feixe estreito de luz, na direção do ângulo de reflexão, até um espalhamento luminoso sem direção definida. Baker, Fanchiotti e Steemers (1998) sugerem uma classificação das reflexões baseada no ângulo de dispersão dos raios refletidos, como mostrado na Figura 2-6.

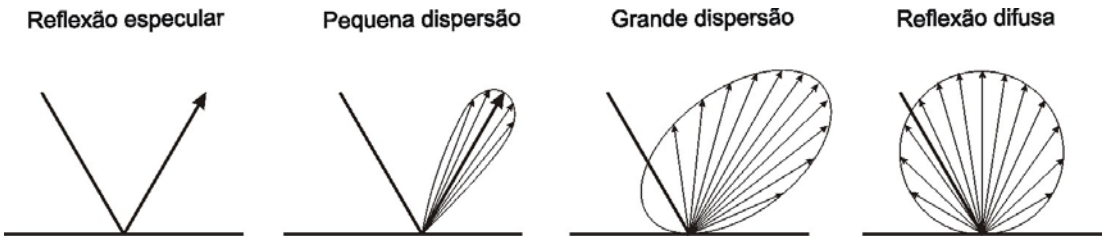



**Figura 2-6 - Classificação dos tipos de reflexão baseada no ângulo de dispersão. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).**

Uma superfície difusora ideal que apresente uma reflexão de dispersão uniforme em todas as direções é denominada *lambertiniana* ou perfeitamente difusa.

Numa tal superfície, a reflexão não tem direção definida, independe do ângulo de incidência e pode ser tratada pela seguinte expressão:

$$rr = r\,i\ /\ \pi \qquad (3)$$

Onde *rr* é um dos raios refletidos e *ri* é um estreito feixe de raios incidentes. A Figura 2-7 representa uma reflexão perfeitamente difusa.

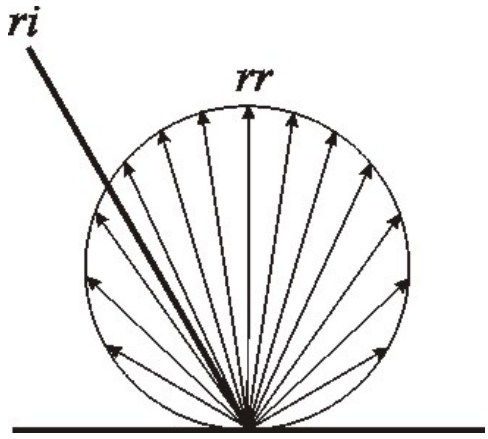



**Figura 2-7 - Reflexão perfeitamente difusa. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998) (LAM, 1986).**

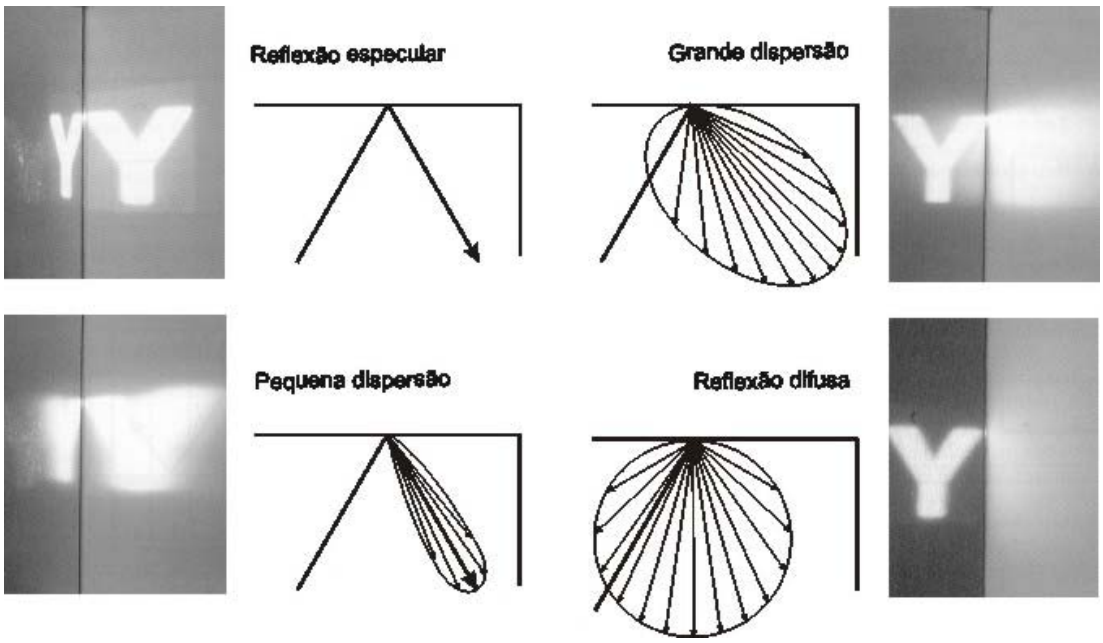



**Figura 2-8 – Tipos de reflexão. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).**

Na natureza, nenhuma superfície apresenta uma reflexão especular perfeita e nem uma reflexão perfeitamente difusa. Todas as superfícies têm reflexão mista e combinam as duas formas em proporções diferentes. Existem apenas casos que se aproximam muito das condições ideais, como um espelho ou uma folha de papel, e são tratadas nos cálculos de iluminação como perfeitas. A Figura 2-8 exemplifica diferentes tipos de reflexão.

Existem ainda casos particulares, como aqueles onde as reflexões especular e difusa não aparecem combinadas, mas completamente independentes, ou quando a superfície refletora apresenta reflexão especular, mas não é plana, entre outras. Ver Figura 2-9.

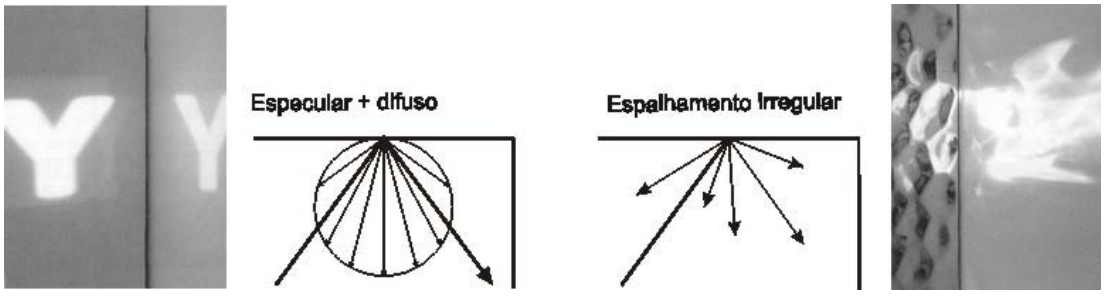



**Figura 2-9 - Casos particulares de reflexão. Adaptado de (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).**

Embora seja bastante complexo, é de fundamental importância entender o fenômeno da reflexão para avaliar e planejar a iluminação. O tipo de iluminação incidente sobre uma superfície refletora também determina diferentes características da luz refletida. As características da luz incidente estão relacionadas à fonte luminosa.

### 2.1.2 Fontes de luz e iluminação

Os corpos que têm a propriedade de emitir luz são denominados de fontes luminosas, dividindo-se em pontuais e extensas. As fontes emitem luz praticamente em todas as direções e essa emissão varia com a direção, podendo ainda ser direcionada por dispositivos como refletores e luminárias. A direção da luz pode ser mais ou menos definida e servir para classificar a iluminação em direcional ou difusa. Sob uma iluminação difusa as áreas iluminadas e as sombras projetadas apresentam contornos suaves, que parecem se dissolver, enquanto sob uma iluminação direcional, esses contornos são nítidos e rígidos.

Designa-se por iluminação escalar ($E_s$) a razão entre o fluxo luminoso recebido por uma pequena esfera e a área de sua superfície.

Ligando dois pontos diametralmente opostos na superfície da esfera, que representem a maior diferença de fluxo incidente, ou seja, o maior contraste, define-se o vetor iluminação ($\Delta E_{max}$).

A razão entre essas duas grandezas ($\Delta E_{max}$ / $E_s$), chamada de razão vetor/escalar, dá a medida da direcionalidade da iluminação. Quando assume valores altos, tem-se uma iluminação mais direcional e com valores baixos, uma iluminação mais difusa (LINES, 1968).

As fontes de luz podem apresentar feixes paralelos, divergentes, convergentes, ou sem direção definida. Isso está relacionado com as dimensões e distâncias envolvidas. Ver Figura 2-10. As fontes pontuais são aquelas cujas dimensões são desprezíveis diante da distância que as separa do plano de projeção da luz. De maneira aproximada, quando a maior dimensão da fonte for igual ou menor que 1/5 da distância, ela poderá ser tratada como uma fonte pontual, ou seja, uma fonte de luz cuja área é desprezível (CABÚS, 2002).

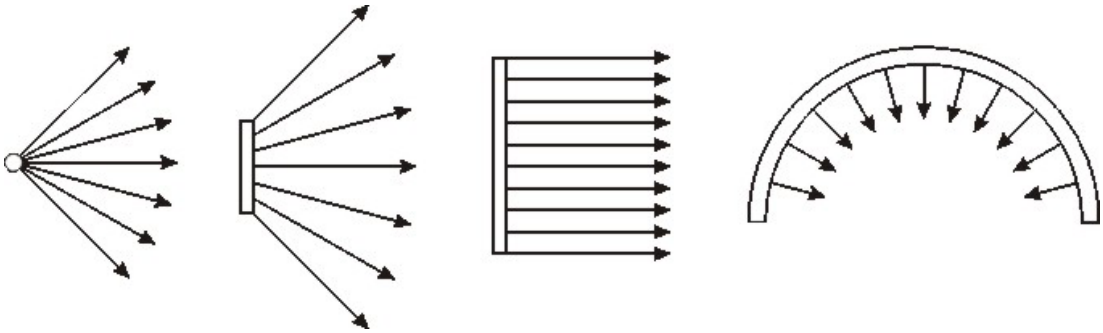


**Figura 2-10 – Forma das fontes e feixes de luz.**

A reflexão especular faz com que o feixe de luz refletido tenha as mesmas características direcionais do feixe incidente, é por isso que as imagens são perfeitamente refletidas por um espelho. Essa propriedade independe do coeficiente de reflexão, sendo determinada apenas pela forma da reflexão. A Figura 2-11 exemplifica isso através da reflexão de um espelho.

A reflexão difusa pode fazer com que uma iluminação direcional se converta em difusa por conta da dispersão luminosa, ver Figura 2-7.

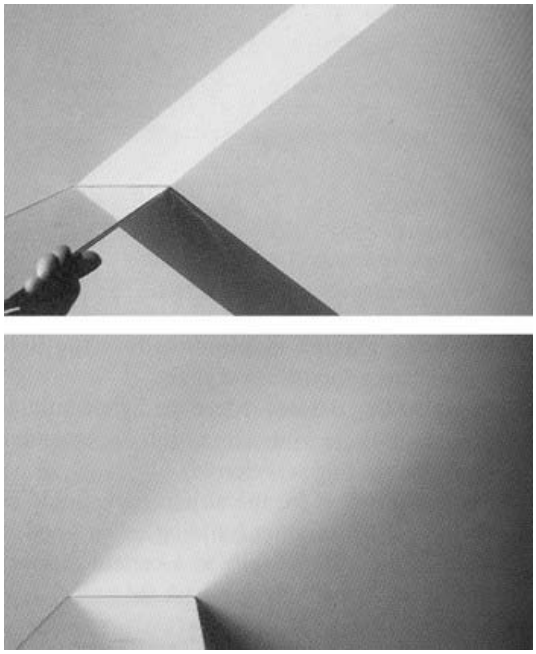


**Figura 2-11 – Espelho refletindo iluminação direcional e difusa. Fonte (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).**

Estes conceitos básicos podem ajudar a entender muitos dos fenômenos relacionados à luz. Para uma compreensão mais completa, é necessário entender os conceitos técnicos usados no tratamento desses fenômenos.

### 2.1.3 Fotometria

O tratamento da luz exige o seu dimensionamento. A fotometria é a ciência que mede a luz, definindo as grandezas utilizadas para analisá-la quantitativamente: fluxo luminoso ($\Phi$), intensidade luminosa ($I$), iluminância ($E$) e luminância ($L$). Essas grandezas, no Sistema Internacional, utilizam as seguintes unidades respectivamente: Lumen (lm), Candela (cd), lux (lx) e Candela por metro quadrado (cd/m²).

Luz é energia radiante. A quantidade de radiação emitida por uma fonte, por unidade de tempo define a potência da fonte ou seu fluxo radiante, que é medido em Watts (W). A parte do fluxo composta por luz define o fluxo luminoso da mesma fonte, que é medido em Lumens (lm) (CORBELA; YANNAS, 2003).

A razão entre o fluxo luminoso e o fluxo radiante total é chamada de eficácia luminosa, que é medida em Lumens por Watt (lm/W). Ela é importante para avaliar os ganhos de calor proporcionados pela luz.

O fluxo luminoso de uma fonte não se distribui uniformemente em todas as direções. Contido em um ângulo sólido, cujo eixo coincide com a direção do fluxo, determina a intensidade luminosa ($I$) da fonte na referida direção, que é medida em candela por metro quadrado (cd/m²). A intensidade é expressa pelo fluxo luminoso e pelo ângulo sólido (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).

$$I = \Phi \, \acute{\omega} \qquad (4)$$

Onde $I$ é a intensidade luminosa em Candela (cd), $\Phi$ é o fluxo luminoso em Lumen (lm) e $\acute{\omega}$ é o ângulo sólido em esteradiano (sr),

O ângulo sólido é um elemento geométrico que relaciona área e distância através da expressão:

$$\acute{\omega} = A / D^2 \qquad (5)$$

Onde $\acute{\omega}$ é o ângulo sólido em esteradiano (sr), $A$ é a área da projeção em metro quadrado (m²) e $D$ é a menor distância, em metros (m), entre o vértice e o plano de projeção. Ver Figura 2-12.

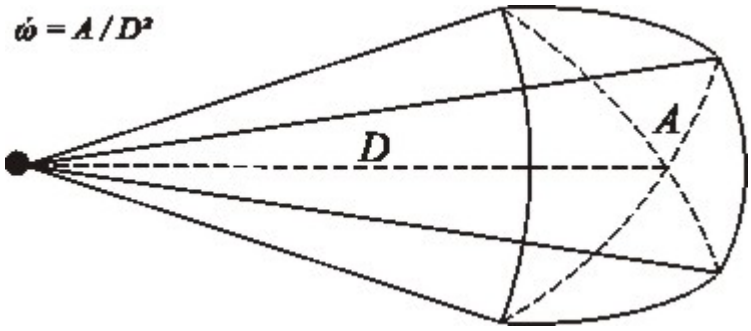



**Figura 2-12 – Ângulo sólido.**

O fluxo luminoso incidente por unidade de área define a iluminância ($E$) numa superfície e é medida em lux (lx). A iluminância relaciona-se com o fluxo luminoso incidente pela expressão (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975):

$$E = \Phi / A \qquad (6)$$

Onde $E$ é a iluminância em lux (lx), $\Phi$ é o fluxo luminoso em Lumens (lm), $A$ é a área de incidência em metro quadrado (m²).

Combinando as definições de iluminância e de fluxo luminoso teremos:

$$E = \Phi / A = I\,\acute{\omega} / A = I / D^2 \qquad (7)$$

Onde $E$ é iluminância em lux (lx), $I$ é a intensidade luminosa em Candela (cd), $\acute{\omega}$ é o ângulo sólido em esteradiano (sr), $A$ é a área de incidência em metro quadrado (m²), $D$ é a distância em metros (m). Isso significa que a iluminância em um ponto é diretamente proporcional à intensidade luminosa da fonte e inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte ao plano de projeção. Essa relação é

denominada Lei do Inverso dos Quadrados (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Ver Figura 2-13.

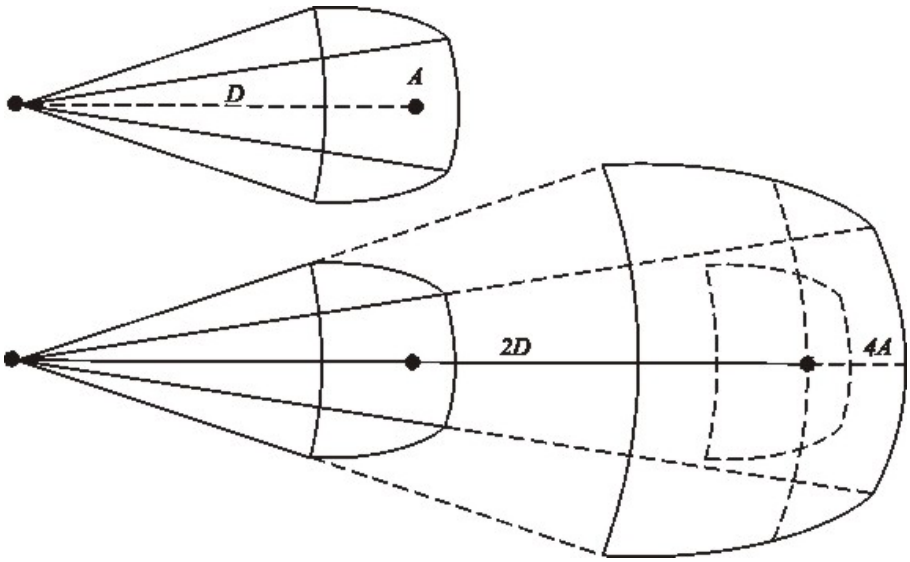



**Figura 2-13– Lei dos Quadrados Inversos.**

Se a normal do plano de projeção e a normal à fonte luminosa não coincidem, a luz se distribui em uma área maior, reduzindo a iluminância na proporção do cosseno do ângulo de incidência ($\theta$). Esta relação é denominada Lei do Cosseno (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) e determina, junto com a Lei do Inverso dos Quadrados, a seguinte relação:

$$E = I \cos \theta / D^2 \qquad (8)$$

Onde $E$ é a iluminância em lux (lx), $I$ é a intensidade luminosa em Candela (cd), $\theta$ é o ângulo de incidência em graus e $D$ é a distância em metro (m). Ver Figura 2-14.

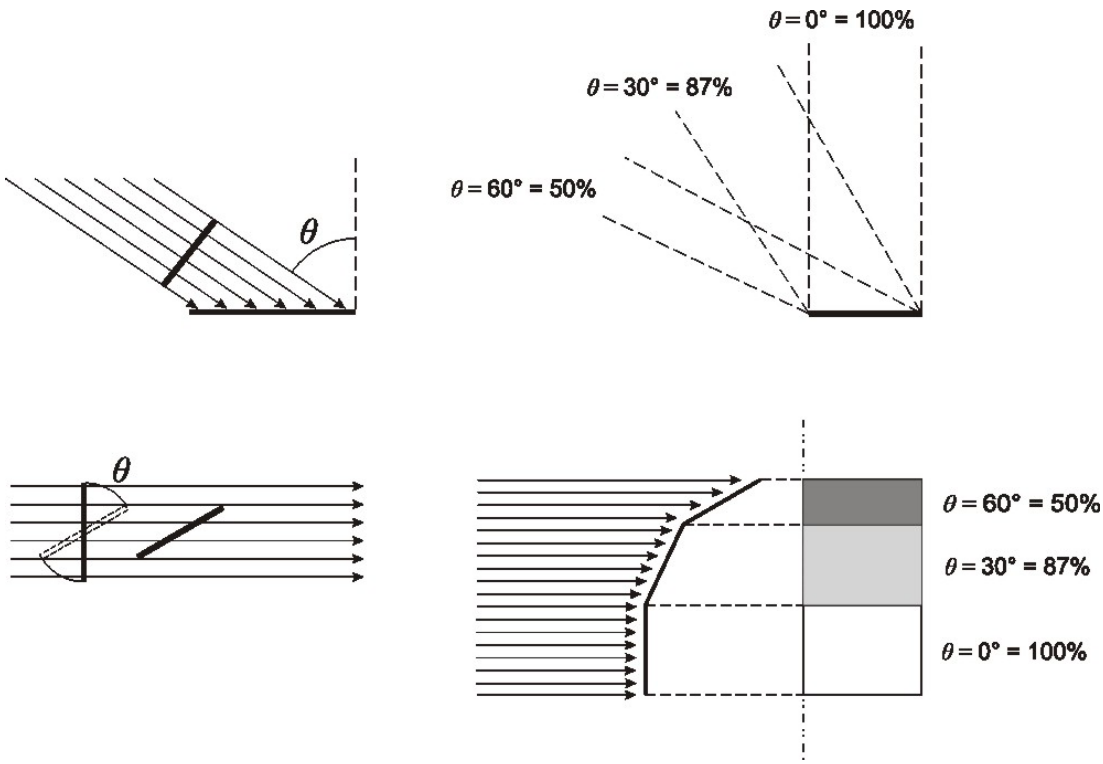



**Figura 2-14 – Lei do Cosseno.**

Além de pontuais e extensas, as fontes luminosas podem ser primárias, quando têm a capacidade de emitir luz, ou secundárias, quando emitem luz por refleti-la de outras fontes. Essa emissão é percebida por nós como o brilho das coisas e pode ser medido objetivamente em candela por metro quadrado (cd/m²), definindo a luminância (*L*) da fonte emissora (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Ela se relaciona com a intensidade luminosa e com a área da fonte pela expressão:

$$L = I / A \qquad (9)$$

Onde *L* é a luminância em Candela por metro quadrado (cd/m²), *I* é a intensidade luminosa em Candela (cd) e *A* é a área de incidência em metro quadrado (m²).

A luminância se relaciona com área. Pela Lei do Cosseno, a área aparente (*A'*) da fonte luminosa em relação a um ponto se reduz com o cosseno do ângulo ($\theta$), entre a reta normal ao plano e a direção do considerado. Ver Figura 2-15.

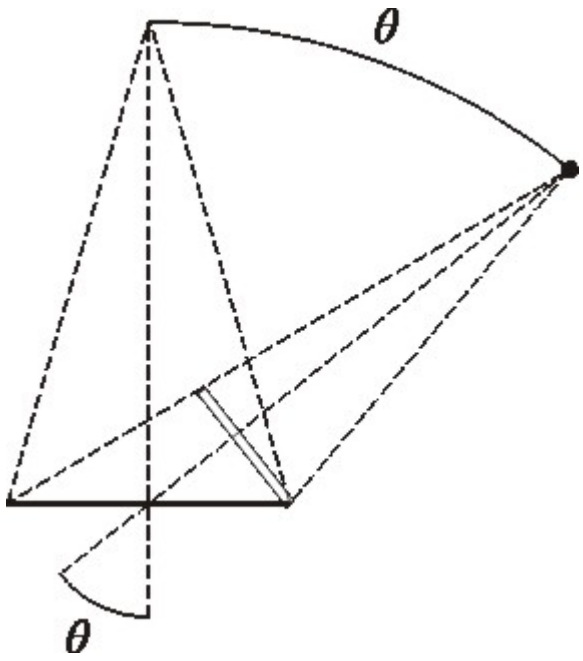



**Figura 2-15 – Lei do Cosseno e área aparente.**

Se considerarmos uma reflexão perfeitamente difusa, as intensidades luminosas serão distribuídas igualmente em todas as direções, então a luminância em relação a um ponto pode ser definida pelas expressões.

$$L_\theta = I / A'_\theta \qquad (10)$$

$$A'_\theta = A \cos \theta \qquad (11)$$

Onde $L_\theta$ é a luminância na direção do ponto, $I$ é a intensidade na direção do ponto, $A'_\theta$ é a área aparente em relação ao ponto, $A$ é a área real da fonte e $\theta$ é o ângulo entre a normal da fonte e a direção do ponto.

A luminância de uma fonte secundária é determinada pela iluminância incidente e pelo coeficiente de reflexão da superfície, de acordo com a expressão:

$$L = E \rho / \pi \qquad (12)$$

Onde $L$ é a luminância em Candela por metro quadrado (cd/m²), $E$ é a iluminância incidente em lux (lx) e $\rho$ é o coeficiente de reflexão da superfície.

Esta expressão também se relaciona com a área aparente $A'$:

$$L_\theta = E\rho / \pi \cos \theta \qquad (13)$$

Onde $L_\theta$ é a luminância na direção do ponto, $E$ é a iluminância incidente em lux (lx), $\rho$ é o coeficiente de reflexão da superfície e $\theta$ é o ângulo entre a normal da fonte e a direção do ponto.

As expressões relacionadas ao fator $\pi$ são válidas apenas para as fontes secundárias que possuem reflexão difusa. Elas são na verdade uma aproximação da realidade, pois consideram a reflexão da superfície perfeitamente difusa. Isto se refere àqueles materiais que apresentam um aspecto fosco, como o papel. As superfícies polidas que apresentam tipos diferentes de brilho, têm sua luminância regida também pelas leis da reflexão especular.

Através das grandezas fotométricas a luz pode ser dimensionada e isso é fundamental para o seu estudo e para a compreensão dos fenômenos luminosos.

## 2.2 A Visão

A importância da luz para o ser humano está ligada ao sentido da visão. Esse sentido é muito importante para nossa vida, pois é nossa principal ferramenta de percepção espacial.

De um ponto de vista puramente físico, o olho humano é um complexo órgão sensorial que capta energia luminosa e converte em sinais elétricos que são enviados ao cérebro.

O olho é o mais ativo instrumento de interação do indivíduo com o seu meio, essa interação pode ser definida como visão. Captando os estímulos luminosos do meio o olho informa sobre distância, forma e movimento de tudo que nos cerca.

O desempenho do importante sentido da visão está ligado ao olho, como órgão receptor, e às condições do meio, que é fonte do estímulo luminoso. Conhecer as condições ideais do meio para possibilitar uma boa visão ou entender a satisfação do indivíduo quanto a estas condições ajuda a formar as definições de conforto luminoso, de boa visão e de boa iluminação.

Para Baker, Fanchiotti e Steemers (1998), o conforto luminoso é definido a partir do conceito de mensagem visual. O olho capta a luz do ambiente e forma

imagens, mas é o cérebro que interpreta e dá significado a estas imagens. Desta forma, a imagem envia mensagens ao cérebro, sobre o ambiente. O conjunto olho-cérebro forma o mecanismo da percepção visual. No cotidiano, as pessoas precisam captar mensagens visuais e o olho se esforça para melhorar a recepção destas mensagens, minimizando as interferências na transmissão. O conforto luminoso significa a recepção nítida da mensagem visual do ambiente, sem esforço excessivo do mecanismo da visão.

As mensagens visuais podem ser mais ou menos difíceis de serem captadas. Para tratar esta questão adota-se o conceito de tarefa visual. As diferentes tarefas visuais são classificadas quanto à dificuldade que impõem à boa visão.

### 2.2.1 Visão e iluminação

A boa visão depende da combinação de uma boa iluminação com um olho de boa capacidade visual. Um indivíduo de vista fraca pode ser auxiliado por uma boa iluminação e é possível enxergar bem com má iluminação, graças ao processo de adaptação visual. Entretanto, a adaptação exige esforço fisiológico, que em demasia provoca fadiga, podendo fazer surgir sintomas como dores de cabeça, irritabilidade e perda de produtividade (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).

A visão é geralmente avaliada pela capacidade de discernir pequenos contrastes de brilho, cor e sombra, de ver pequenos detalhes nitidamente, de perceber mudanças de forma e movimento no campo visual. Este conjunto de requisitos dá a medida da eficiência visual.

Uma iluminação adequada pode melhorar a eficiência visual, que está ligada à percepção de contraste e de cor, à acuidade visual, velocidade e precisão exigida para o desempenho das respectivas tarefas visuais.

Qualquer inadequação no processo de adaptação visual faz surgir o ofuscamento. Ele provoca a redução da eficiência visual e é fonte de desconforto e incapacidade visual.

Baseado nos requisitos da boa visão, as diferentes tarefas visuais são classificadas quanto ao menor contraste e ao menor detalhe a ser percebido da

distância adequada, e também ao nível tolerável de brilho, à percepção de cor, precisão e velocidade exigidas.

A satisfação destes requisitos ocorre sob determinados valores de iluminância. As tarefas visuais são relacionadas aos valores de iluminância exigidos para possibilitar uma boa eficiência visual.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da norma NBR 5413 de maio de 91, fixa as iluminâncias recomendadas para várias tarefas visuais que servem de referência. Considerando um observador com idade entre 40 e 55 anos, praticando tarefas que demandam velocidade e precisão médias, com a refletância do fundo sendo maior que 70 %, os valores médios podem ser utilizados (ABNT, 1992). Esses valores consideram apenas uma iluminação artificial, distribuída em um plano de trabalho horizontal. Ver Tabela 1.

A iluminação de um ambiente geralmente é considerada em relação a um plano de trabalho, que é um plano hipotético localizado onde a tarefa visual será executada. Para as tarefas que são feitas em mesas convencionais, adota-se um plano horizontal, com altura de 0,75m em relação ao piso (ABNT, 1992).

**Tabela 1 – Iluminâncias por classe de tarefa visual. Fonte NBR-5413 (ABNT, 1992).**

| Classe | Iluminância (lx) | Tipo de atividade |
|---|---|---|
| A – Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples | 20 – 30 - 50 | Áreas públicas com corredores escuros |
| | 50 – 75 - 100 | Orientação simples para permanência curta |
| | 100 – 150 - 200 | Recintos não usados para trabalho contínuo depósitos |
| | 200 – 300 - 500 | Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios. |
| B – Iluminação geral para área de trabalho | 500 – 750 -1000 | Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios. |
| | 1000 – 1500 - 2000 | Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas. |
| C – Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis | 2000 – 3000 - 5000 | Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno. |
| | 5000 – 7500 - 10000 | Tarefas visuais muito extensas, montagem de microeletrônica. |
| | 10000 – 15000 - 20000 | Tarefas visuais muito especiais, cirurgia. |

Os valores de iluminância podem variar de um ponto para outro no plano de trabalho. Essa característica define a uniformidade de distribuição da iluminação. Ela deve estar dentro de uma margem de variação para tornar toda a área iluminada do plano de trabalho adequada ao desempenho de uma mesma tarefa visual. A NBR

5413 (ABNT, 1992) recomenda que a iluminância em qualquer ponto do plano de trabalho não seja inferior a 70% da iluminância média determinada.

A boa iluminação pode ser definida como aquela que promove a eficiência visual para uma determinada tarefa. Com base nos requisitos do conforto luminoso e da boa visão, é possível se definir os requisitos da boa iluminação:

- Iluminância suficiente no plano de trabalho para a tarefa visual pretendida;
- Uniformidade suficiente na distribuição de iluminância no plano de trabalho;
- Bom padrão de sombras para a tarefa visual;
- Reprodução de cor adequada à tarefa visual;
- Ausência de ofuscamentos, através do equilíbrio de luminância no campo visual.

## 2.3 A Luz natural

A luz do dia é um recurso importante para se alcançar o conforto luminoso no interior das edificações. A visão humana evoluiu sob a luz natural e está mais adaptada a ela que a qualquer fonte de luz elétrica. Isso talvez justifique a preferência que as pessoas demonstram por espaços iluminados naturalmente. Embora os motivos desta preferência não estejam esclarecidos, a literatura especializada admite os efeitos psicológicos positivos da iluminação natural (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).

As aberturas, por onde penetra a luz natural, fazem a conexão entre o espaço interno e externo, ampliando os interiores e permitindo que se perceba o avanço das horas pelas mudanças da luz do dia, que está relacionada ao nosso "relógio biológico" e aos ritmos do corpo (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).

A combinação da luz que penetra pela janela com luz refletida pelas superfícies internas proporciona um padrão de sombra agradável, com uma direção lateral que é muito apreciada pelas pessoas e relaxante para exercer tarefas visuais prolongadas. (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).

A reprodução de cor da luz natural é a melhor e serve de referência para classificar outras fontes de luz (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1998).

A sua eficácia luminosa, embora variável, é superior à boa parte das fontes de luz elétrica. Isso reduz os ganhos de calor do edifício e o consumo de energia elétrica para refrigeração (MAJOROS, 1998). Ela também se constitui em uma fonte de luz permanente, que combina boa eficácia luminosa com a melhor reprodução de cor e sem nenhum custo de aquisição ou manutenção.

A despeito das diferentes condições da luz natural no mundo, (MAJOROS, 1998) afirma que a iluminação natural permite que se alcancem níveis satisfatórios de iluminância durante boa parte das horas de trabalho do dia e do ano, reduzindo significativamente o consumo de energia elétrica dos edifícios para iluminação. De acordo com Lamberts, Dutra, Pereira (1997), as edificações no Brasil são responsáveis por 42% do consumo de energia elétrica, sendo que desse total, 44% são destinados à iluminação. Considerando que na maioria dos casos as horas de trabalho concentram-se no período diurno e que é grande a nossa disponibilidade de luz natural, o consumo de energia elétrica para iluminação poderia ser significativamente reduzido pelo maior aproveitamento desse recurso.

Embora mude constantemente ao longo do dia e do ano, excluindo-se a luz solar direta, as mudanças ocorrem em tal ritmo e amplitude, que permitem a boa adaptação visual, não gerando desconfortos (MAJOROS, 1998).

Entretanto, apesar de suas vantagens sobre a iluminação artificial, a iluminação natural não está sob o controle do projetista, tendo certo grau de imprevisibilidade que torna o projeto de iluminação natural mais complexo. Para lidar com esta característica, faz-se necessário conhecer as fontes de luz natural e o modo como ela chega ao interior das edificações.

### 2.3.1 Fontes de luz natural

O Sol é a fonte primordial da luz natural. Essa luz pode ser definida como a parte do espectro da radiação solar que pode ser captada pelo olho humano. Quando sua luz atravessa a atmosfera, parte dela se difunde, o céu brilha e se converte também em fonte de luz. A parte da luz que alcança a superfície terrestre é refletida

pelo solo e pelo entorno natural e construído, contribuindo para formar o total de luz disponível. Os estudos de iluminação natural geralmente consideram estas três fontes separadamente.

### 2.3.2 Luz natural e clima

As fontes de luz natural influenciam e são influenciadas pelo clima de um lugar. A princípio, a radiação solar e a umidade atmosférica são os parâmetros climáticos determinantes para as fontes de luz natural, porque formam as condições de nebulosidade. A quantidade de radiação solar recebida pela atmosfera, em dado ponto na superfície terrestre, é determinada pela geometria solar, cujas variações mais importantes estão ligadas à latitude. Já a radiação incidente na superfície terrestre, é mediada pela ação da atmosfera, que reflete, absorve e transmite radiação. Por sua vez a superfície também absorve e reflete radiação, influenciando a difusão atmosférica, a temperatura do ar e, conseqüentemente, as pressões atmosféricas. A umidade combina-se com a temperatura para gerar as condições de nebulosidade e precipitação, que vão influenciar a difusão atmosférica e as características da superfície, como umidade e vegetação.

Essa combinação tão complexa de fatores como latitude, altitude, umidade, vegetação etc, determina o clima de um lugar. O clima pode ser definido como a soma de todas as ocorrências meteorológicas na atmosfera de um lugar durante um longo período de tempo.

O termo trópico designa a região do Globo entre o Trópico de Capricórnio (latitude 23°27’S) e de Câncer (latitude 23°27’N). Ele é um indicador da quantidade de radiação solar recebida, já que esta é a única região do Globo onde sol pode estar posicionado no zênite. Essa região é muito grande e possui uma grande variedade de climas tropicais. Para os estudos de iluminação natural, a umidade é um parâmetro climático adequado para subdividir o trópico em úmido e seco, por conta das diferenças que ela determina na nebulosidade do lugar (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) (CABÚS, 2002). O Trópico seco tem como características básicas o céu claro e uma significante amplitude térmica diária. Enquanto o Trópico úmido apresenta uma leve variação de temperatura diária e céu

parcialmente nublado a maior parte do tempo (CABÚS, 2002) (BITTENCOURT & CÂNDIDO, 2005).

Embora a radiação solar e a umidade de um lugar sejam determinantes para a iluminação natural, os parâmetros climáticos que influenciam o conforto térmico interferem também no desenho dos edifícios. Por questões térmicas, as edificações podem ser projetadas para outras exigências além da captação de luz natural, como ventilação e sombreamento. Pode ainda haver exigências de projeto como proteção contra chuvas, neve, poeira, insetos e outras.

### 2.3.3 O Sol

A radiação do Sol é a fonte de energia primordial do planeta. Além da luz, as radiações ultravioleta (290nm < $\lambda$ < 380nm) e infravermelha (780nm < $\lambda$ < 2500nm) também compõem a radiação solar (CARAM; LABAKI; SCHIERI, 1995). A razão entre os percentuais de luz e de radiações não visíveis define a eficácia luminosa da radiação solar, que varia com a posição do Sol e condições atmosféricas.

A Terra apresenta os movimentos de rotação e translação. Considerando um ponto na superfície terrestre, a combinação desses movimentos gera a seqüência dos dias e das noites, as estações do ano e faz com que a posição aparente do Sol na abóbada celeste varie continuamente. No entanto, essa posição é completamente previsível para todos os locais, horários e datas.

Em uma projeção estereográfica da abóbada celeste num plano horizontal é possível representar todas as posições do Sol, ao longo do ano, dando origem a um diagrama conhecido como Carta Solar, Diagrama Solar ou Gráfico Solar (BITTENCOURT, 2004). Mostrada na Figura 2-17.

Cada ponto na superfície da terra é determinado por sua latitude e longitude. As Cartas Solares são sempre traçadas para uma latitude específica. Cada posição do Sol coincide com a direção de seus raios paralelos e pode ser determinada pelos ângulos de altura ($a_t$) e azimute solar ($a_s$). Ver Figura 2-16. A união dos pontos forma as trajetórias solares. Cada trajetória solar representa dois dias do ano, com exceção dos solstícios. As alturas variam de 0° a 90°. Os azimutes, para o hemisfério sul, são

contados a partir do norte em sentido horário e variam de 0° a 360°. A Figura 2-17 mostra a Carta Solar para a latitude 0°.

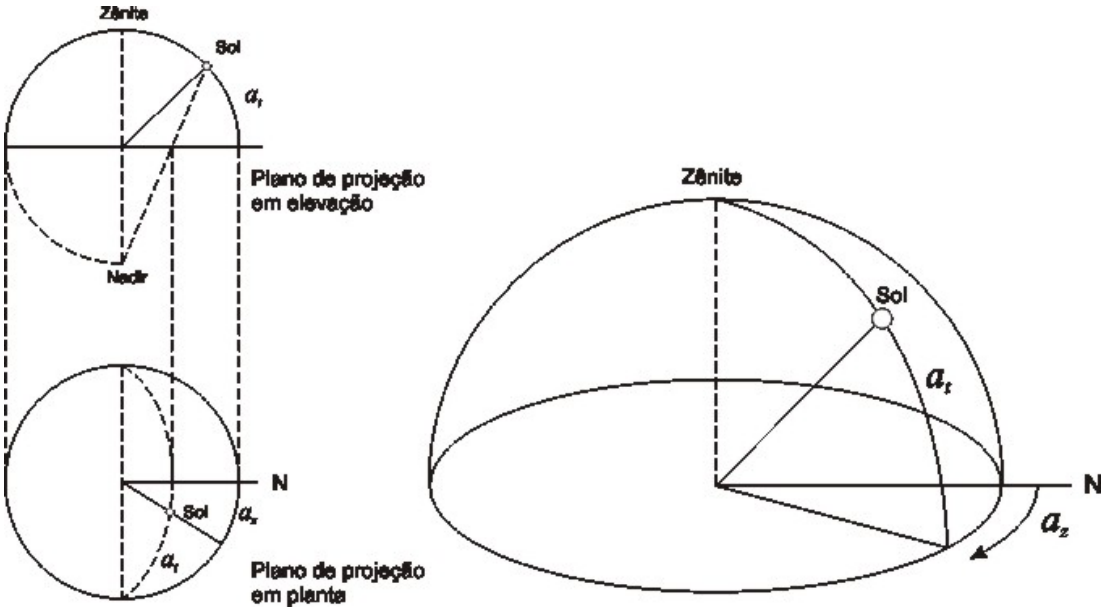



**Figura 2-16 – Indicação da posição do Sol na abóbada celeste através dos ângulos de altura (at) e azimute solar (as). Processo de projeção estereográfica para criação da Carta Solar.**

A Carta Solar indica o Horário Solar, que precisa ser corrigido para coincidir com o horário local. A diferença entre o tempo legal e o tempo solar verdadeiro é dada pela expressão:

$$TSV = TL + ET + 12\,(W - L) / \pi \qquad (14)$$

Onde *TSV* é o tempo solar verdadeiro, *TL* é o tempo legal e *ET* é o valor da equação do tempo para a data escolhida conforme o gráfico da função na Figura 2-18, *W* é o ângulo horário e *L* é a longitude do lugar (IES, 1984).

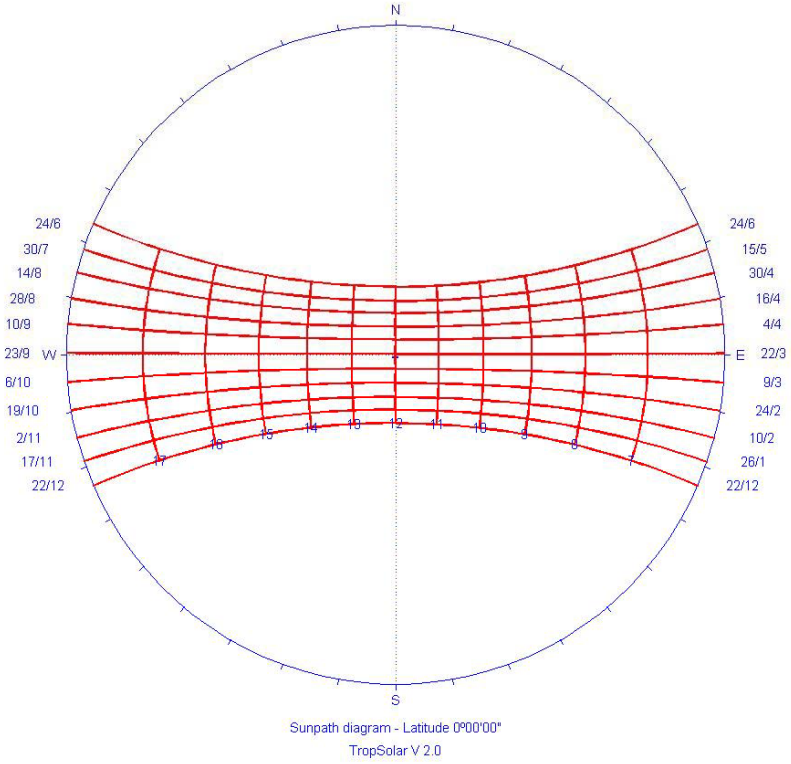



**Figura 2-17 – Carta Solar para latitude 0°. Fonte: Figura gerada pelo programa TropSolar V 2.0 (CABÚS, 2005).**

O ângulo de incidência dos raios solares afeta a iluminância solar na superfície terrestre devido à Lei do Cosseno. Também modifica a Massa de Ar Óptica (*m*), que é a distância que os raios solares percorrem no interior da atmosfera. Quanto maior este valor, maior a absorção e a difusão. Ver Figura 2-19. Esses dois fatores fazem com que a iluminância direta do Sol se modifique com a latitude, com a época do ano e com o horário do dia. As condições atmosféricas também afetam esta iluminância, porque modificam a razão entre a iluminância difusa e direta.

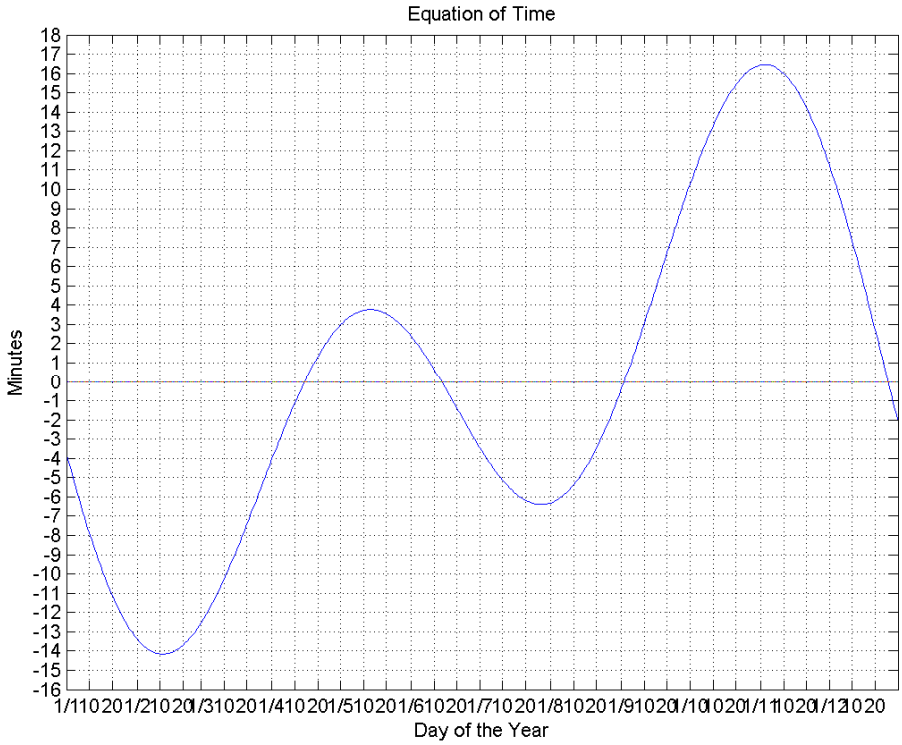



**Figura 2-18 – Gráfico da Equação do Tempo, mostrando os seus valores para todo o ano. Fonte TropSolar V 2.0 (CABÚS, 2005).**

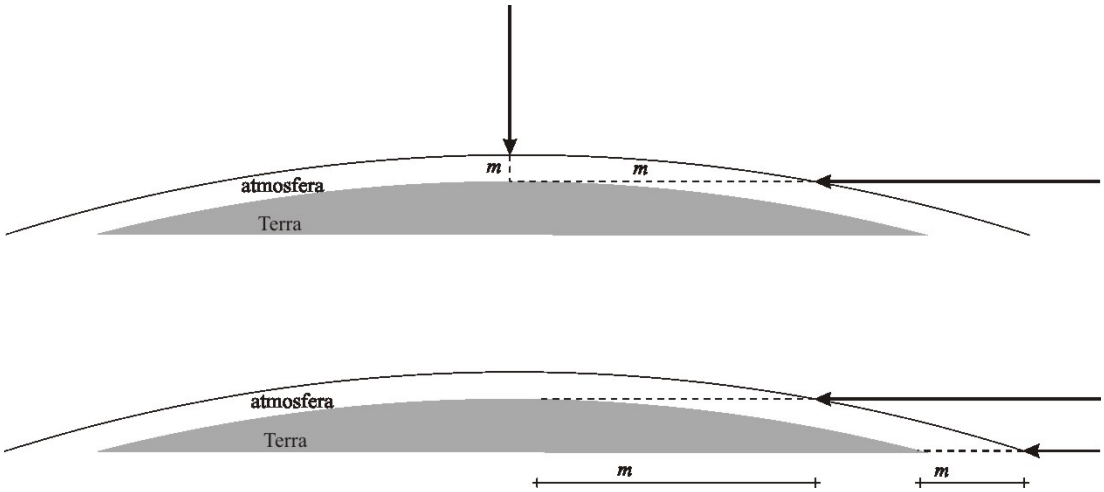



**Figura 2-19 - Relação entre altura solar, latitude e massa de ar óptica (m).**

A duração dos dias e das noites varia com a latitude e com a época do ano, alterando a duração da insolação diária e anual. O Sol também pode ser encoberto por nuvens, fazendo com que sua iluminância direta não esteja disponível durante períodos do dia e do ano. Para os estudos de iluminação é necessário determinar a

probabilidade de insolação, que varia com a localização geográfica e com as condições de nebulosidade no céu local.

O Sol parece ser um ponto no céu, mas é muito maior que a Terra. Proporciona uma iluminação direcional, cujo feixe luminoso é formado por raios paralelos.

A iluminância solar direta tem utilidade limitada para a iluminação de interiores, principalmente nos trópicos, onde a latitude e as condições do céu tornam-na muito intensa e freqüente. Por proporcionar uma iluminação direcional muito intensa, ela cria áreas de contorno nítido com alta luminância (contraste vincado), em relação ao resto do ambiente, criando problemas de ofuscamento pelo nível de contraste gerado (MAJOROS, 1998). Ver Figura 2-20. Também gera ganhos de calor indesejáveis no edifício e, em climas quentes, é preferível evitá-la através de recursos de sombreamento. O seu uso nos trópicos fica condicionado ao uso de dispositivos de difusão ou redirecionamento, ou ainda, restrito a questões de expressividade arquitetônica.

**Figura 2-20 – Iluminância solar direta em Maceió-AL. Observa-se o alto nível de contraste. Fonte Ricardo Cabús.**

### 2.3.4 O céu

A atmosfera difunde boa parte da radiação solar. O percentual que atinge a superfície é de aproximadamente 50% da radiação extraterrestre. Ela pode ser descrita como uma camada gasosa que envolve o nosso planeta, tendo grande influência no seu balanço energético (KOENISBERGER, 1977).

Por causa de nossa visão em projeção cônica, percebemos a atmosfera como uma abóbada sobre a linha do horizonte. Os estudos de iluminação natural tratam-na por céu ou abóbada celeste, considerando-a uma fonte de luz muito extensa em forma de hemisfério. O topo da abóbada celeste é chamado de zênite.

O céu difunde parte da luz solar e se converte em fonte luminosa. O processo de difusão pode ser entendido como resultado simultâneo de processos de absorção, reflexão e transmissão da luz pelas moléculas do ar e partículas em suspensão. A luz do céu é de grande importância para o projeto de iluminação natural, proporcionando uma iluminação difusa.

O brilho do céu não é uniforme e nem constante. A posição do sol, as nuvens, a composição da atmosfera alteram o processo de difusão, gerando áreas com diferentes luminâncias que formam a configuração do céu ou sua distribuição de luminâncias. Estas distribuições afetam a iluminância difusa na superfície.

Além do clima, características antrópicas locais, como a poluição do ar, também afetam a iluminação natural. Para se caracterizar o céu em relação à iluminação é necessário conhecer sua distribuição de luminâncias e a iluminância horizontal difusa devida a toda abóbada celeste.

A nebulosidade está relacionada com a umidade e temperatura do lugar, mas muda freqüentemente ao longo do dia e do ano. As diferentes condições de nebulosidades que o céu apresenta podem ser agrupadas em céu claro, céu encoberto e parcialmente nublado. Cabús (2002) adota uma classificação baseada na porção de céu encoberta por nuvens, com o céu dividido em oito partes. Com 0 a 1 oitavo de céu coberto por nuvens, está caracterizado o céu claro. O céu encoberto apresenta 7 a 8 oitavos e o parcialmente nublado, 2 a 6 oitavos.

O céu claro apresenta-se azul e praticamente sem nuvens. A cor azul é fruto da difusão provocada pelas partículas de vapor d'água (ABNT, 1999). Sua distribuição de luminâncias é caracterizada por uma área de maior brilho em torno do Sol, e uma área mais escura a aproximadamente 90° dele, no meridiano que passa por ambas. Essas duas regiões se movem junto com o Sol. Na direção oposta a ele, a luminância aumenta gradativamente a partir da região mais escura, até o horizonte (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) (MAJOROS, 1998) (LAM, 1986). É o céu de luminância média proporcionalmente menor. As maiores

variações na distribuição são determinadas pela posição momentânea do Sol, sendo bastante previsível. Na ausência de obstruções do entorno, a iluminância difusa aparece sempre combinada com a iluminância solar direta. É a condição de céu mais freqüente no trópico-seco.

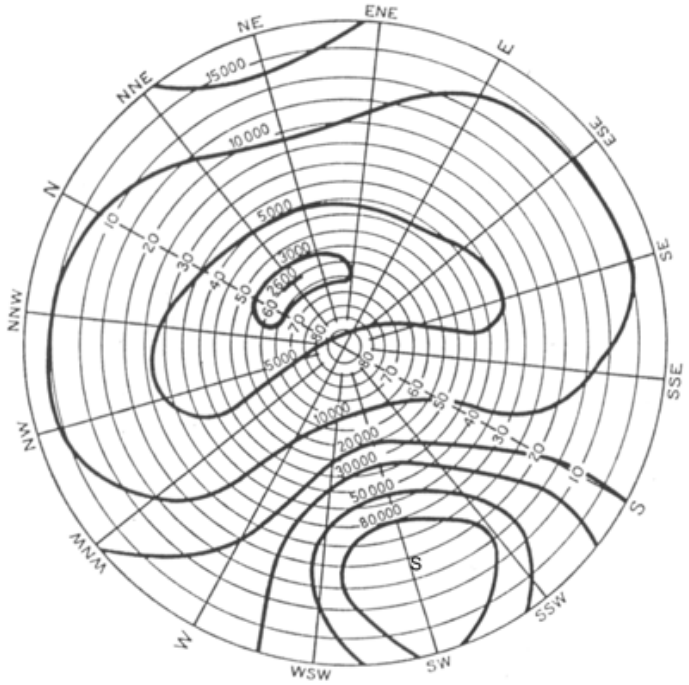



**Figura 2-21 – Distribuição de luminâncias um céu claro em Estocolmo, 2 de outubro de 1953, hora solar: 14h25m – 14h50m, hora de Estocolmo: 14h00m-14h25m. A posição do Sol é indicada pela letra S. Unidade de luminância: blondel (0,27 cd/m²). Adaptado de Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975).**

A Figura 2-21 mostra a distribuição de luminâncias de um céu claro na cidade de Estocolmo e a Figura 2-22 mostra a fotografia de um céu claro em Maceió-AL. Embora os valores absolutos de luminância e a posição do Sol sejam diferentes, a distribuição é muito semelhante.

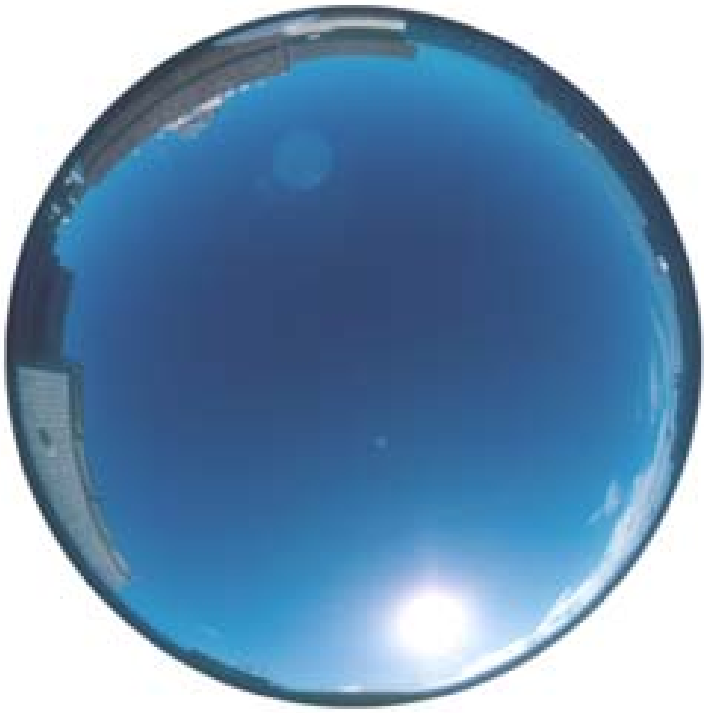


**Figura 2-22 – Céu claro em Maceió-AL. Fotografia tirada com lente "olho de peixe" apontada para o zênite. Fonte Ricardo Cabús.**

O céu encoberto apresenta-se geralmente cinzento e tomado por nuvens. Essa cor é causada pela difusão da luz nas partículas de água em suspensão (nuvens). Sua distribuição de luminâncias característica ocorre quando a cobertura de nuvens é completa e espessa, de modo que a posição do sol não pode ser identificada visualmente. Nessas condições, a distribuição do céu apresenta uma simetria em torno do zênite, que é o ponto de maior luminância. A partir do zênite a luminância diminui gradativamente até o horizonte, chegando a um terço da luminância zenital (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) (MAJOROS, 1998) (LAM, 1986). É o céu cuja iluminância horizontal varia menos e não há iluminância solar direta. É o mais freqüente em climas temperados. Estes climas são característicos do Norte da Europa, onde se desenvolveu boa parte dos estudos de iluminação natural. A Figura 2-23 mostra uma distribuição típica de um céu encoberto e a Figura 2-24 mostra um céu encoberto em Maceió-AL.

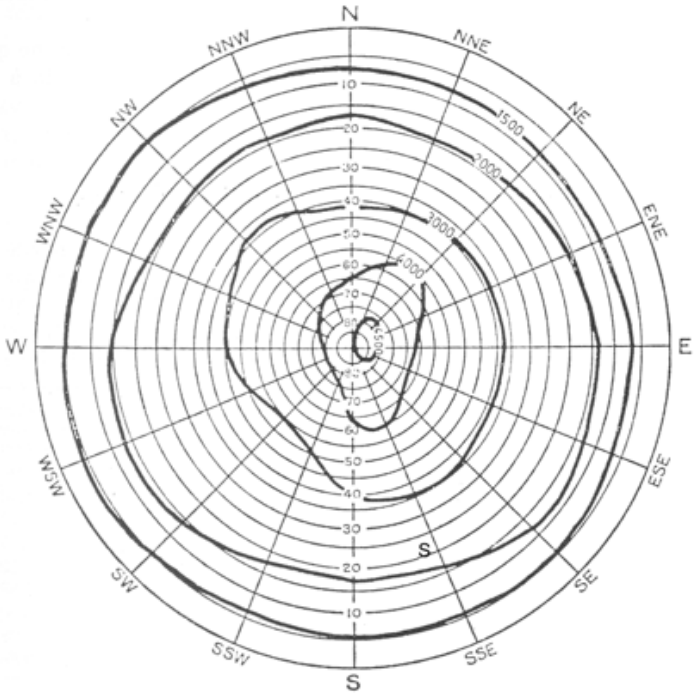



**Figura 2-23 – Distribuição de luminâncias de um céu encoberto em Estocolmo, sem nuvens individuais nem manchas brilhantes, 10 de outubro de 1953, hora solar: 9h55m-10h15m, hora de Estocolmo: 9h30m-9h50m. A posição do Sol é indicada pela letra S. Unidade de luminância blondel (0,27 cd/m²). Adaptado de Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975).**

**Figura 2-24 – Céu encoberto em Maceió-AL. Fonte Ricardo Cabús.**

Entre estes dois extremos de nebulosidade, encontra-se uma variedade de céus parcialmente nublados, combinando céu azul e nuvens mais ou menos espaçadas. É o mais freqüente no trópico-úmido, onde a alta umidade do ar torna o azul do céu mais claro. O efeito das nuvens bloqueando e refletindo a luz solar, provoca grandes variações na iluminância sobre o solo, que atinge altos valores (GU;

et all, 2001) (TREGUENZA, 1996). Ver Figura 2-26. A iluminância difusa pode ou não aparecer combinada com a iluminância solar direta. A Figura 2-25 mostra céus parcialmente nublados em Maceió-AL, com o Sol descoberto e encoberto.

**Figura 2-25 – Exemplos de céus parcialmente nublados em Maceió-AL. A fotografia foi tirada com lente olho de peixe apontando para o zênite. Fonte (CABÚS, 2002).**

**Figura 2-26 – Nuvens cúmulos na cidade de Maceió-AL. Fonte Ricardo Cabús.**

Como visto, a distribuição de luminâncias do céu é variável e influenciada por fatores de difícil previsão, que só podem ser tratados estatisticamente através de medições por um longo período. Porém, através de uma amostra significativa de

dados medidos é possível estimar a luminância média das diferentes regiões do céu, criando modelos de distribuição.

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 1999), baseada no trabalho Kittler, Perez e Darula, (1997), adotou um conjunto de 15 modelos de céu para serem usados nos cálculos de iluminação natural. Esses modelos são divididos em três grupos de cinco, correspondendo às três condições básicas de nebulosidade. Os 15 modelos são mostrados na Tabela 2.

Nestes modelos de céu, as diferentes luminâncias são definidas em relação à luminância do zênite, ou em unidades absolutas relacionadas à turbidez da atmosfera, ou ainda, relacionadas à iluminância difusa horizontal. A distribuição de luminâncias dos modelos é simétrica em relação ao meridiano que passa pelo Sol e adaptada à posição momentânea deste (CIE, 1999). A Figura 2-27 mostra os ângulos utilizados para determinar a luminância de um ponto qualquer no céu e a Figura 2-28 mostra como exemplo o céu número 13 da CIE (céu claro).

Os 15 céus padronizados da CIE são importantes para os estudos de iluminação no trópico-úmido, pois oferecem modelos adequados para simular o céu parcialmente nublado. A CIE vem promovendo desde 1984 o Programa Internacional de Medição da Luz Natural (IDMP), na tentativa de formar um banco de dados com a caracterização dos céus em todo Mundo (CABÚS, 2002). Tregenza (1983) analisou dados do IDMP para climas marítimos, onde a nebulosidade é bastante variável, e afirmou que a margem de erro dos cálculos de iluminação se tornou menor que naqueles estudos onde se adaptava os modelos de céu encoberto da CIE para estudar o céu parcialmente nublado (TREGENZA, 1983).

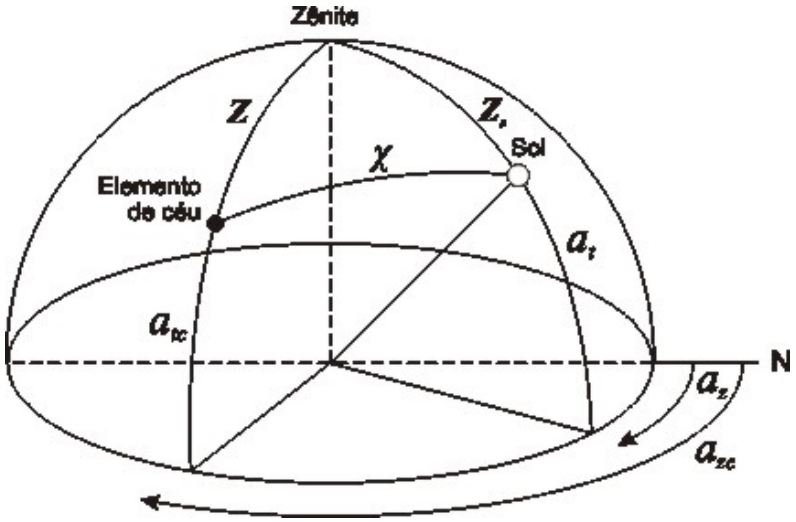



**Figura 2-27 – Ângulos utilizados para designar um ponto no céu em relação ao zênite e a posição do Sol: azc é o azimute do elemento de céu, atc é o ângulo de altura do elemento, Z é a distância angular entre o elemento e o zênite, Zs é a distância angular entre o sol e o zênite (complementar da altura solar) e χ é a menor distância angular entre o elemento de céu e o Sol. Adaptado de (CIE, 1999).**

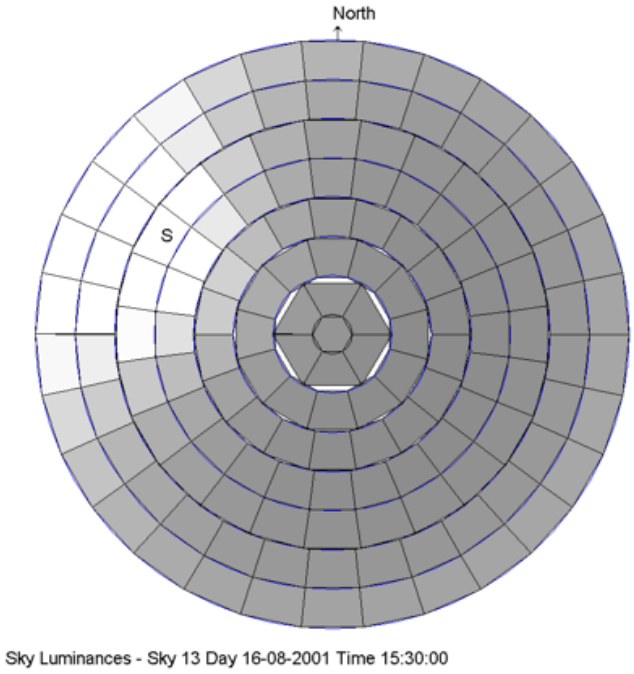
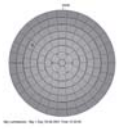
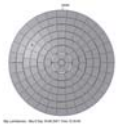
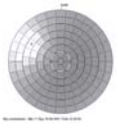
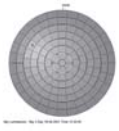
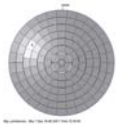
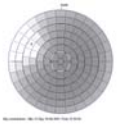
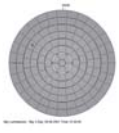
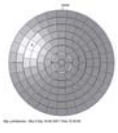
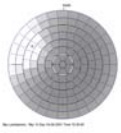
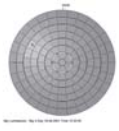
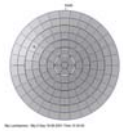
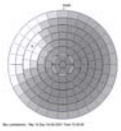
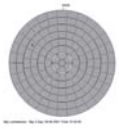
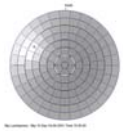
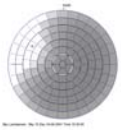



**Figura 2-28 – Céu número 13 da CIE (céu claro). A abóbada celeste é representada dividida em 145 partes em projeção equidistante. Maceió, 16/08/2001, 15h30m, a letra S representa a posição do Sol. Fonte (CABÚS, 2002).**

**Tabela 2 – Tabela com 15 modelos de céu da CIE. Fonte (CABÚS, 2002)**

| | N° | Exemplo | | N° | Exemplo | | N° | Exemplo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Céu encoberto | 1 |  | Céu parcialmente nublado | 6 |  | Céu claro | 11 |  |
| | 2 |  | | 7 |  | | 12 |  |
| | 3 |  | | 8 |  | | 13 |  |
| | 4 |  | | 9 |  | | 14 |  |
| | 5 |  | | 10 |  | | 15 |  |

### 2.3.5 Maceió: sol e céu

Como o clima de um lugar é específico e existe uma grande variedade de condições, foi escolhido um local determinado, como exemplo de trópico úmido, para analisar a interação das características climáticas com a disponibilidade de luz natural. A cidade de Maceió, capital do Estado de Alagoas, é uma cidade litorânea com clima trópico-úmido, localizada na latitude 9°40’S e longitude 35°42’O, com altitude máxima acima do nível do mar de 80m (CABÚS, 2002). A Figura 2-29 e a Figura 2-30 mostram fotos da cidade de Maceió

**Figura 2-29 – Maceió – AL: Foto de satélite entre 36°O e 35°O, e 9°30'S e 10°S, indicando a localização da cidade na costa do Estado de Alagoas. Fonte (IBGE, 2005).**

**Figura 2-30– Maceió – AL. Fonte (GAZETAWEB, 2006) e Ricardo Cabús.**

A Carta Solar de Maceió mostra que a insolação anual em um plano vertical orientado para o norte é maior que em um plano voltado para o sul, e que o Sol está

próximo ao zênite na maior parte do ano, o que aumenta a incidência solar sobre planos horizontais. Ver Figura 2-31.

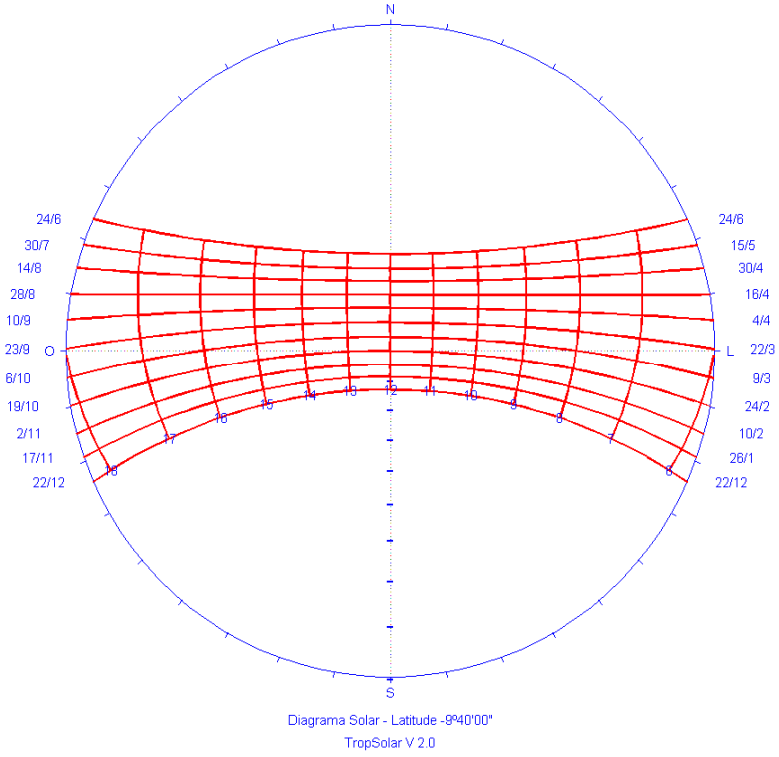



**Figura 2-31 – Carta Solar de Maceió (9°40' de latitude Sul). Fonte: Figura gerada pelo TropSolar v. 0.2 (CABÚS, 2005).**

Analisando as Normais Climatológicas para 30 anos (1961 a 1990) e dados da estação meteorológica do Aeroporto Zumbi dos Palmares no período de 1982 a 1997, Cabús (2002) caracterizou o clima de Maceió.

A temperatura média anual é de 24,8°C, com uma baixa amplitude térmica, tanto diária quanto anual. A temperatura média mensal mais alta é de 26,3°C e ocorre em fevereiro, enquanto a mais baixa, 23,5°, acontece em agosto. A precipitação anual é de 2.167,7mm, com aproximadamente 60% da precipitação de todo ano se concentrando entre os meses de abril e julho. A umidade relativa anual é de 78,3%. Em maio ela representa sua média máxima, chegando a 82,6%, enquanto novembro apresenta a menor média, 74,7%.

O condicionamento térmico passivo em Maceió, como uma cidade de clima trópico úmido, exige proteção da radiação solar (sombreamento) e dissipação do

calor através da ventilação natural (BITTENCOUT & CÂNDIDO, 2005) (LAMBERTS; PEREIRA e DUTRA, 1997).

Comparando os dados de insolação mensal com a duração do dia astronômico, Cabús (2002) determinou a probabilidade de insolação para a cidade de Maceió. A menor probabilidade foi de 49,4% no mês de julho e a maior no mês setembro, 73,7%. Esta freqüência da iluminância solar direta é um recurso luminoso importante. Ver Figura 2-32.

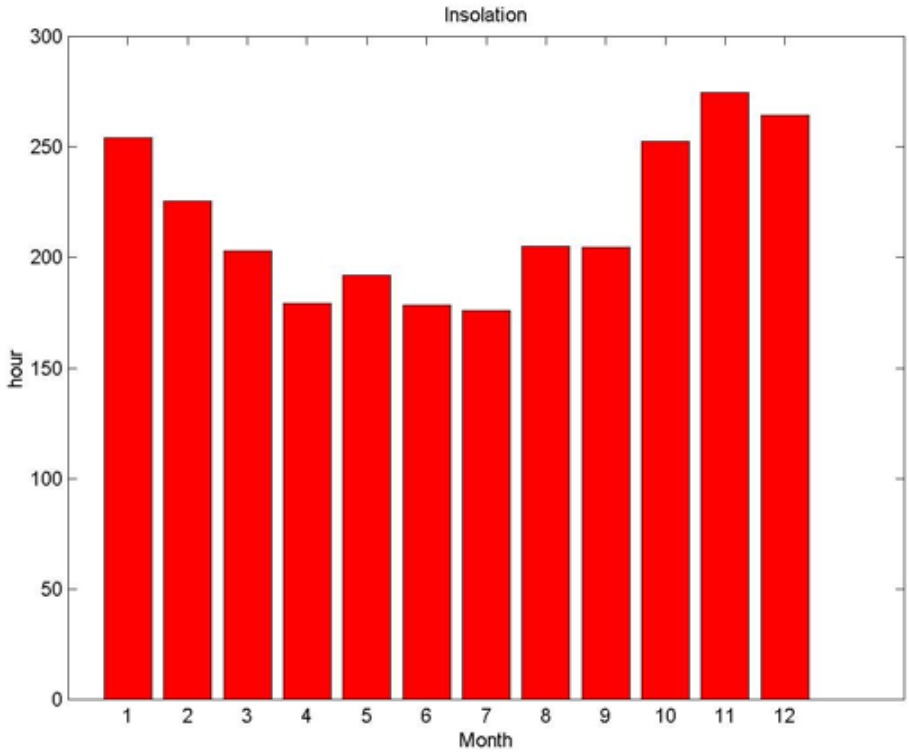



**Figura 2-32 – Média de horas de insolação por mês para Maceió. Fonte (CABÚS, 2002).**

Ao longo do ano, a nebulosidade aumenta entre os meses de abril e julho, quando as precipitações são maiores e a insolação menor por conta da nebulosidade. Ver Figura 2-33.

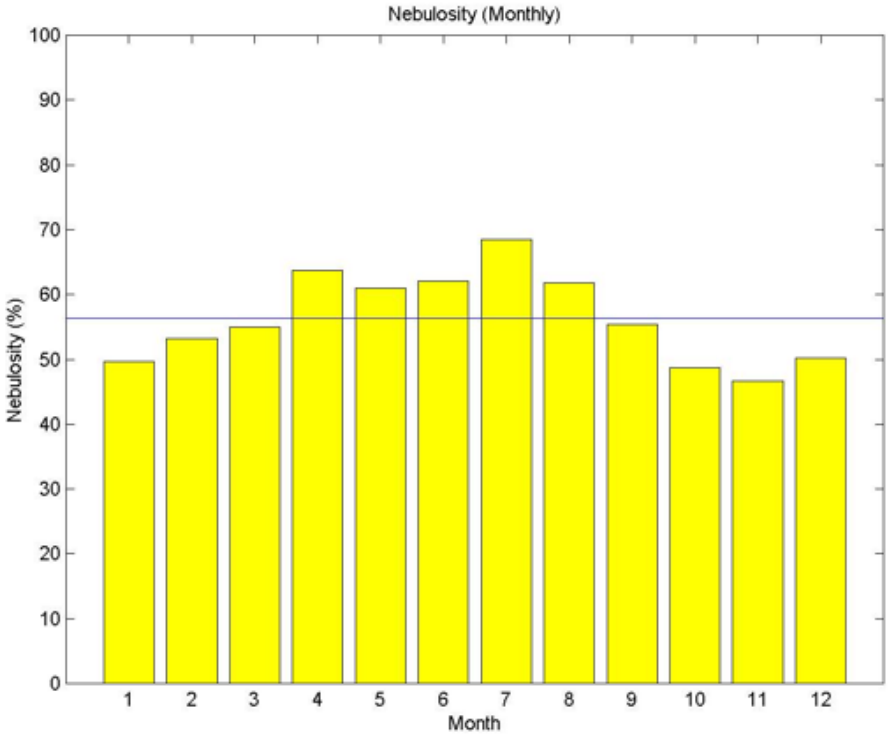



**Figura 2-33 – Nebulosidades mensais para Maceió. A linha representa a nebulosidade média. Fonte (CABÚS, 2002).**

Considerando as variações ao longo do dia, a nebulosidade é mais baixa durante a manhã, aumentando ao longo do dia. Atinge o ponto máximo durante a tarde, reduzindo-se ao entardecer. Ver Figura 2-34. Ao longo do ano ela varia mais durante a manhã e no entardecer, com diferenças marcantes entre a estação úmida e seca, sendo menos sujeita a variação às 09h00m e ao meio-dia.

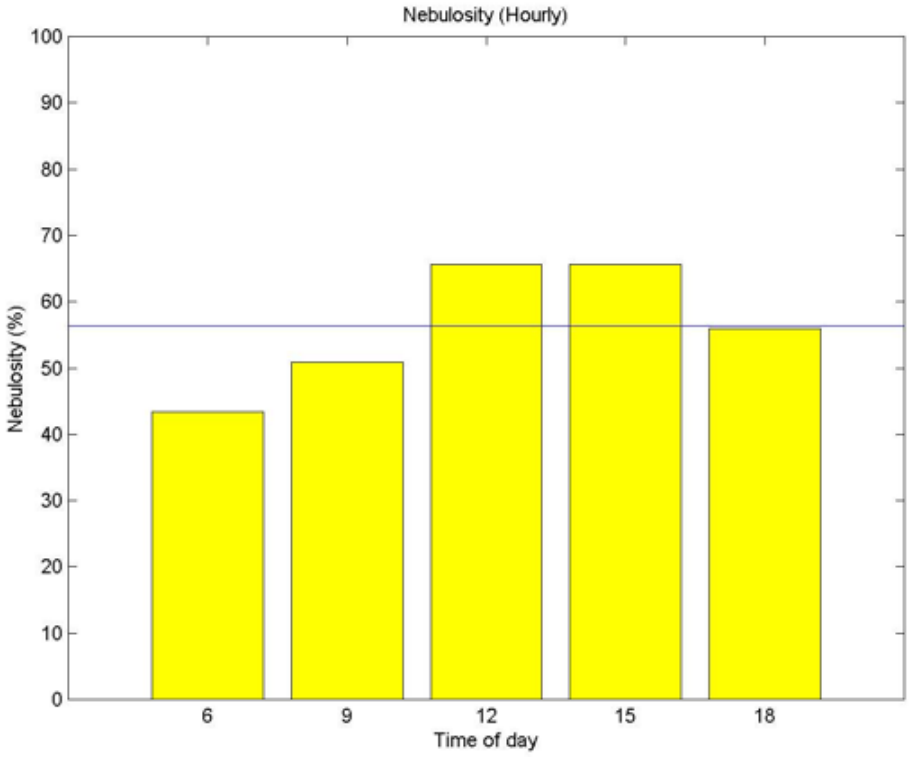



**Figura 2-34 – Nebulosidades horárias para Maceió. A linha representa a nebulosidade média. Fonte (CABÚS, 2002).**

Com base em dados da mesma fonte, Cabús (2002) analisou com que freqüência ocorre o céu claro (0 a 1 oitavo), parcialmente nublado (2 a 6 oitavos) e encoberto (7 a 8 oitavos). O céu parcialmente nublado é o mais freqüente, ocorrendo em 61,8% do período. Em seguida aparece o céu encoberto com 25% de ocorrência. O menos freqüente é o céu claro com apenas 12,8%. Ver Figura 2-35.

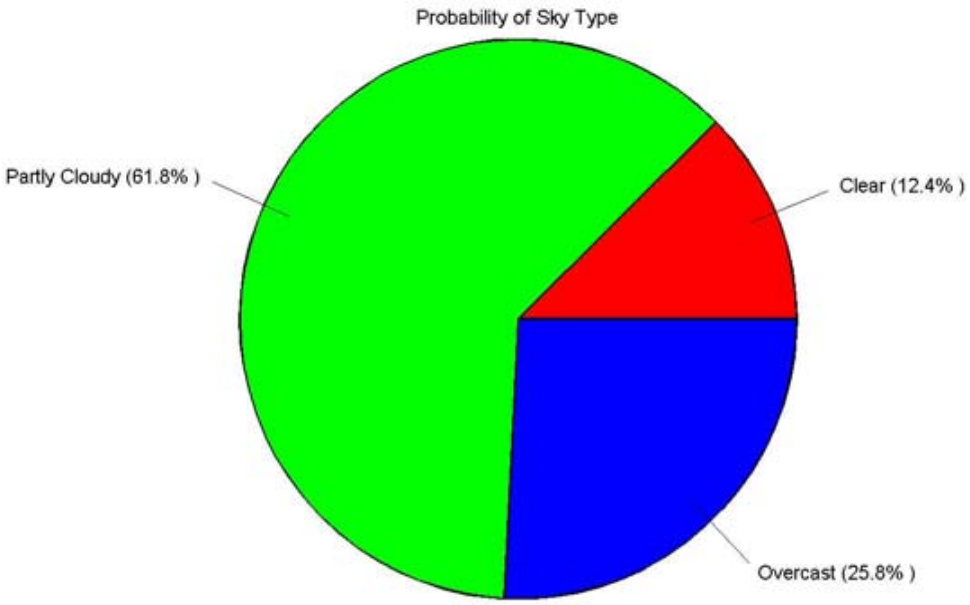



**Figura 2-35 – Probabilidade de ocorrência de céu encoberto, parcialmente nublado e claro, em Maceió-AL. Fonte (CABÚS, 2002).**

Considerando a probabilidade de ocorrência ao longo do dia, o céu parcialmente nublado é o mais freqüente, particularmente durante a tarde. O céu claro aparece mais quando o Sol está baixo, principalmente durante a manhã, sendo raro ao meio dia e cedo da tarde. Sendo menos freqüente de manhã cedo, o céu encoberto apresenta pouca variação no restante do dia. Ver Figura 2-36.

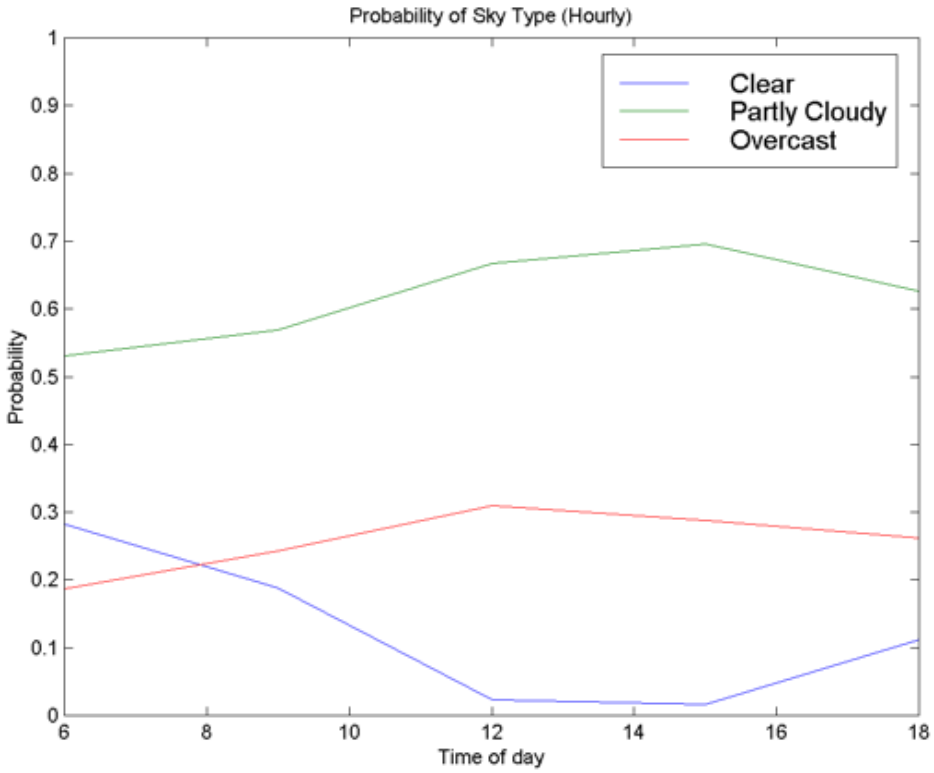



**Figura 2-36– Probabilidade horária de ocorrência de tipos de céu. Fonte (CABÚS, 2002).**

Considerando as freqüências mensais, o céu encoberto é o mais sujeito a variações, aproximando-se do parcialmente nublado no mês de julho e sendo mais raro que o céu claro nos meses de outubro e novembro. Ver Figura 2-37.

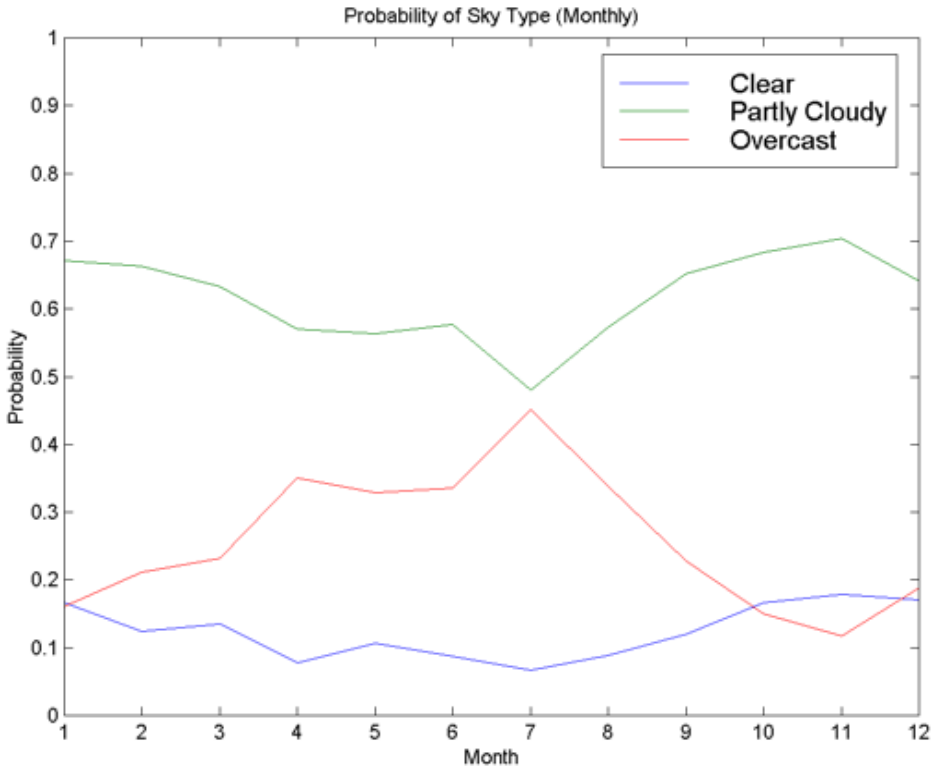



**Figura 2-37 – Probabilidade mensal de ocorrência do tipo de céu. Fonte (CABÚS, 2002).**

Baseado em um método simplificado, analisando uma pequena amostra de dados de luminância do céu e iluminância horizontal simultânea, coletados entre os meses de junho e agosto, Cabús (2002) sugeriu que os modelos de céu da CIE de número 5 (encoberto), 10 (parcialmente nublado) e 14 (claro) poderiam ser utilizados para estudar a iluminação natural em Maceió, na ausência de estudos que englobem um período maior do ano ou utilize metodologias de maior precisão, como em Tregenza (1999).

Como mostrado na Tabela 2, o céu 10 representa um céu parcialmente nublado com uma coroa solar brilhante. A Figura 2-38 mostra esse modelo de céu que representa o mais freqüente em Maceió.

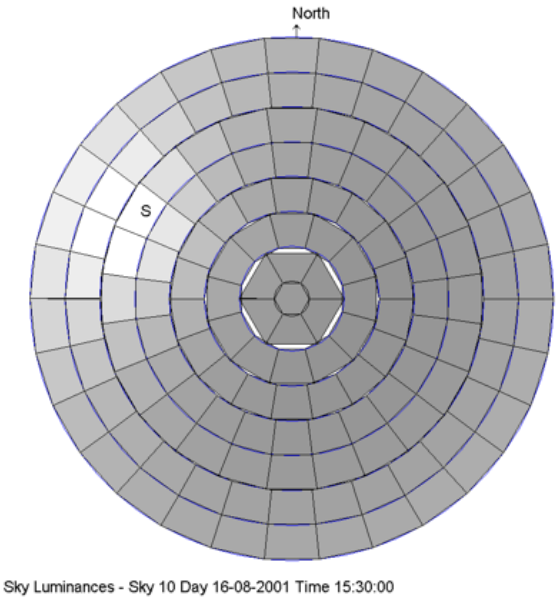



**Figura 2-38 – Céu 10 da CIE (parcialmente nublado). Projeção eqüidistante da abóbada celeste, dividida em 145 partes. Maceió, 16/08/2001, 15h30m, a letra S representa a posição do Sol. Fonte (CABÚS, 2002).**

## 2.4 Determinação da iluminação

A determinação de iluminação é a ferramenta que permite entender como a luz do ambiente externo chega ao interior da edificação, estimando a iluminação natural, para com isso, orientar as decisões do projetista. Os métodos buscam conhecer a iluminância em um ponto de um plano de trabalho. Em um segundo momento, conhecendo a iluminância em alguns pontos, é possível traçar curvas *isolux*, unindo os pontos de mesma iluminância, e assim entender a distribuição da luz no plano de trabalho.

Os métodos para atingir este objetivo podem fazer uso de processos gráficos ou matemáticos, manualmente ou auxiliado por computador. Aqui serão mostrados apenas alguns conceitos básicos e importantes para analisar o uso da iluminação na edificação.

O ponto em estudo e a abertura determinam um ângulo sólido que é definido por dois ângulos azimutais ($a_{zj}$) ($a_{zj}$') e dois ângulos de altura ($a_{tj}$) ($a_{tj}$'). Essa relação é denominada Princípio do Ângulo Sólido Projetado (HOPKINSON;

PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) (ABNT, 1999). A Figura 2-39 mostra como são identificados esses ângulos.

Os referidos ângulos formam o cone de visão do ponto e podem ser traçados no plano com a ajuda de um medidor de ângulos feito por projeção (Transferidor), traçando a Máscara de Obstrução. A Figura 2-40 mostra o Transferidor feito por projeção estereográfica e a Figura 2-41 mostra a marcação dos ângulos para formar a máscara.

Como mostrado na Figura 2-39, a interseção do ângulo sólido com o hemisfério delimita uma área que pode ser projetada no plano. A relação entre esta área e a área da projeção de todo o hemisfério, expressa em percentual, define o Fator de Céu do ponto (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Se as obstruções do entorno, ou as superfícies do ambiente interno, ocupam parte do ângulo sólido, usa-se o mesmo procedimento para definir o Fator de Configuração.

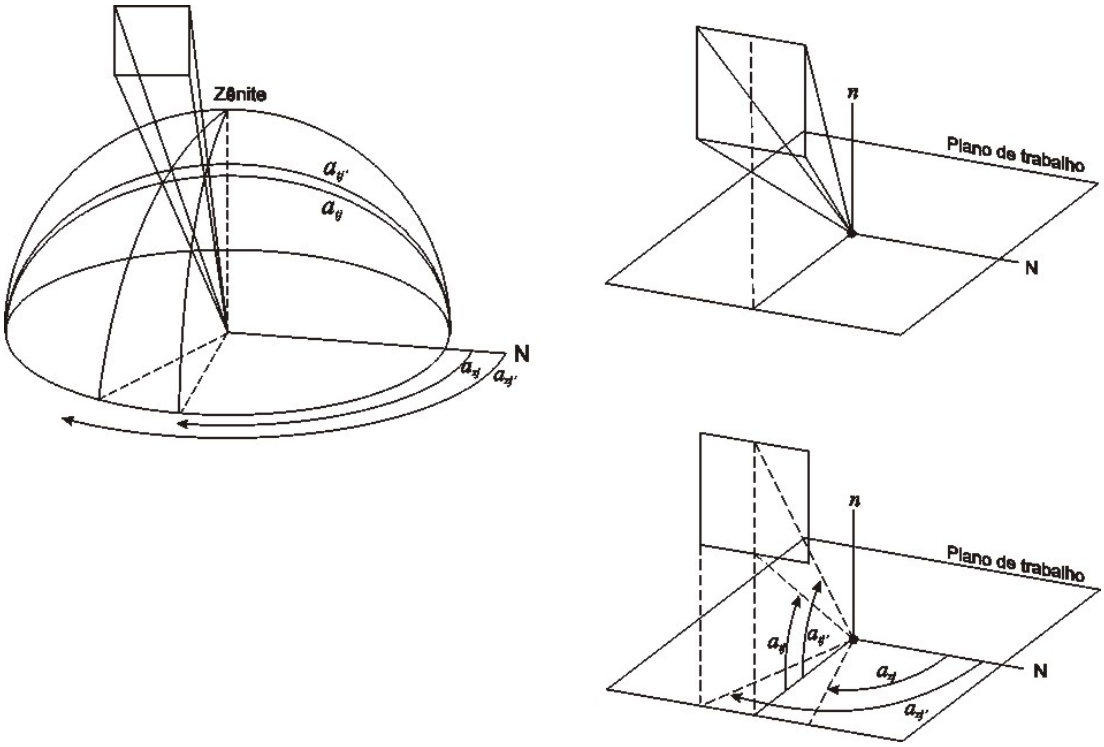



**Figura 2-39 – Princípio do Ângulo Sólido Projetado.**

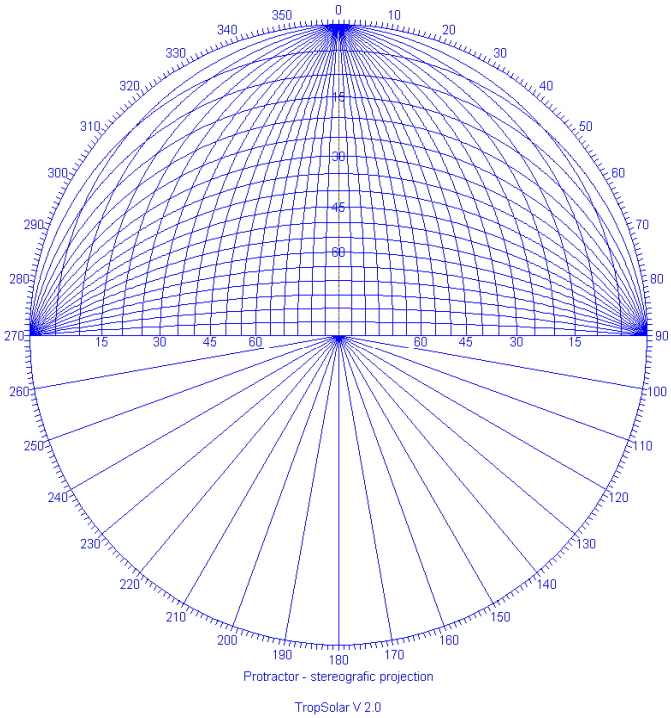



**Figura 2-40 – Medidor de ângulos horizontais e verticais feito por projeção estereográfica. Figura gerada pelo programa Tropsolar v. 2.0 (CABÚS, 2005).**

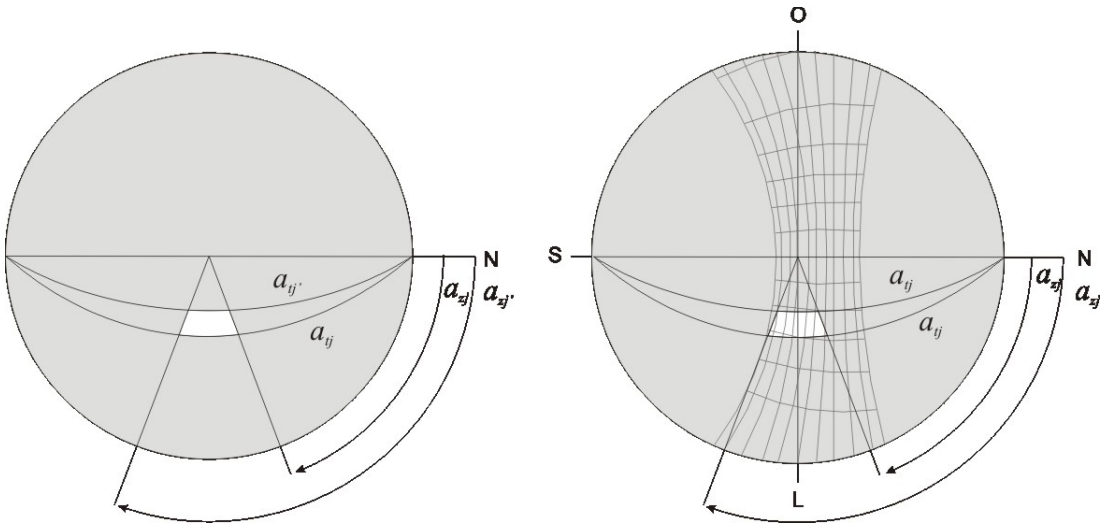



**Figura 2-41 – Traçado da Máscara de Obstrução. A sobreposição da máscara à Carta Solar indica o período do dia e do ano em que o Sol será visível pelo ponto e através da abertura.**

O traçado da Máscara de Obstrução também pode ser usado no projeto de proteções solares. Sobrepondo a Máscara à Carta Solar do local, é possível identificar a região da abóbada celeste visível a partir do ponto e através da abertura.

Isso permite saber se em algum período do dia ou do ano o Sol estará visível. Da mesma forma, é possível estudar a orientação das aberturas, as obstruções do entorno, o dimensionamento e a posição dos protetores solares para sombrear as aberturas no período desejado. Quando a intenção é proteger a abertura constantemente, consideram-se os maiores ângulos, através de pontos situados nas bordas da abertura.

Na determinação dos fatores de céu, quando a linha de obstrução é contínua ou tem pequenas interrupções, o Ângulo Vertical de Céu Visível (AVC) e o Ângulo Vertical de Obstrução (AVO) são usados como ferramentas simplificadas, para avaliar a relação entre o quanto de céu e de obstruções é visto por um ponto a partir de uma abertura. Eles podem ser expressos em percentual, formando o Fator Vertical de Céu ou Componente Vertical de Céu. Ver Figura 2-42.

Como pode ser visto na Figura 2-42, à medida que as obstruções do entorno ficam mais altas, aumenta o AVO e diminui o AVC, até que o céu não mais será visível. Os dispositivos de sombreamento podem reduzir o AVC significativamente.

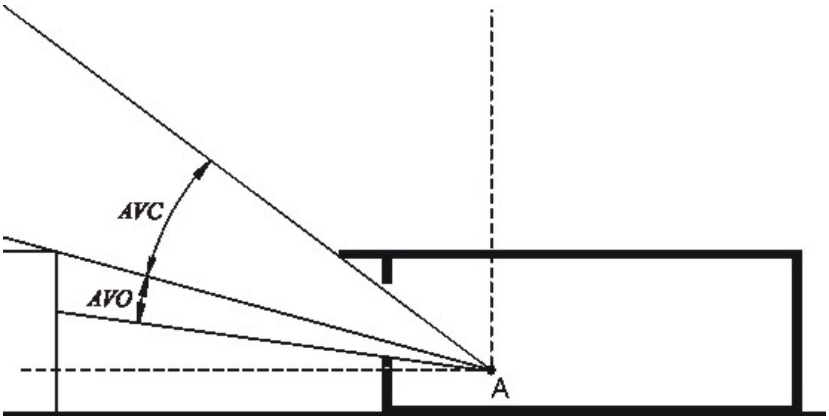



**Figura 2-42 - Ângulo Vertical de Céu Visível (AVC) e Ângulo vertical de obstrução (AVO).**

Em situações onde a linha de obstrução é irregular, pode-se adotar a *linha de obstrução equivalente*. Essa linha representa a altura média dos vários planos que formam a lateral do cânion (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Ver Figura 2-43.

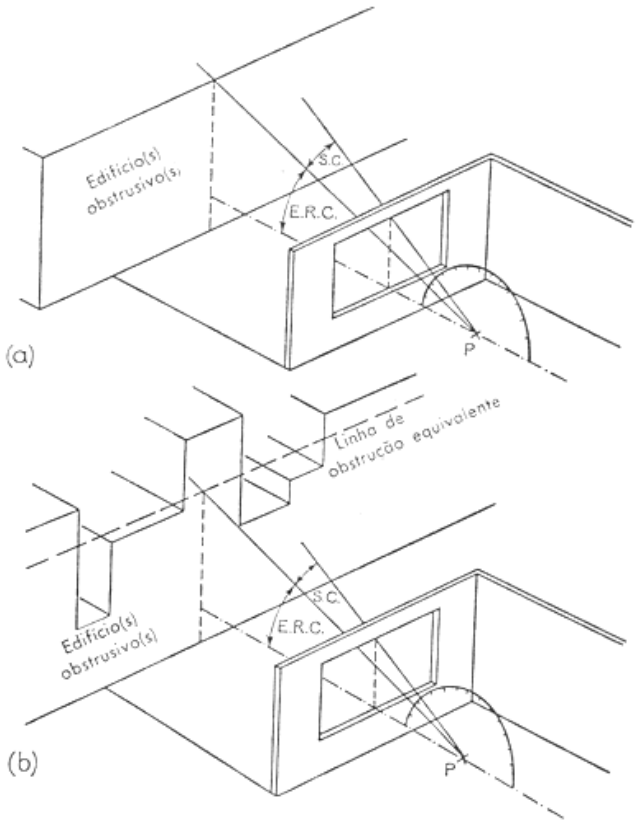



**Figura 2-43 – Linha de obstrução (a) e Linha de obstrução equivalente (b). Fonte (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).**

O cálculo de iluminação artificial se baseia sempre em um valor de iluminância adequado para a tarefa visual. No entanto, a iluminação natural varia constantemente e não proporciona uma iluminância constante como as lâmpadas elétricas. É possível apenas obter uma estimativa dos valores de iluminância em um ponto e de suas variações.

O método mais utilizado para lidar com essa inconstância é o Fator de Luz Diurna (FLD). Esse conceito relaciona a iluminância em um ponto no interior da edificação ($E_i$) com a iluminância simultânea em um ponto externo num plano horizontal desobstruído ($E_e$), expresso em percentual (ABNT, 1991) (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).

Ele tem a vantagem de ser um parâmetro constante para especificar a luz natural, pois considera que a iluminância no interior e no exterior se alteram simultaneamente. Com base nele pode-se avaliar o desempenho de um ambiente

frente à luz natural e estimar as variações na iluminação interna ($E_i$) conhecendo-se as variações externas ($E_e$).

Considerando um céu de luminância uniforme e usando o princípio do ângulo sólido projetado, o FLD de um ponto pode ser relacionado com os ângulos horizontais e verticais, ou seja, com os Fatores de Céu e de Configuração.

Por ser baseado em um céu uniforme, ele desconsidera a luz direta do Sol, que deve ser tratada separadamente. Os valores aferidos com métodos baseados no FLD e em um céu uniforme podem facilmente ser convertidos para o modelo de céu encoberto da CIE, já que esta condição exclui naturalmente a luz solar e apresenta pouca variação (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Vários métodos gráficos para determinação de iluminação natural, como o Diagrama de Waldram, Diagrama de Pleijel ou Transferidores BRS, foram baseados nesse conceito (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).

O método foi desenvolvido nos países do norte europeu baseado, sobretudo, em estudos para o clima temperado, sendo bastante adequado ao seu contexto, onde os céus encobertos são freqüentes, as luminâncias do céu variam menos e a iluminância solar direta é esporádica.

O FLD também pode ser relacionado ao Fator Vertical de Céu, formando o Fator Vertical de Luz Diurna.

Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975), observam que a iluminação natural chega até um ponto no interior da edificação de várias formas diferentes e as agrupa em três categorias para facilitar o cálculo do FLD, dividindo a luz do céu em três componentes:

Quando o ponto estudado não tem Fator de Céu nulo, parte da luz incide diretamente nele, definindo a Componente de Céu (CC) da iluminação natural;

Como já foi visto, o entorno reflete a luz natural, que penetrando pelas aberturas, incide num ponto que tenha um Fator de Configuração, definindo a Componente Refletida Externa (CRE);

Por fim, nem toda luz que penetra pela janela incide diretamente no ponto, incidindo sobre ele após ser refletida pelas superfícies internas, definindo a

Componente Refletida Interna (CRI). Esta componente está ligada ao Fator de Céu e de Configuração das aberturas, por onde a luz natural é admitida. Ver Figura 2-44.

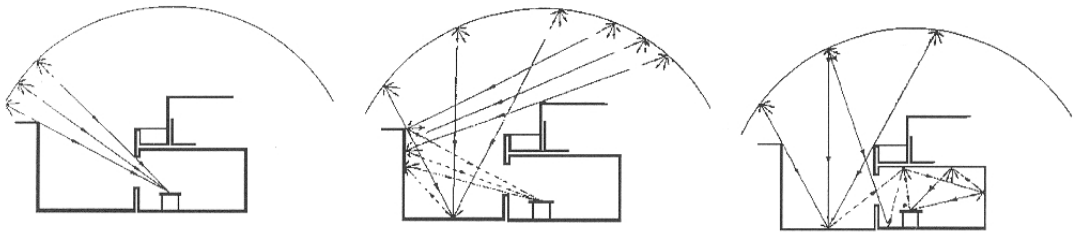


**Figura 2-44 – Componentes de iluminação natural. Fonte (ABNT, 1999).**

### 2.4.1 O entorno

A luz do sol e do céu incide nas superfícies que compõem o entorno natural e construído. Ao refletir essa luz, ele se converte em fonte de luz natural.

O entorno construído tem a particularidade de ser a única fonte de luz natural feita pelo homem. Embora algumas atividades humanas possam interferir na composição da atmosfera, influenciando o processo de difusão da luz, a construção do espaço urbano é a atividade de maior impacto sobre a disponibilidade de luz natural para as edificações.

A geometria da malha urbana é determinante para a luz que chega ao solo e às superfícies do entorno. Essas superfícies obstruem a visão do céu, e por isso são tratadas por obstruções do entorno. Em situações onde o céu não pode ser visto, é delas e do solo que provém toda iluminação natural no interior.

Em cidades com alta densidade construtiva, os edifícios obstruem boa parte da visão do céu e se tornam a maior ou a única fonte de luz natural, nesse caso, luz refletida. Nesses casos, o tratamento das fachadas e do solo é determinante para as condições de iluminação das edificações. A Figura 2-45 mostra, como exemplo, fotos da cidade de Hong Kong, uma das mais densas do mundo, onde o planejamento urbano para o aproveitamento da luz natural tem sido uma preocupação constante do poder público (NG, 2002).

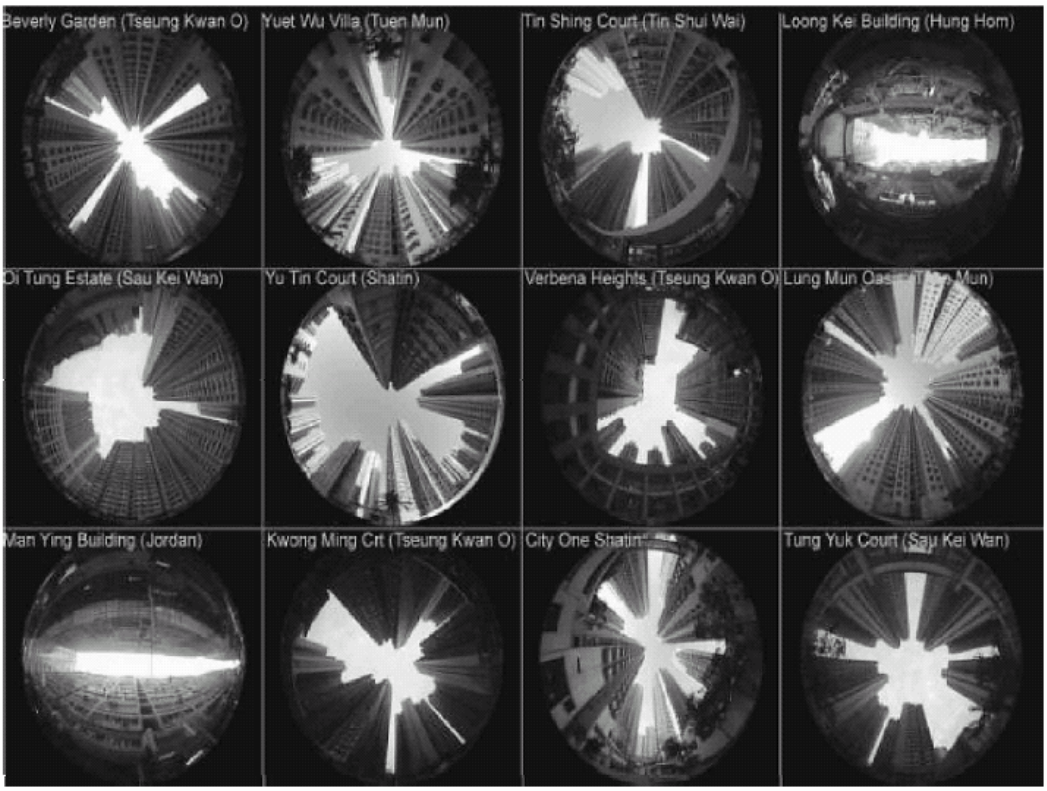



**Figura 2-45 Fotos da cidade de Hong Kong utilizando uma lente "olho de peixe" apontada para o zênite. Fonte (NG, 2002).**

Por causa da importância da iluminação natural e da influência que o entorno construído exerce sobre ela, o ato de edificar no espaço urbano tem sido controlado pelo poder público, a fim de preservar condições ambientais adequadas.

A relação entre a disposição das construções e o movimento do Sol já era considerada desde a Pré-história, aproveitando-o como fonte de aquecimento ou protegendo-se dele por sombreamento.

De acordo com ENARCH'83 (apud LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997), na Roma antiga, o imperador *Ulpiano* criou o *Heliocaminus*, uma lei para garantir ao povo romano do século II d.C. o direito ao Sol, através do regulamento do ato de edificar.

Segundo Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975), existe um direito legal de livre acesso da luz natural nas janelas de um edifício. Este "direito legal à luz" influencia o projeto de edifícios em relação aos edifícios vizinhos, a fim de preservar uma iluminação natural adequada. Ele tem origem no direito romano e vigora no Reino Unido há muito tempo, embora até 1922, não especificasse o que seria luz

natural adequada. De acordo com Ng (2002), na Inglaterra do século XVIII já havia regulamentos para controlar a edificação em função da luz natural. Nesta época, as maiores preocupações eram sanitárias e visavam ao combate de epidemias.

Tem sido uma preocupação constante, evitar que os edifícios causem séria obstrução à luz natural dos vizinhos. Há vários códigos, normas e regulamentos de edificação que foram elaborados para impedir a obstrução externa das janelas. Estes instrumentos de planejamento procuram determinar a altura dos edifícios circundantes e definir afastamentos frontais e laterais mínimos para que seja possível alguma visão do céu em todos os pavimentos de uma edificação. Isso se choca muitas vezes com os interesses imobiliários, porque afeta o aproveitamento e valorização do solo urbano.

Segundo Ng (2002), entre os primeiros regulamentos de edificação de Hong Kong, baseados em legislação britânica do século XVIII, já havia o controle da altura dos edifícios em relação à largura das ruas como recurso para permitir uma melhor iluminação natural. O *Building Ordinance* de Hong Kong, de 1903, determinava que a altura do edifício não excedesse a largura da rua, uma razão entre largura e altura de 1/1, ou um Ângulo Vertical de Obstrução de 45°. Alterações ocorridas na legislação em 1953, já permitiam seções transversais das ruas com razões 1/2, 1/3 e 1/4. Esses números faziam referência à lei de zoneamento de Nova York e Chicago, nos Estados Unidos da América.

O regulamento da iluminação natural na edificação inicialmente se detinha no dimensionamento dos elementos construtivos, como o controle da área das aberturas em relação à área do piso e o controle da profundidade dos ambientes.

Com o avanço dos estudos na área, o Fator de Céu, definido pelos ângulos de obstrução verticais e horizontais, foi se estabelecendo como parâmetro de desempenho luminoso. Como não havia nenhum padrão para definir a boa iluminação natural, a partir do ano de 1922, no Reino Unido, definiu-se como nível crítico de iluminação um Fator de Céu de 0,2%. Por volta de 1966, o *Daylight Code*, desenvolvido pelo *Ministry of Housing and Local Government*, sob parecer da *Building Research Station*, adotava Fator de Céu mínimo de 1%, sobre um plano a 0,85m acima do piso e a uma distância de 3,6m da janela, para uma janela

considerada padrão na Inglaterra (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).

Ainda no Reino Unido, novos estudos pesquisaram os níveis apropriados de iluminação e foram definidos padrões adequados por tarefa visual. Esses padrões eram relacionados a Fatores de Céu e FLD's no plano da fachada, determinados através do cone de visão de um ponto de referência, ou seja, ângulos de obstrução horizontais e verticais.

Para facilitar a determinação dos fatores foram criados na Inglaterra os *Indicadores de Alturas Admissíveis* que relacionam o fator de céu aos ângulos verticais e horizontais determinados por um ponto no centro da janela e pelas obstruções do entorno. Este instrumento controla simultaneamente a altura e os afastamentos entre edifícios (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). Ver Figura 2-46.

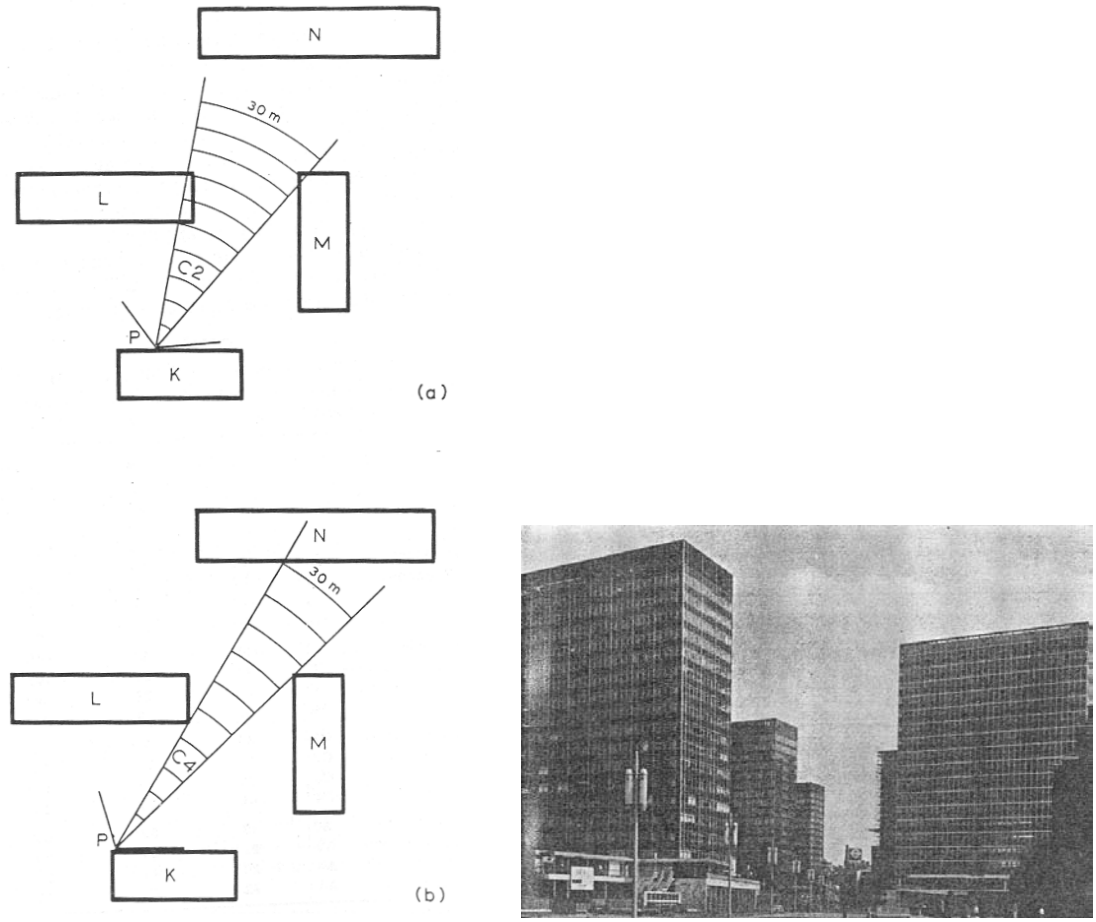



**Figura 2-46 – Indicadores de Alturas Admissíveis utilizado pelo governo britânico para estudo de edifícios adjacentes, no tocante à obstrução do céu. Fonte (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975).**

Atualmente, em alguns países, as preocupações do poder público ligadas ao desenho urbano e aproveitamento da luz natural, vão além da garantia do "direito à luz". O crescimento das cidades, e o conseqüente adensamento do solo urbano, têm ocorrido em ritmo acelerado. O consumo de energia das edificações, do qual boa parte é representada pela iluminação artificial, se converteu em um sério problema ambiental. Mais do que garantir a disponibilidade de luz natural na edificação, os objetivos agora se voltam para a ampliação dessa disponibilidade, comprometidos com a sustentabilidade do espaço construído.

É sabido que uma melhor iluminação natural pode ser obtida por um *planeamento aberto*, em que os blocos de edifício são dispostos a fim de permitir a penetração da luz natural por entre os blocos e por cima deles.

Stevens (1969) mostra uma comparação entre diferentes arranjos de blocos com mesma área e afirma que o arranjo em linhas paralelas, tão comum na maioria das cidades, não é o mais eficiente quando comparado com o arranjo formado por blocos perpendiculares ou de planta cruciforme. Com arranjos formando pátios, o resultado também é menos eficiente. O autor observa que a melhor iluminação de tais arranjos, se deve à linha de obstrução descontínua formada pelos blocos, que proporciona maiores fatores de céu. Ver Figura 2-47.

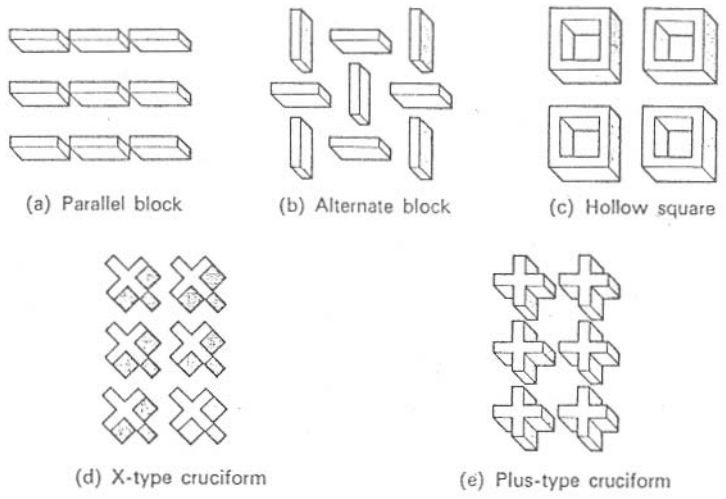



**Figura 2-47 - Comparação entre arranjos de blocos com mesma área construída. Os arranjos "a" e "c" são menos favoráveis. Fonte (STEVENS, 1969)**

O arranjo linear das edificações é o mais comum nas cidades e se relaciona com o traçado das ruas, permitindo maior adensamento. Os três espaços mais

comuns na malha urbana são as ruas, o cruzamento de ruas e os espaços abertos (praças, parques, estacionamentos etc). Ver Figura 2-48. O espaço da rua ladeado por fachadas de edifícios forma o cânion urbano (BROWN; DEKAY, 2004), que dentre os outros, apresenta proporcionalmente o menor fator de céu e, portanto, tem a iluminação mais influenciada pelas reflexões do entorno.

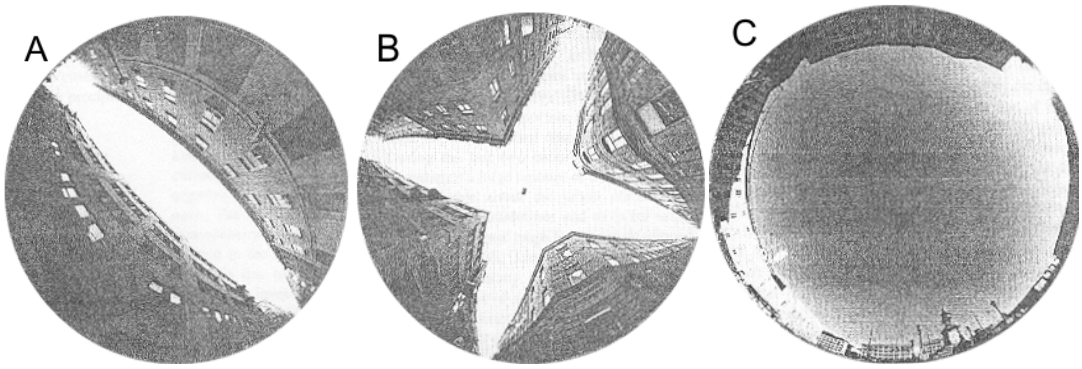



**Figura 2-48 – Configurações espaciais mais comuns na malha urbana: cânion urbano (a); cruzamento de ruas (b) e espaços abertos (c). Fotos com lente "olho de peixe" apontada para o zênite. Fonte (ELIASSON, 2000).**

**Figura 2-49 – Cânion Urbano em Maceió. Fonte Ricardo Cabús.**

O fenômeno urbano dos cânions de grande altura aparece como conseqüência da valorização do solo urbano, que conduz ao adensamento e a verticalização. Com o constante crescimento das cidades e adensamento das áreas mais valorizadas, o poder público é pressionado pelo mercado imobiliário a permitir construções de grande

altura, com pequenos afastamentos e altos coeficientes de aproveitamento, transformando as vias em cânions urbanos de baixo Fator de Céu.

Em casos onde a linha de obstrução é contínua ou apresenta pequenas descontinuidades entre edificações, os Fatores de Céu adequados também podem ser relacionados ao ângulo de obstrução vertical, que também pode ser expresso pela razão entre a largura da rua e a altura das fachadas (L/A). Considerando um céu encoberto na Inglaterra, Littlefair (1991) recomenda como parâmetro para ruas com residências, um ângulo vertical de obstrução de 25°, perpendicular à abertura, em relação a um ponto a 2m do solo e coincidindo com um Fator de Céu Vertical de 27%. De acordo com Ng (2002), a legislação de Hong Kong também adota um sistema baseado em Fator de Luz Diurna Vertical, coincidindo com um ângulo de obstrução vertical de 71,5°. Ver Figura 2-50.

**Figura 2-50 - Cidade de Hong Kong. Fonte (NG, 2002).**

Uma outra abordagem da questão do adensamento construtivo e obstrução de céu foi feita através do controle da volumetria da edificação para limitar a obstrução do céu. O *envelope solar,* proposto por Knowles e Berry (apud PEREIRA, 1995), é definido como "o maior volume que uma edificação pode ocupar de forma a permitir o acesso ao Sol e luz natural da vizinhança imediata". Brown e DeKay (2004) tratam esta ferramenta de planejamento urbano por *prismas* de luz e de sol. Ela define o volume máximo permitido através dos ângulos horizontais e verticais, entre as obstruções do entorno e um ponto de referência, geralmente nas aberturas da edificação considerada.

O Envelope Solar induz à baixa densidade construtiva do espaço urbano e ao surgimento de blocos tronco-piramidais, com fachadas inclinadas para fazer uso do máximo volume permitido (PEREIRA, 1995). Ver Figura 2-51 e Figura 2-52.

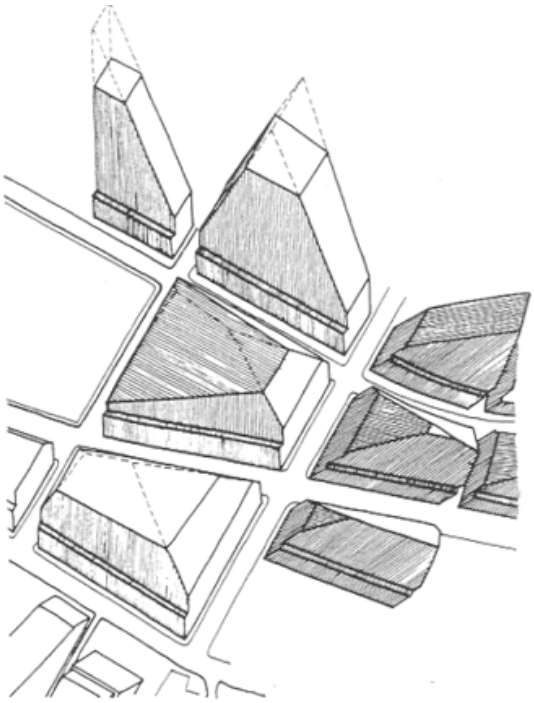


**Figura 2-51 – Primas de Sol para limitação de volumetrias em Toronto, Canadá. Fonte (BROWN; DEKAY, 2004).**

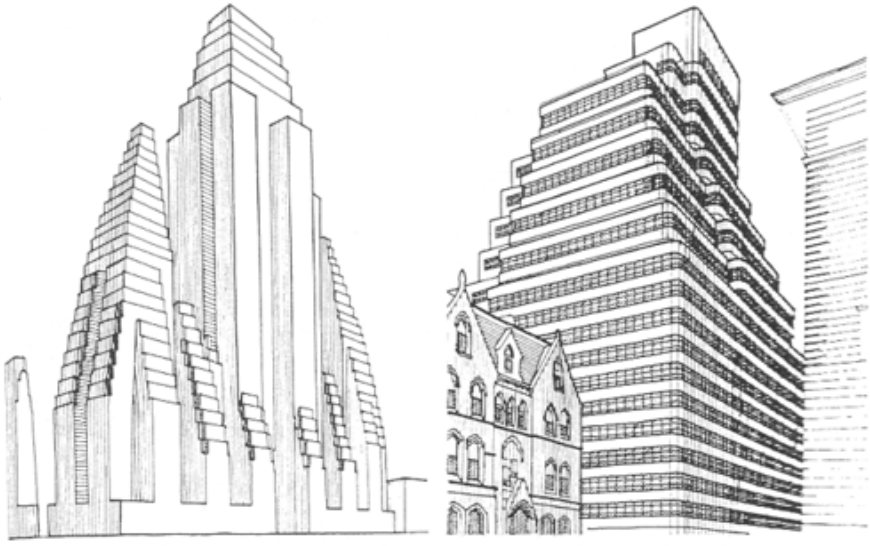


**Figura 2-52 – Prismas de iluminação. Estudo de zoneamento de Nova York de 1916 e edifício Look, na mesma cidade, em 1949, Emery Roth & Sons. Fonte (BROWN; DEKAY, 2004).**

O Código de Edificações da cidade de Maceió, Lei n° 5354/2004 (MACEIÓ, 2004) exerce o controle do adensamento urbano, determinando afastamentos mínimos, coeficientes de aproveitamento, taxas de ocupação, e às vezes gabaritos de altura. No entanto, a referida lei não faz menção a nenhum dos instrumentos de planejamento urbano para a iluminação natural, dentre os comentados anteriormente. Não aparece nenhuma relação dos parâmetros construtivos com fatores de céu ou FLD.

Embora a Lei n° 3537/1985 trouxesse parâmetros de dimensionamento de aberturas, na Lei n° 5354/2004 que vigora atualmente, a iluminação natural na edificação é tratada apenas pela recomendação de que sejam seguidas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) pertinentes.

Até 1995, as normas da ABNT, não contemplavam muitos dos aspectos relacionados à iluminação (SCARAZZATO, 1995). Pode-se incluir entre esses aspectos o planejamento urbano para o aproveitamento da luz natural, ficando a NBR 5413, já comentada na subseção 2.2.1, como uma das poucas referências (ALUCCI & SCARAZZATO, 1997).

Felizmente, através do Projeto 02:135.02.001, de junho de 1999, a ABNT estipula métodos gráficos para a determinação dos Fatores de Luz Diurna (FLD) e da iluminância em interiores, além da análise da abóbada celeste (ABNT, 1999). Ainda assim, faltam dados sobre os céus brasileiros.

### 2.4.2 Iluminação natural nos trópicos

Como abordado na subseção 2.3.2, o clima local influencia a disponibilidade de luz natural de um lugar. Ele engloba condições de nebulosidade e de radiação solar, mas também influencia o desenho das edificações e da cidade, porque determina condicionantes de conforto térmico.

Nos trópicos, o desconforto térmico devido à radiação intensa e freqüente, gera a necessidade de sombreamento durante todo o ano. O uso de proteções solares pode causar redução considerável do Fator de Céu das aberturas. Este fator, representado por ângulos verticais e horizontais de obstrução, tem sido o principal parâmetro para determinar condições de iluminação natural adequadas. No caso do

trópico úmido, a necessidade de proteger aberturas e fachadas das chuvas freqüentes, mantendo a ventilação natural, agrava ainda mais esta obstrução do céu.

Esta condição é diferente da encontrada em climas frios e temperados de latitudes subtropicais. Nestes climas, os céus encobertos são mais freqüentes e a disponibilidade de insolação é menor. A radiação solar direta é considerada uma fonte de aquecimento agradável, em particular, durante a estação fria, o que reduz a necessidade de proteção.

A nebulosidade local, que está relacionada ao clima, influencia a disponibilidade de luz porque determina o tipo de céu mais freqüente. Isto precisa ser levado em consideração para definir as melhores estratégias para o aproveitamento luminoso.

Sob condições de céu encoberto a iluminância solar direta não está presente. A nebulosidade aumenta a difusão da luz, o céu é a maior fonte de luz natural e a luminância do entorno é da ordem de 10% da luminância do céu (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975). O ofuscamento quando ocorre, é devido ao céu, bem mais luminoso que o entorno. Ver Figura 2-56.

Nessas condições a obstrução do céu por edifícios representa um sério prejuízo para a iluminação natural (LITTLEFAIR, 1991) (STEVENS, 1969).

Nos países nórdicos, onde predomina o clima temperado e os céus encobertos, os estudos sobre planejamento urbano para o aproveitamento da iluminação natural tiveram um grande desenvolvimento e servem de referência para todo o mundo. Eles demonstram grande preocupação em garantir que o entorno construído não obstrua a visão do céu e permita a insolação das aberturas. Instrumentos de planejamento urbano como os Prismas de Luz, Envelope Solar ou os Indicadores de alturas admissíveis foram desenvolvidos dentro desta ótica.

A condição dos trópicos é diferente. O predomínio dos céus claros e parcialmente nublados torna a radiação direta intensa e freqüente. O que impõe a necessidade de sombreamento, mas também gera uma disponibilidade considerável de luz refletida.

A radiação solar direta sobre o plano de trabalho é prejudicial ao conforto luminoso por causa do alto nível de contraste que ela gera. No entanto, devido à

reflexão difusa dos materiais, essa radiação pode se converter em iluminação difusa quando refletida pelo entorno e também por dispositivos de sombreamento, podendo tornar-se um recurso de iluminação natural importante.

Sob condições de céu claro a atmosfera é mais seca e brilha menos A ausência de nuvens faz com que a radiação direta incida sobre o entorno continuamente, tornando-o mais luminoso que o céu e a principal fonte de luz difusa. Apesar de também ser a maior fonte de ofuscamento. Nessa condição, a luminância de superfícies claras e ensolaradas é da ordem de quatro vezes ou mais a luminância do céu. (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) (LAM, 1986). Ver Figura 2-56.

Nas cidades, o desenho urbano pode conduzir o entorno dos edifícios a promover um maior aproveitamento da luz natural. A arquitetura vernácula de regiões do trópico-seco, onde predomina o céu claro, demonstra possibilidades de se obter conforto térmico e aproveitamento da luz natural, combinando sombreamento e luz refletida.

Com edificações muito próximas, formando ruas estreitas, cobertura nas ruas e protetores solares horizontais, as construções obstruem muito a visão do céu, mas obtêm um maior sombreamento conjunto. Isso reduz a superfície exposta às fortes radiações solares, aumenta a massa térmica e cria ruas sombreadas que protegem do ofuscamento e do calor intenso, aonde a luz do Sol chega por reflexão. O uso de cores claras absorve menos radiação e reduz o aquecimento das superfícies, aumentando a luz refletida. Somado a isso, as edificações possuem pátios internos que são verdadeiros difusores da luz solar. Os cômodos se distribuem em volta desses pátios, aproveitando a luz refletida (FATHY, 1986) (BROWN; DEKAY, 2004) (BITTENCOURT & CÂNDIDO, 2005). A Figura 2-53, Figura 2-54 e Figura 2-55 mostram exemplos de construções do trópico-seco.

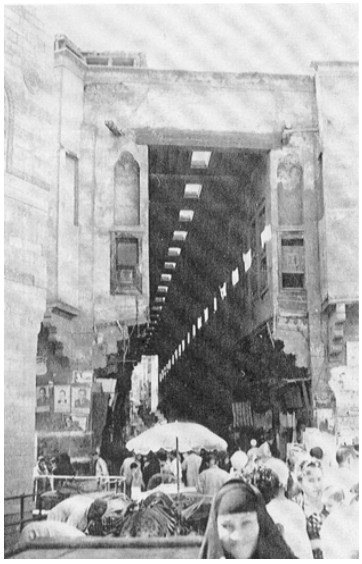


**Figura 2-53 – Rua coberta no Cairo, Egito. Fonte (FATHY, 1986).**

**Figura 2-54 – Vista aérea da cidade de Marrakeche, no Marrocos. Os pátios aparecem em grande quantidade e as ruas mal podem ser notadas. Fonte (FATHY, 1986).**

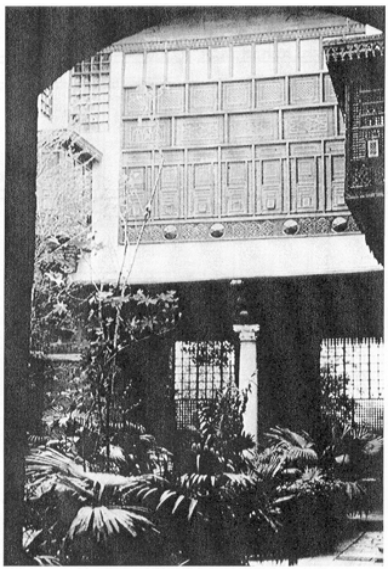


**Figura 2-55 – Pátio interno em uma residência no Cairo, Egito. Fonte (FATHY, 1986).**

O céu parcialmente nublado, comum no trópico-úmido, combina características semelhantes ao céu claro e ao céu encoberto. As nuvens espaçadas deixam aparente o céu azul, mais brilhante que o do trópico-seco, e permitem a presença da iluminância solar direta. As nuvens podem obstruir o sol, bloqueando a iluminância solar e adquirindo contornos extremamente brilhantes. Por vezes elas podem estar na direção oposta a ele e formar superfícies refletoras de uma luminância considerável. Embora inconstante e com grandes variações, a radiação difusa e direta é alta e converte o entorno em uma fonte de luz importante. Ver Figura 2-56.

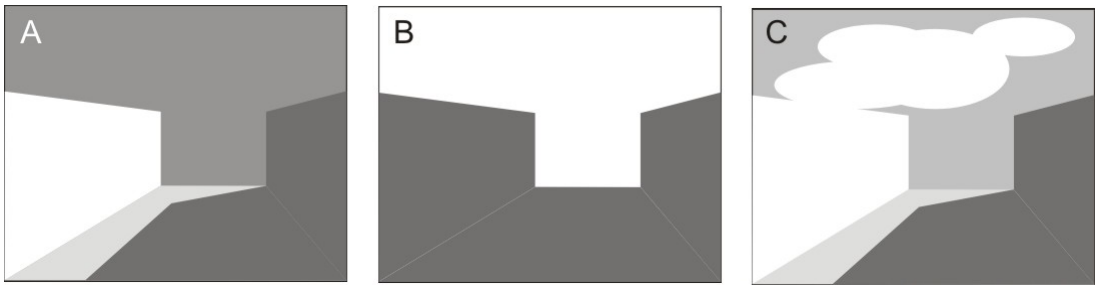



**Figura 2-56 – Relação entre tipo de céu, entorno e iluminação natural: "A" céu claro, "B" céu encoberto e "C" céu parcialmente nublado. Adaptado de (BAKER, FANCHIOTTI, STEEMERS, 1998) e (LAM, 1986).**

No trópico-úmido, a radiação solar intensa também gera a necessidade de proteção. A estratégia passiva mais indicada para o conforto térmico é aliar o

sombreamento à ventilação. A dissipação do calor por ventilação necessita de edificações mais dispersas que permitam a circulação do ar. Uma boa solução de sombreamento para o trópico úmido é utilizar elementos como brises, cobogós, toldos, marquises, venezianas etc. que são eficientes em proteger do sol e permitir a ventilação natural, podendo ainda ser utilizados para refletir luz (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997) (BITTENCOURT & CÂNDIDO, 2005).

Eles podem ser projetados para obstruir a visão do céu apenas o necessário para o sombreamento, embora ainda tenham o importante papel de possibilitar que as janelas permaneçam abertas durante as chuvas freqüentes. A obstrução do céu é necessária, mas o aproveitamento da luz refletida pode compensar esta perda.

Um desenho urbano que busque o aproveitamento da luz refletida como alternativa à obstrução do céu para sombreamento, deveria voltar sua atenção para as refletâncias médias do entorno. A luminância do entorno depende da sua refletância e iluminância. Nos trópicos a radiação solar direta é um recurso importante para aumentar a iluminância no entorno. Tal objetivo precisa considerar a geometria solar para prever o sombreamento e os ângulos de incidência dessa radiação. Precisa também conhecer a iluminância solar normal no nível da superfície.

Embora alguns autores reconheçam o potencial da luz refletida pelo entorno (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975) (LAM, 1986) (CABÚS, 2004), a maior parte dos estudos sobre desenho urbano e iluminação natural, parece não explorar esse recurso, principalmente no que se refere à luz solar refletida.

Os instrumentos de planejamento comentados anteriormente não adotam parâmetros de refletância do entorno. Baseiam seus parâmetros apenas em fatores de céu, combinados ou não ao FLD, sem considerar as orientações envolvidas ou a utilização de proteções solares nas aberturas.

O FLD se baseia na iluminância de um plano horizontal desobstruído e exclui a radiação solar, por isso, subestima a luz refletida pelo entorno. Utilizado como parâmetro para os instrumentos normativos comentados anteriormente, baseia-se no padrão de céu encoberto da CIE, desconsiderando a orientação. Sendo dessa forma, mais adequado aos climas frios e temperados, onde o céu encoberto é mais freqüente.

Robbins (1986) adaptou os Indicadores de Alturas Admissíveis para diferentes latitudes e para o céu claro. No entanto, ainda não considerava a orientação da abertura e das obstruções, não fazendo uso da geometria solar para estimar a insolação no entorno.

Instrumentos como o Envelope Solar, foram pensados para garantir a insolação das aberturas, como fonte de aquecimento. Foi Pereira (1995) quem adaptou esse instrumento para as condições de Florianópolis-Brasil, utilizando-o para proporcionar sombreamento, além de insolação.

Cabús (2002) afirma que embora ao longo do século XX, os estudos sobre iluminação natural tenham avançado nos países de clima temperado, os trópicos ainda carecem de métodos mais adequados. Isso se aplica também ao desenvolvimento de instrumentos de planejamento urbano que considerem o aproveitamento da luz natural. Combinar fatores de céu com necessidades de sombreamento e uso da luz refletida pode ser um caminho para se atingir esse objetivo.

O Fator de Céu dos espaços da cidade, avaliado através das Máscaras de Obstrução, é importante para a luminância do entorno porque influencia o tempo de insolação desse espaço e afeta a quantidade de radiação difusa incidente (TREGENZA, 1995). No entanto, como parâmetro único de desempenho, nas condições dos trópicos parece ser insuficiente.

Adotando um ponto de referência no peitoril das janelas, é possível analisar a obstrução do céu pelas obstruções do entorno e pelos protetores solares simultaneamente. A sobreposição da Máscara de Obstrução à Carta Solar, permite a análise da geometria solar para entender a incidência do Sol no entorno.

As refletâncias do entorno podem ser tratadas através de médias. A luminância relaciona-se com o coeficiente de reflexão, com a iluminância e com a área aparente. A refletância média é obtida ponderando a refletância de cada superfície do entorno pela sua área aparente em relação a um ponto. O fator de ponderação pode ser obtido dividindo a área aparente da superfície pela área total do campo de visão do ponto considerado. A Figura 2-57 mostra uma fotografia de entorno com lente “olho de peixe”. É possível observar que áreas iguais em valor absoluto podem ter áreas aparentes bem diferentes, quando projetadas em um ponto.

**Figura 2-57 – Fotografia da cidade de Hong Kong, feita com lente "olho de peixe". Fonte (NG, 2005).**

Como a iluminância é determinada em relação a um ponto, a distribuição de luminâncias da fonte de luz (entorno construído) equivale a sua luminância média na determinação da iluminância num ponto considerado. A Figura 2-58 demonstra como as diferentes luminâncias da fonte, ao serem projetadas em um ponto, tendem a uma luminância resultante média.

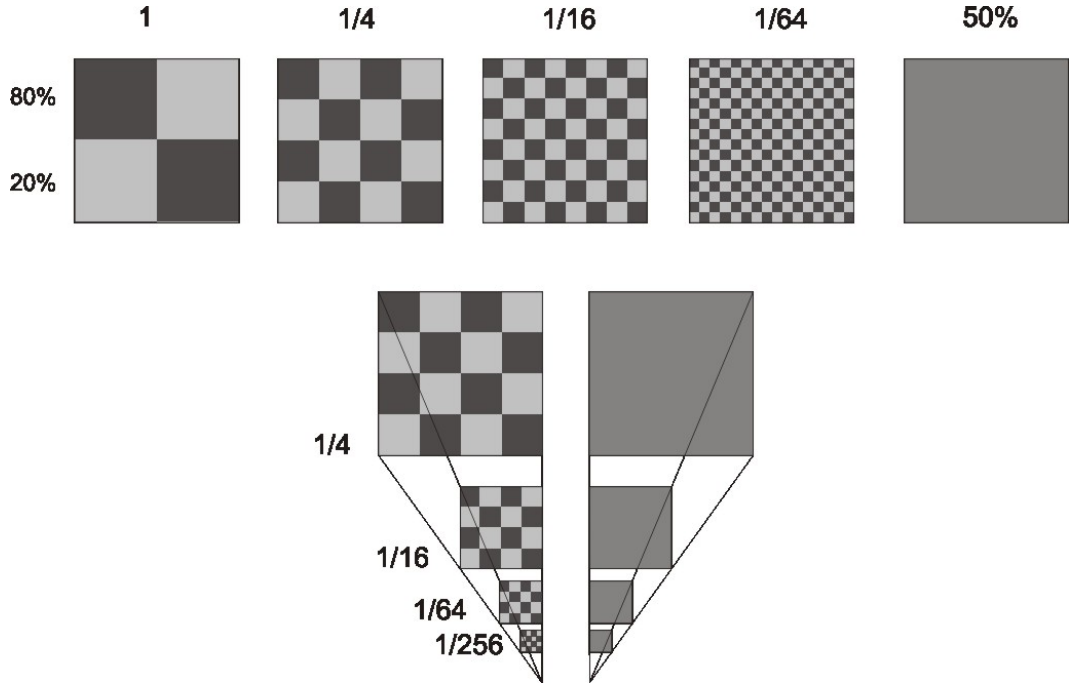



**Figura 2-58 – Demonstração do princípio da refletividade média. Ao se projetar em um ponto, as diferentes luminâncias do campo visual do ponto considerado se fundem em uma luminância média.**

Todas as superfícies refletem luz continuamente em trocas constantes de fluxo. A luz refletida é sem dúvida a parte mais complexa do cálculo de iluminação.

Em cânions urbanos os efeitos da reflexão entre as fachadas e o solo são difíceis de prever, dificultando a determinação da iluminação interior das edificações.

Conhecendo-se a iluminância solar normal ($E_{sn}$) e utilizando as expressões abaixo, é possível convertê-la em iluminância solar horizontal ($E_{sh}$) e vertical ($E_{sv}$), que incidirá no solo e nas obstruções (TREGENZA 1995):

$$E_{sh} = E_{sn}\ sen\ a_t \qquad (15)$$

$$E_{sv} = E_{sn}\ cos\ a_t\ cos\ (a_f - a_z) \qquad (16)$$

Onde: $a_t$ é a altura solar; $a_z$ é o azimute solar e $a_f$ é o azimute da normal do plano da fachada. Isto significa que a iluminância solar depende do ângulo de incidência. Com elevadas alturas solares, a iluminância é mínima nas fachadas e máxima no solo. Essa situação se inverte em baixas alturas. No entanto, a alta luminância do solo aumenta a iluminância nas fachadas e o inverso também ocorre. Esse processo é chamado de inter-reflexão.

No trópico úmido, a ocorrência mais freqüente é o céu parcialmente nublado, cujas variações constantes de iluminância horizontal e vertical são uma complexidade a mais para a determinação de iluminâncias.

A utilização de programas de computador que simulem a luz do céu e do sol, a reflexão das superfícies e o céu parcialmente nublado, nas condições do tropico úmido, pode ajudar a determinar iluminâncias internas e entender como diferentes modelos de geometria urbana se comportam e influenciam a iluminação de interiores.

Cabús (2002) desenvolveu o programa TropLux, como ferramenta para sua tese de doutorado. Este programa utiliza a técnica do raio traçado para trás (Backward Raytracing) com o Método Monte Carlo e os coeficientes de luz natural, permite calcular a iluminância num ponto ou superfície, em função da trajetória da

luz entre a fonte e o alvo, separando as contribuições do Sol e do céu em até 12 componentes.

O método do Raio Traçado foi desenvolvido inicialmente para a computação gráfica e permite o tratamento eficiente de geometrias complexas e reflexões de luz (CABÚS, 2002).

As reflexões difusas são calculadas com o método Monte Carlo, um método estatístico que lida com números randômicos e margens de erro determinadas pelo usuário (CABÚS, 2002).

A divisão da iluminância em componentes permite que se tenha, além da iluminância resultante em um ponto, a especificação da contribuição de diferentes fontes para esta iluminância, permitindo que se avalie o peso de cada uma na iluminância aferida no ponto em questão. Esse recurso é importante para avaliar a contribuição das componentes refletidas CRE e CRI em relação à componente direta: CC.

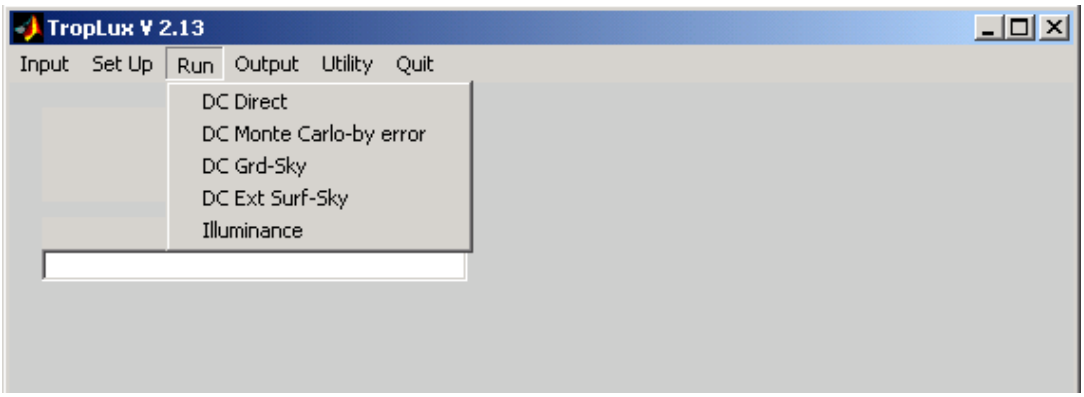



**Figura 2-59 – Tela do programa Troplux. Fonte (CABÚS, 2006).**

O programa permite a criação e o cálculo de geometrias complexas, configuração das características de reflexão e transmissão das superfícies, simulação de iluminação natural em qualquer orientação, coordenadas geográficas, data e hora (CABÚS, 2004). Ver Figura 2-59.

O programa permite também a utilização dos 15 modelos de céu da CIE, mostrados na Tabela 2, na subseção 2.3.4, que abrangem o céu parcialmente nublado em qualquer latitude.

A iluminância difusa do céu pode ser definida através de dados medidos, ou calculada com base em algoritmos definidos por Tregenza, ou ainda pelos da IES (CABÚS, 2005). Esse valor serve de base para determinar a iluminância do zênite e toda distribuição de luminâncias do céu. A expressão utilizada pela IES é:

$$E_{kH} = A + B\ sen C\ a_t \qquad (17)$$

Onde: $E_{kH}$ é a iluminância horizontal difusa; $A$, $B$ e $C$ são parâmetros relacionados ao tipo de céu (Ver Tabela 3) e $a_t$ é a altura solar (IES, 1984). Ver Figura 2-60 com iluminâncias horizontais difusas por tipo de céu e altitude solar. Sob céu parcialmente nublado os valores são bem mais altos.

**Tabela 3 – Parâmetros da IES para cálculo da Iluminância Horizontal Difusa. Fonte IES (1984).**

| Condição de céu | A | B | C |
|---|---|---|---|
| Claro | 0,8 | 15,5 | 0,5 |
| Parcialmente Nublado | 0,3 | 45,0 | 1,0 |
| Encoberto | 0,3 | 21,0 | 1,0 |

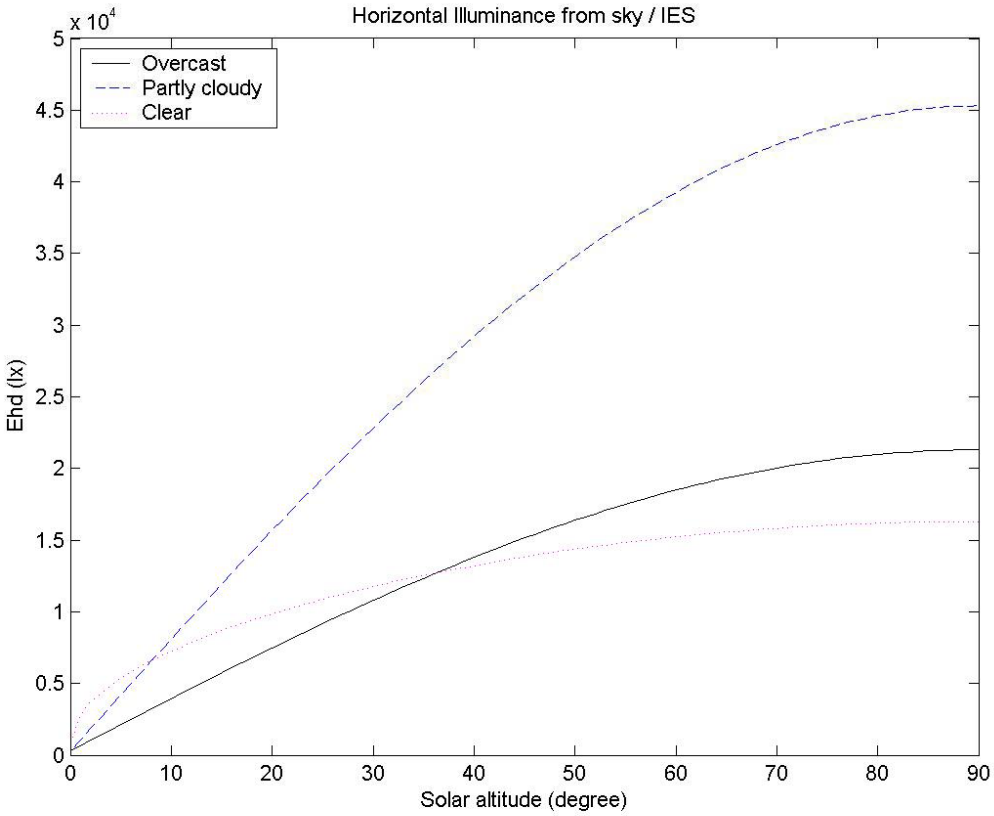



**Figura 2-60 – Gráfico da função de iluminação horizontal difusa, por altura solar. Fonte: imagem gerada pelo programa TropLux V. 2.13 (CABÚS, 2006).**

A iluminância solar normal é calculada pelo método da CIE, que leva em consideração a massa de ar óptica ($m$), a extinção luminosa ($a_v$) sobre atmosfera clara e seca (*Rayleight*) e o fator de turbidez ($T_v$). O gráfico da função para o padrão de céu 10 da CIE, na localização de Maceió, no dia 22 de dezembro pode ser visto na Figura 2-61. A princípio calcula-se a iluminância solar horizontal extraterrestre ($E_v$) pelas expressões (CIE, 1999):

$$E_v = \hat{E}_{vo} \cos a_t \qquad (18)$$

$$\hat{E}_{vo} = E_{vo} \epsilon = 133{,}8 \{1 + 0{,}0334 \cos [360/365{,}25 (J - 2{,}7206°)]\} \; klx \qquad (19)$$

Onde: $E_v$ é a iluminância solar horizontal extraterrestre; $\hat{E}_{vo}$ é a constante solar corrigida para o dia do ano; $E_{vo}$ é a constante solar (133,8 klx); $a_t$ é a altitude

solar; $\epsilon$ é o fator elipsoidal e $J$ é o dia do ano ($0 < J < 365$). Em seguida, encontra-se a iluminância solar horizontal na superfície ($P_v$) pelas expressões (CIE, 1999):

$$Pv = Ev \exp(- av\ m\ Tv) \qquad (20)$$

$$a_v = 1 / 9{,}9 + 0{,}043\ m \qquad (21)$$

$$m = 1 / \text{sen}\ a_t + 0{,}50572\ (a_t + 6{,}07995°)\ -1{,}6364 \qquad (22)$$

$$T_v = -In\ P_v / E_v / a_v\ m \qquad (23)$$

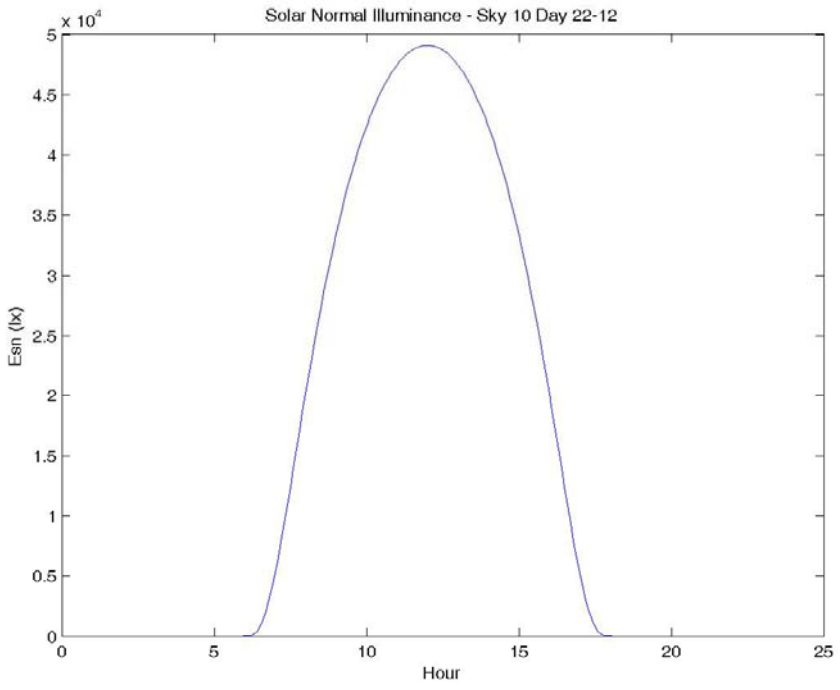



**Figura 2-61 - Gráfico da função de iluminância solar normal, por horário do dia, para o padrão de céu 10 da CIE (parcialmente nublado) na localização de Maceió – AL, no dia 22 de dezembro. Fonte: imagem gerada pelo programa TropLux V. 2.13 (CABÚS, 2006).**

Um dos fatores importantes para os métodos de cálculo de iluminação é o tempo de processamento requerido. O método do Raio Traçado combinado aos coeficientes de luz natura (CLD), utilizado pelo programa TropLux, apresenta vantagens quanto a esse requisito no tocante à variações na distribuição de

luminâncias do céu e na orientação das aberturas, embora não possibilite o reprocessamento das refletâncias dos planos com a mesma facilidade. A *Radiosidade* é um outro método de cálculo de iluminância muito utilizado. Ela possibilita o reprocessamento rápido das refletâncias, embora não tenha o mesmo desempenho em relação às orientações da abertura e variações na configuração do céu. De acordo com Cabús (2002), estas características fazem do método do Raio Traçado uma boa alternativa para as condições tropicais, se comparado à Radiosidade. Nos trópicos, a freqüência de céus claros e parcialmente nublados, e também da radiação solar direta, geram grandes variações na distribuição de luminâncias do céu e grandes variação de iluminância relacionadas à orientação das aberturas.

De acordo com Cabús (2005), a validação do TropLux foi feita em três estágios: dois relativos ao erro – para comprovar a credibilidade dos seus resultados – e um ligado ao tempo gasto em processamento padrão, para avaliar sua viabilidade. Foi avaliado o erro estocástico originado pelo método Monte Carlo, enquanto o erro sistemático foi analisado sob três formas: comparando com métodos simplificados, com os resultados de um software padrão, o Lumen Micro, e com dados provenientes de monitoramento, a partir do banco de dados do BRE-IDMP.

## 2.5 Conclusão

Pelo exposto no presente capítulo é possível perceber a importância da luz natural para o conforto humano nas edificações. Entre as fontes dessa luz, o entorno é o único que pode ser construído pelo homem, podendo ser mais ou menos adequado ao aproveitamento da luz natural.

O desenho urbano é o instrumento pelo qual o entorno pode proporcionar melhores condições de iluminação natural às edificações, no entanto, ele também envolve questões de adensamento e valorização do solo urbano, necessitando de uma ação do poder público, através de códigos e regulamentos que preservem condições ambientais adequadas.

O clima tem grande influência na disponibilidade de luz natural. Particularmente no trópico úmido, onde é grande a disponibilidade de luz, são poucos os estudos no sentido de buscar ferramentas de planejamento que conduzam

o espaço urbano a fazer melhor uso da luz natural. Isso sem dúvida se relaciona com a falta de normas que regulem a construção do espaço urbano em função da iluminação natural, considerando suas necessidades, como sombreamento e ventilação.

Diante do potencial do entorno construído para aumentar ou prejudicar o aproveitamento da luz natural, da disponibilidade luminosa do trópico úmido e da importância deste recurso para o conforto humano e sustentabilidade da edificação, a busca de métodos para este objetivo tem papel relevante.

Essa busca começa com o entendimento do comportamento das fontes de luz natural no trópico úmido e do desempenho luminoso de diferentes modelos de entorno. Ainda que se constate que os atuais modelos têm bom desempenho, o conhecimento de seu comportamento pode levar ao seu aperfeiçoamento, gerando incrementos na disponibilidade de luz para as edificações e com isso, a redução do consumo de luz artificial.

A próxima seção apresenta os procedimentos metodológicos para investigar a presente questão.

# 3 METODOLOGIA

Este capítulo trata dos procedimentos metodológicos para avaliar os efeitos do entorno construído e da luz refletida, para a iluminação natural de interiores no trópico-úmido.

A metodologia adotada consiste em um estudo comparativo de modelos, fazendo uso de simulações computacionais para gerar dados e investigar a influência de um conjunto de variáveis relacionadas ao entorno das edificações no espaço urbano.

A primeira parte descreve o programa utilizado para realizar simulações computacionais. Em seguida define-se a sala de referência e os modelos de entorno comparados no estudo. Por fim são detalhados os parâmetros adotados nas simulações.

## 3.1 O programa

A comparação entre os modelos se deu através dos valores médios de iluminância em um plano de trabalho horizontal, no interior da sala de referência.

Para aferir esses valores foi utilizada a simulação computacional. Ela tem a vantagem de permitir a construção rápida de modelos, demandando poucos recursos e tendo precisão e rapidez considerável na determinação de valores de iluminância.

Para realizar simulações foi utilizado o programa TropLux V 2.13 (CABUS, 2006), este programa foi criado por Cabús (2002) como ferramenta para sua tese de doutorado. O programa permite que a contribuição do sol e do céu para a iluminação total seja analisada separadamente. Também permite analisar a Componente de Céu direta separadamente. Esses recursos foram usados na presente investigação para avaliar a contribuição da luz do Sol e do céu, refletidas, em relação à Componente de Céu direta, para a iluminação natural.

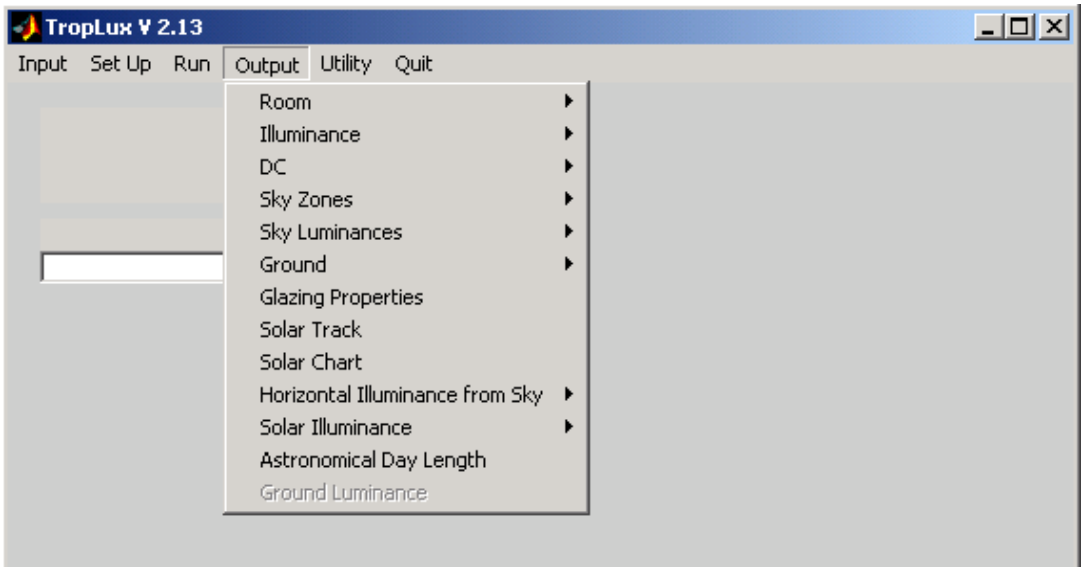



**Figura 3-1 - Tela do programa TropLux V 2.13 (CABÚS, 2006).**

Como exige o programa, será adotada uma margem de erro de 5%, com nível de confiança de 95%, como recomendado por Cabús (2005).

Dentre as três opções oferecidas, os valores de iluminância difusa horizontal serão baseados nas equações da IES, mostradas na subseção 2.4.2.

O programa TropLux permite que se configure o tipo de reflexão das superfícies, no presente trabalho, com exceção do vidro da janela, a reflexão de todas as superfícies será configurada como perfeitamente difusa, cujas propriedades foram descritas na seção 2.1.1.

## 3.2 A sala de referência

Inicialmente, para realizar as simulações foi definida uma sala de referência que será mantida constante em todas as simulações, a fim de poder atribuir os diferentes resultados apenas às variáveis ligadas ao entorno. Ela tem dimensões 3,00 m x 4,00 m e 2,50 m de pé-direito, totalizando uma área de 12m², as paredes têm 0,15m de espessura. Ver Figura 3-2.

Como base para o dimensionamento da sala, foi utilizado o Código de Edificações da cidade de Maceió-AL, Lei n° 5354/2004 (MACEIÓ, 2004) em

conjunto com a Lei n° 3537/1985 (MACEIÓ, 1985), revogada pela anterior, mas contendo maior detalhamento de instrumentos legais para este fim.

De acordo com o Código de Edificações da cidade de Maceió, Lei n° 3537/1985 (MACEIÓ-AL, 1985), a sala de referência proposta atende aos padrões mínimos exigidos para um espaço de dormitório ou estar, em edificação residencial, assim como a uma sala ou consultório de edificação comercial.

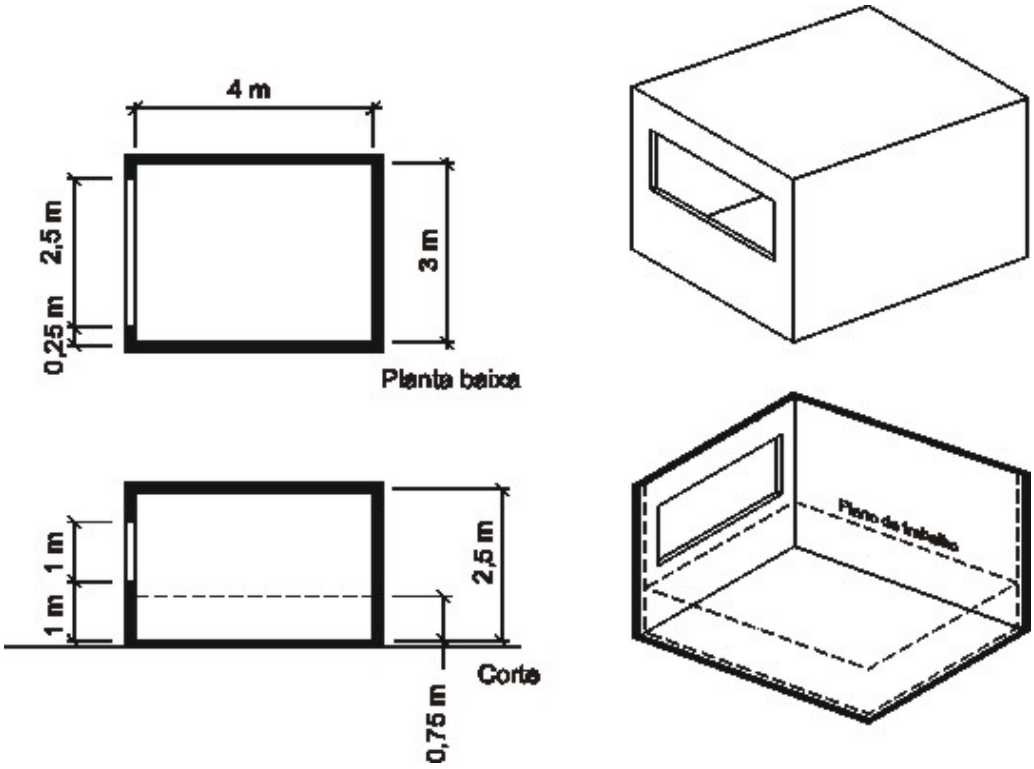



**Figura 3-2 – Sala de referência mostrada em planta baixa, corte longitudinal e em perspectiva isométrica externa e interna, mostrando ainda o plano de trabalho considerado no presente estudo.**

A sala possuirá uma única janela, em uma das paredes menores, medindo 1,00m x 2,50m, tendo um peitoril de 1,00 m de altura, totalizando uma área de 2,5m², equivalente a 1/3 da área total da parede como exige o Artigo 139 da Lei n° 3537/1985 (MACEIÓ, 1985), que relaciona o tamanho da abertura, o pé direito e a profundidade da sala. Ver Figura 3-2.

A área da janela será completamente fechada por um vidro incolor, cujas propriedades já estão definidas no programa TropLux. Como ocorre com outros vidros, os coeficientes variam com o ângulo de incidência da luz. A Figura 3-3

mostra o gráfico que indica a variação dos coeficientes de reflexão (ρ) e transmissão (τ) em função do ângulo. A seção 2.1.1 define os três coeficientes e suas relações. A reflexão e transmissão desse vidro são especulares e regulares.

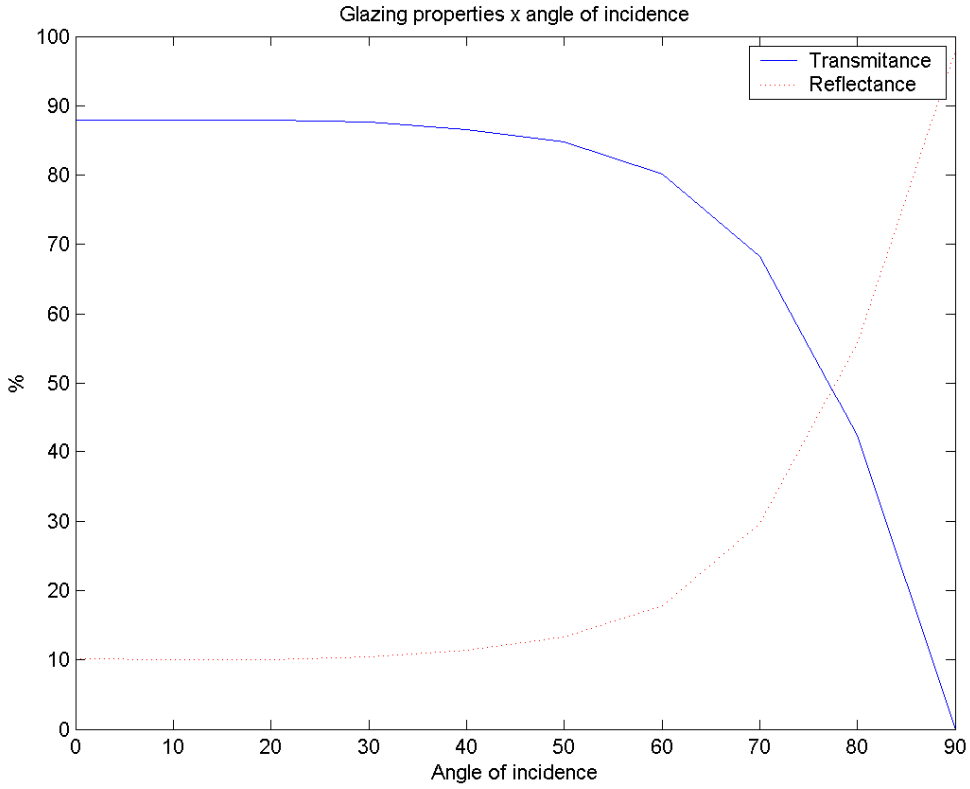



**Figura 3-3 – Propriedades do vidro da janela da sala de referência. Fonte: imagem gerada pelo programa TropLux V 2.13 (CABÚS, 2006).**

As superfícies internas da sala serão configuradas com os seguintes coeficientes de reflexão: teto 0,7; paredes 0,6 e piso 0,3. Estes coeficientes se baseiam em um estudo prévio de iluminação natural em Maceió, feito por Cabús (2004), são valores comuns em ambientes com paredes, piso e teto claros, eles levam em consideração o Fator de Configuração dessas superfícies em relação ao plano de trabalho, além da refletância.

A iluminação da sala será simulada em um plano de trabalho a 0,75 m de altura do piso. Ver Figura 3-2. A fim de simplificar a análise dos resultados, as simulações determinaram a iluminância média do plano de trabalho.

## 3.3 Modelos de entorno

O Fator de Céu é o parâmetro mais utilizado na definição de instrumentos legais para regular a disponibilidade de luz natural no meio urbano. No presente trabalho ele será usado como parâmetro para estimar o desempenho de modelos de entorno nas condições do trópico úmido.

Como não havia referências sobre parâmetros construtivos em escala urbana que combinassem obstrução do céu, geometria solar e refletâncias do entorno, para a condição do trópico úmido, foi necessário propor modelos para dar início a presente investigação. A definição desses modelos se baseou na sua obstrução do céu, cada modelo foi relacionado ao seu Fator de Céu correspondente.

Como exposto na subseção 2.3.6, os arranjos lineares de blocos de edificação são os mais comuns nas cidades. Uma abertura situada na fachada de um desses blocos tem seu Fator de Céu influenciado pela altura, pelo afastamento frontal e lateral entre os blocos, que vão determinar os ângulos de obstrução verticais e horizontais. Esses arranjos lineares formam os cânions urbanos, que apresentam proporcionalmente os menores fatores de céu da malha urbana, tendo sua iluminação natural mais influenciada pelo entorno. Por isso esta tipologia foi adotada para a criação dos modelos utilizados no presente estudo. Nos modelos, as extensões do cânion foram consideradas infinitas.

A obstrução causada pelo entorno foi especificada através dos ângulos horizontais e verticais de obstrução, como adotado em outras experiências de planejamento (NG, 2002). Os ângulos verticais de obstrução serão especificados pela razão entre largura do cânion e altura dos blocos edificados (L/A), a fim de simplificar a sua aplicação prática. Como mostrado na 2.4.1, esse método tem sido usado em códigos e regulamentos de edificação. Estas proporções podem, até certo ponto, ser aplicadas a cânions de dimensões variadas, desde que se respeite à razão L/A.

Foram adotadas as razões L/A mais utilizadas: 1/1, 1/2, 1/3 (NG, 2002) e, como referência de arranjo não verticalizado, a razão 2/1. De maneira análoga, o afastamento lateral entre os blocos também será expresso em função da largura da

rua (L), adotando uma razão 1/2, entre L e o afastamento lateral. O mesmo o correu com a largura dos blocos, que é igual à largura da rua.

O uso de proporções é útil, mas era necessário definir uma escala para a construção dos modelos, que relacionasse as proporções à dimensão dos afastamentos e número de pavimentos. O código de edificações de Maceió não faz referência nenhuma a ângulos de obstrução. Os cânions na cidade de Maceió apresentam uma grande diversidade desses ângulos. A solução adotada foi utilizar os afastamentos mínimos e parâmetros de largura de ruas, constantes no Código de Edificação e Urbanismo, como ordem de grandeza para o dimensionamento dos modelos.

Assim, a largura do cânion (L) foi fixada em 20m. Essa largura abrange a rua, os passeios e os afastamentos frontais, sendo mantida constante nas razões L/A que definiram os diferentes cânions 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3, que corresponderam respectivamente às alturas de 10m, 20m, 40m e 60m. Através de uma aproximação baseada no pé-direito da sala de referência, esses cânions equivaleriam a edifícios de 4, 8, 16 e 24 pavimentos, respectivamente. Ver Figura 3-4. O afastamento lateral entre os blocos ficou com 10m (L/2) e a largura das fachadas com 20m, igual à "L" e abaixo do máximo permitido pelo código de edificações: 30m.

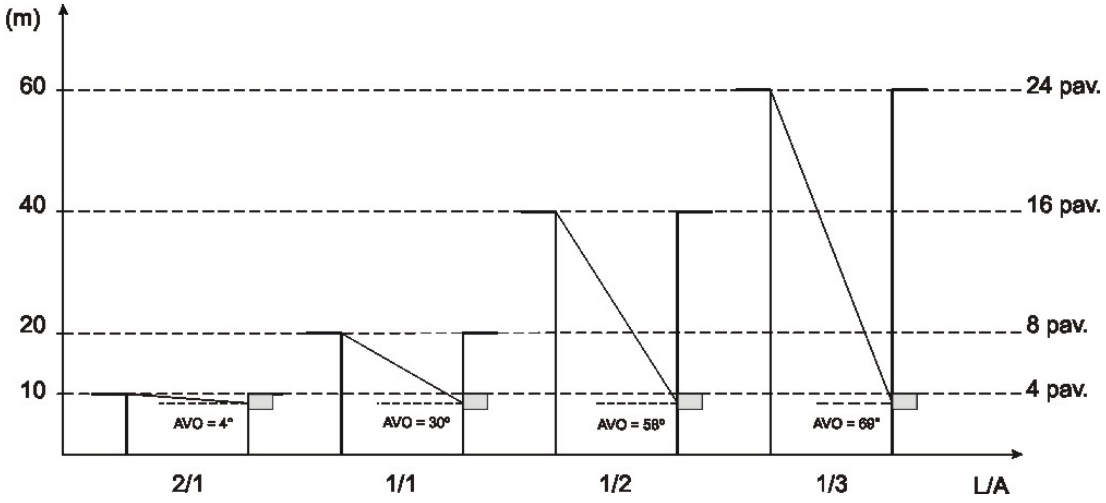



**Figura 3-4 – Modelos de cânion utilizados nas simulações. Na figura é mostrada a posição da sala de referência. A figura mostra ainda o Ângulo Vertical de Obstrução (AVO) de cada cânion, em relação a um ponto no peitoril da janela da sala de referência.**

Definidos os modelos, ainda restava definir o ponto de referência para a medição dos ângulos de obstrução, pois a distância das aberturas ao solo altera os ângulos de obstrução verticais. Em Maceió, a verticalização, seja residencial ou comercial, é regulamentada pelo uso R5, que trata dos edifícios com mais de três pavimentos. Até quatro pavimentos as edificações não precisam ter elevadores, e esse padrão tem sido mantido na prática construtiva, formando as edificações verticalizadas mais baixas. Este número de pavimentos corresponde ao cânion 2/1. A sala foi posicionada no quarto pavimento desse bloco, para definir o ponto de referência, que foi localizado no peitoril da janela, a 8,5m do solo, coincidindo com o eixo da abertura e formando ângulos de obstrução vertical de 4°, 30°, 58° e 69° nos respectivos cânions, como mostrado na Figura 3-4.

Os ângulos horizontais de obstrução foram determinados pelo arranjo planimétrico dos modelos. Foram definidos três modelos, denominados: Modelo-1, Modelo-2 e Modelo-3. A Figura 3-5 mostra os modelos juntamente com seus fatores de céu, representados pela Máscara de Obstrução relativa à altura 20m. O Modelo-1 foi adotado como referência para avaliar a importância dos afastamentos laterais, assim, ele não apresenta esses afastamentos, sendo contínuo. Também foi adotado um modelo onde a abertura da sala se apresenta completamente livre de obstrução, para avaliar o efeito da existência de tais obstruções. Ele foi denominado Modelo-0.

Os modelos 2 e 3, consideram a posição da abertura em relação aos afastamentos laterais, tendo assim fatores de céu diferenciados.

Observa-se pela Máscara de Obstrução para os Modelos 1 e 2 que os afastamentos laterais mais distantes do ponto de referência, praticamente não afetam o Fator de Céu dos modelos. Ver Figura 3-5. Assim sendo, a construção dos modelos foi simplificada, excluindo-se essas descontinuidades mais afastadas. A Figura 3-6, mostra através da Máscara de Obstrução, como ficaram os fatores de céu para as diferentes alturas, nos modelos 1, 2 e 3.

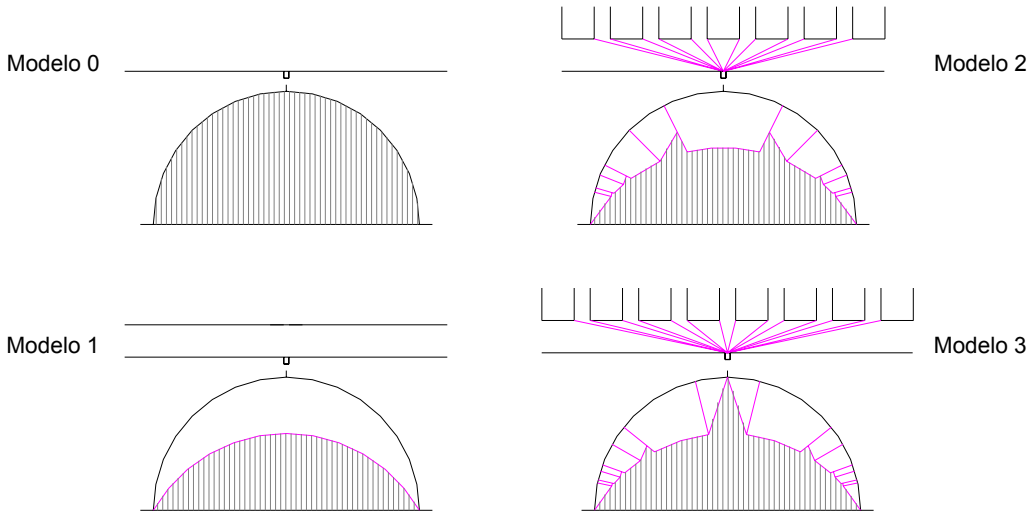



**Figura 3-5 - Máscara de Obstrução dos modelos adotados.**

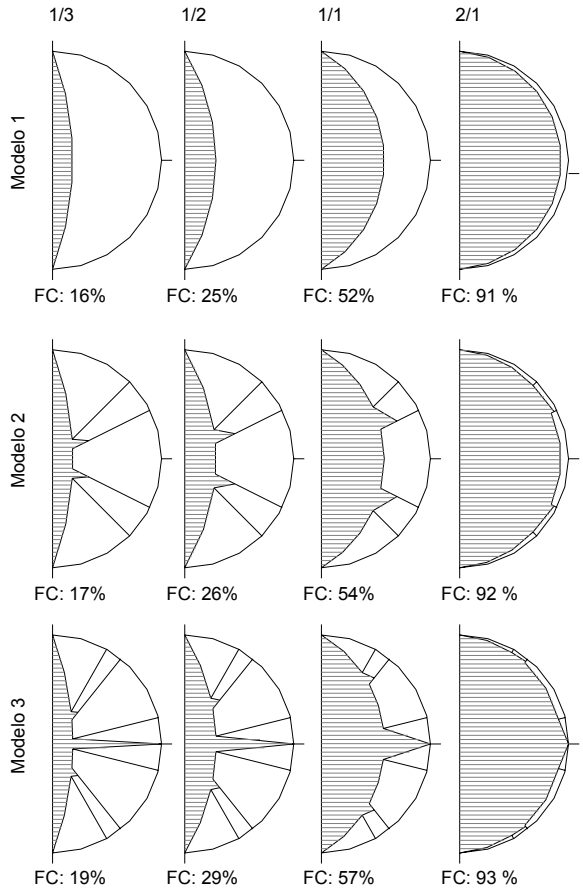



**Figura 3-6 - Máscara de Obstrução e fatores de céu para as diferentes alturas, nos modelos 1, 2 e 3.**

O coeficiente de reflexão médio das laterais do cânion será definido como 0,5. Com base em estudos prévios de iluminação natural (CABUS, 2004) (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975), o coeficiente de reflexão do solo (albedo) será definido como 0,2, como sugerido por Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975), para este tipo de estudo.

## 3.4 Simulações

Todas as simulações serão baseadas nos mesmos parâmetros de local, tipo de céu, período do dia e do ano.

Como referência de trópico úmido e localização para as simulações, foi escolhida a cidade de Maceió-AL (Latitude 9º40'S, Longitude 35º42'O), uma cidade com clima trópico úmido e céu parcialmente nublado na maior parte do ano, onde a luz natural é abundante e a presença da radiação direta do Sol é comum. A subseção 2.3.5 descreveu as condições de Maceió quanto às fontes de luz natural.

Como mostrado na subseção 2.3.5, através de um estudo de Cabús (2002), o céu parcialmente nublado é o mais freqüente em Maceió, com maior probabilidade de ocorrência durante o dia e o ano. Através dos 15 padrões adotados pela CIE (CIE, 1999) e baseado em um método simplificado para classificar o céu de Maceió, o autor recomenda que na falta de estudos que englobem um período maior do ano ou utilizem metodologias mais precisas, o modelo de céu CIE 10 seja utilizado para simular um céu parcialmente nublado em Maceió. Assim, esse modelo será adotado nas simulações.

Para compreender essas variações ao longo do dia e considerando as diferentes trajetórias solares ao longo do ano, foram adotados para as simulações os dias de solstícios de verão e inverno (22/12 e 22/06), e também um equinócio (22/03), no período entre 6h00min e 18h00min, compreendendo o dia inteiro em três dias do ano.

Para avaliar a influência da orientação da abertura e das obstruções do entorno, para as iluminâncias internas, os cânions simulados foram orientados no eixo leste/oeste e norte/sul. Assim, a sala de referência posicionada na lateral do

cânion, como mostrado na Figura 3-4, terá sua janela direcionada para o sul e para leste respectivamente. Ver Figura 3-7.

Como discutido nas seções 2.3.3 e 2.4.2, na região tropical a radiação solar intensa gera a necessidade de se utilizar proteção nas aberturas, para evitar problemas de ofuscamento e aquecimento.

Sendo assim, para considerar o sombreamento em conjunto com as outras variáveis e excluir a radiação solar direta da iluminação interna, a janela da sala será protegida durante o período entre 8h00m e 18h00m, em horário solar, que corresponde aproximadamente às horas de trabalho diurnas em horário legal. A Figura 3-7 mostra os protetores solares utilizados com as respectivas Máscaras de Obstrução e fatores de céu.

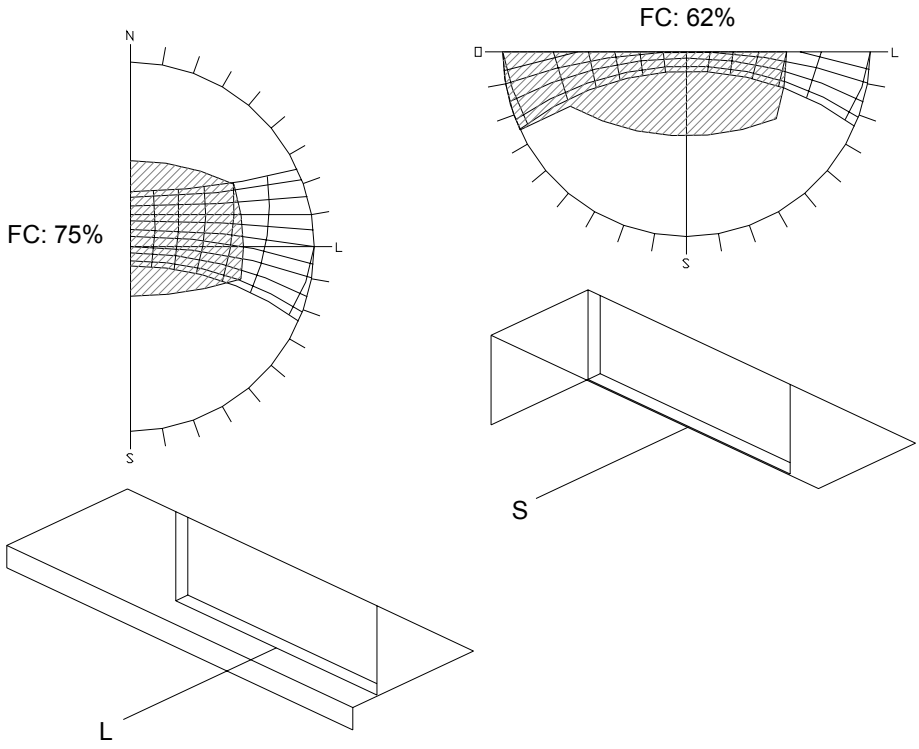



**Figura 3-7 – Protetores solares utilizados na janela da sala de referência para as duas orientações analisadas – leste e sul. A Máscara de Obstrução indica que a proteção abrange o período entre 8h00m e 18h00m, durante o ano inteiro.**

A Figura 3-8, Figura 3-9 e Figura 3-10 mostra a redução dos fatores de céu com o uso dos protetores solares. Pode-se observar que os fatores de céu ficaram agora muito semelhantes para os modelos 1 e 2, quando considerados em alturas

iguais. O Modelo-3 permaneceu com fatores de céu maiores. Também se observa que as aberturas voltadas para o sul apresentam fatores de céu menores.

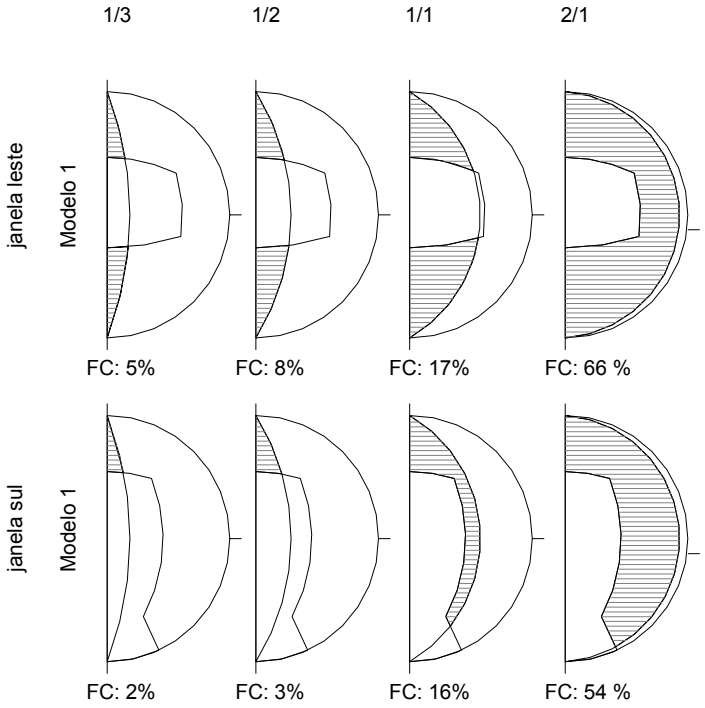



**Figura 3-8 - Fatores de céu do Modelo-1.**

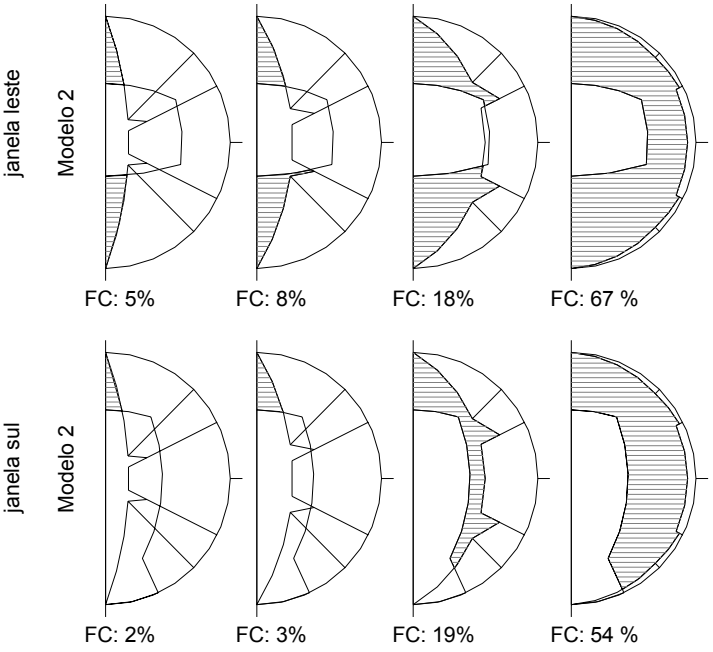



**Figura 3-9 - Fatores de céu do Modelo-2.**

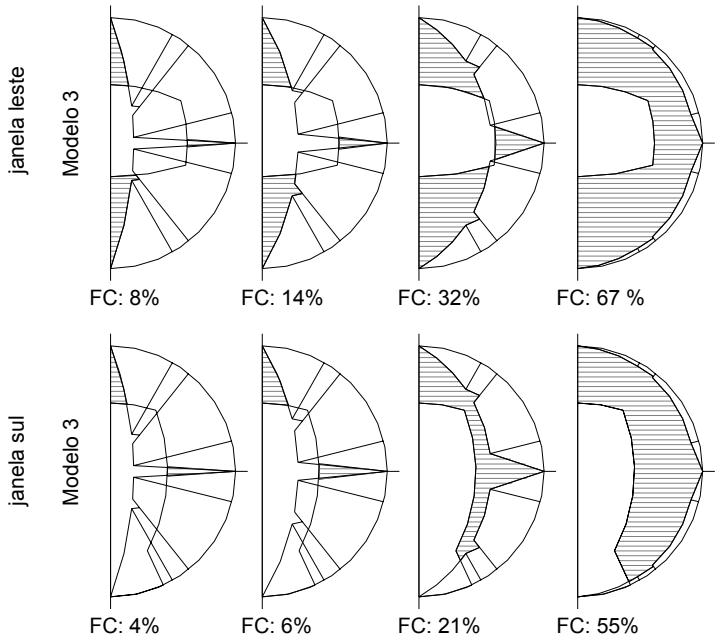



**Figura 3-10 - Fatores de céu do Modelo-3.**

O objetivo envolvido na definição dos modelos foi avaliar o desempenho e relacioná-lo aos parâmetros de obstrução de céu, orientação e proteção solar, conjuntamente. Os resultados irão revelar a influência de cada parâmetro, assim como sua influência conjunta, nas condições do trópico úmido.

Através dos dados gerados nas simulações, da comparação entre os diferentes modelos e da avaliação de seu desempenho, será possível identificar os parâmetros relevantes para a proposição de novos modelos, mais adequados ao aproveitamento da luz natural no trópico úmido. O próximo capítulo apresenta e analisa os resultados das simulações computacionais, descrevendo a seqüência e os modelos de análise.

# 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Esta seção apresenta os principais resultados das simulações e explica as análises realizadas. O desempenho dos diferentes modelos foi comparado considerando os seus fatores de céu respectivos, para avaliar a eficácia do Fator de Céu como parâmetro único para estimar o desempenho dos modelos. Foram comparados os resultados para as orientações leste e sul, ao longo do dia, em três dias do ano. Assim também foi avaliada a influência e a importância da orientação da abertura, como parâmetro adicional a ser usado junto com o Fator de Céu. Foi ainda avaliada a contribuição da luz do Sol e do céu, refletidas, em relação à Componente de Céu direta, CC, para avaliar a sua contribuição para a iluminação interna.

A partir dos dados gerados pelo programa TropLux, foram salvos arquivos no formato WK1, que pode ser importado para o Microsoft Excel© na forma de planilha de dados. Utilizando os recursos deste programa, os dados foram agrupados e organizados para que fosse possível gerar gráficos que facilitassem a análise dos números.

A análise foi feita em três etapas. Inicialmente foram comparados os resultados para os modelos 0, 1, 2 e 3, que apresentam diferentes arranjos planimétricos. Em seguida, foram comparados os cânions 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3, que apresentam diferentes alturas. Na terceira e última etapa de análise, foram comparadas as contribuições relativas da luz do Sol e do céu, refletidas pelo entorno, e da Componente de Céu direta, para os modelos 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3.

Nesta primeira etapa, todos os modelos foram configurados com uma altura de 60m, que equivale ao cânion 1/3. A comparação entre o desempenho dos modelos permitiu avaliar a influência da existência das obstruções do entorno, através do Modelo-0, e dos afastamentos laterais, que modificam os fatores de céu. Foram considerados os dias 22 de março, 22 de junho e 22 de dezembro e o período entre 6h00min e 18h00min, com janela orientada a leste e sul.

O Modelo-0 não apresenta obstruções em frente à janela, tendo os maiores fatores de céu. As iluminâncias referentes a esse modelo foram bem mais altas que nos outros, mostrando o efeito da redução do Fator de Céu causado pelas obstruções

nos modelos 1, 2 e 3, para a iluminância da sala. Os maiores valores ocorreram em dezembro e os menores em junho.

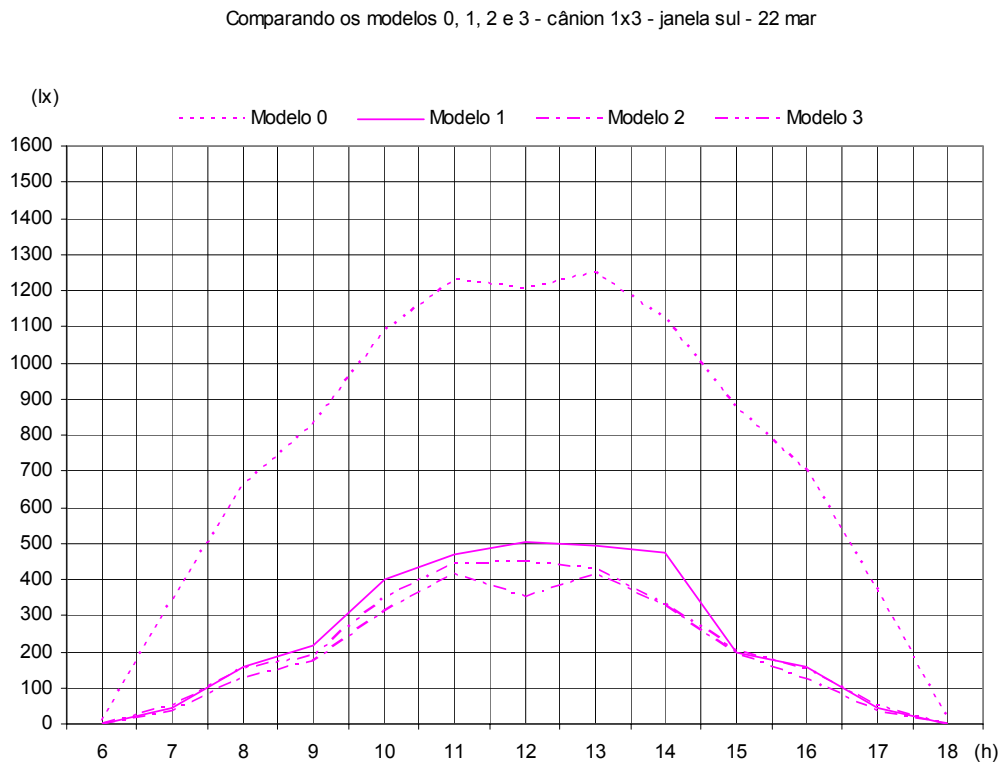



**Gráfico 1 - Comparando os modelos 0, 1, 2 e 3, para janela sul, no dia 22 de março.**

Comparando os modelos 1, 2 e 3, observou-se um conjunto diferenciado de resultados para janelas orientadas a sul e a leste, nos diferentes dias analisados.

Com janelas orientadas a sul, no mês de março, no período até 15h00min, o Modelo-1 apresentou melhor desempenho e o Modelo-2, o pior desempenho. A diferença entre eles chegou a ser de 30%, às 12h00min e 14h00min. Ver Gráfico 1. Para esta mesma orientação de janela, no mês de junho, os três modelos apresentaram pouca diferença nos seus desempenhos. Ainda para janela orientada a sul, no mês de dezembro, às 12h00min, o Modelo-3 apresentou um desempenho 70% melhor que os outros dois modelos. Ver Gráfico 2. Nessa orientação de janela, os modelos 1, 2 e 3 têm respectivamente fatores de céu 2%, 2% e 4%.

Para janela orientada a leste, no mês de março, no período entre 10h00min e 14h00min, o Modelo-2 apresentou o melhor desempenho e o Modelo-1, o pior. As diferenças entre eles chegaram a 15%, ao meio dia. A partir da 14h00min, o Modelo-

3 apresentou um desempenho 10% maior que os modelos 1 e 2. No mês de junho, os três modelos apresentaram desempenho equivalente. Ainda para janela orientada a leste, no mês de dezembro, entre 11h00min e 13h30min, o Modelo-1 apresentou um desempenho 10% melhor que o Modelo-2, ficando o Modelo-3 com o menor desempenho. No restante do dia, os desempenhos foram semelhantes. Nessa orientação de janela, os modelos 1, 2 e 3 têm respectivamente fatores de céu 5%, 5% e 8%.

Comparando os resultados para os três dias analisados, observa-se que os melhores desempenhos não estiveram sempre relacionados aos maiores fatores de céu. Baseado apenas nos fatores de céu, seria esperado que o Modelo-3 apresentasse o melhor desempenho nos dias analisados, para ambas as orientações, uma vez que seu Fator de Céu é maior. O conjunto completo dos gráficos pode ser visto no Apêndice A – GRÁFICOS.

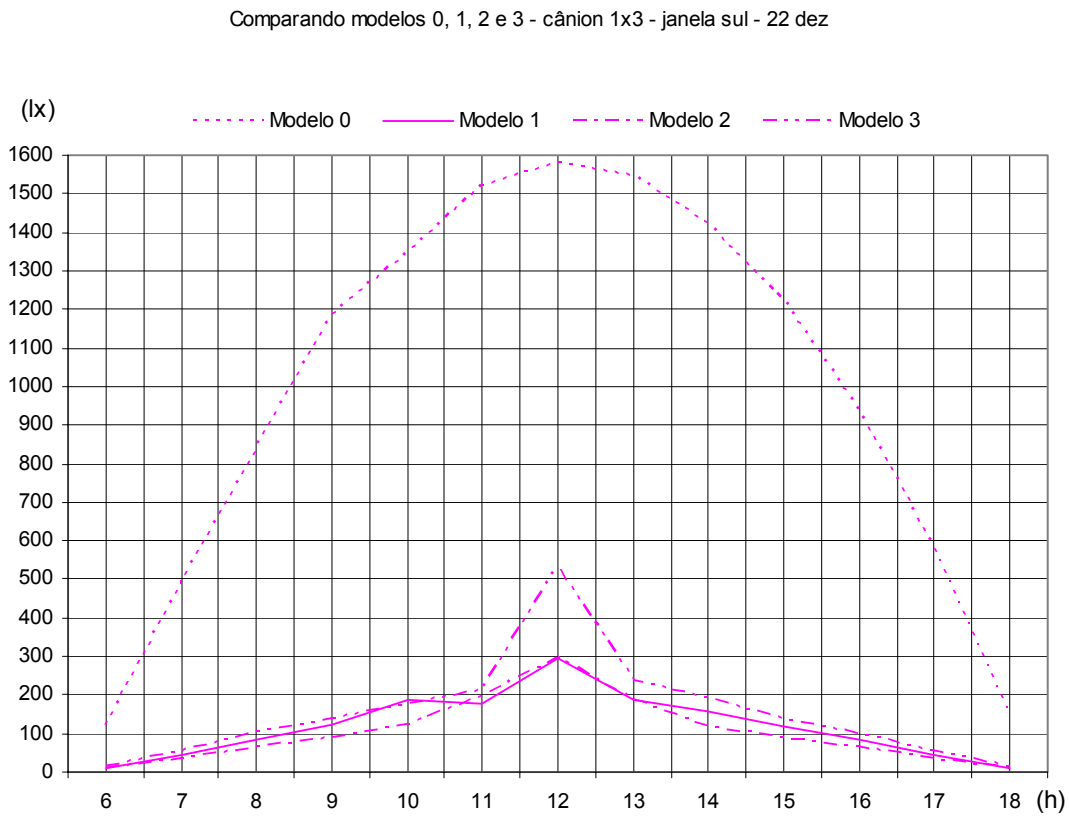



**Gráfico 2 - Comparando os modelos 1, 2 e 3, para janela sul, no dia 22 de dezembro.**

Na análise anterior os modelos têm altura 60m, que equivale ao cânion 1/3. O Fator de Céu de tais modelos é influenciado pela altura do cânion, como mostrado na Figura 3-8 e Figura 3-9. Assim foi feita uma nova análise comparando os modelos 1 e 2 para as alturas 20m e 60m, equivalendo respectivamente aos cânions 1/1 e 1/3. Esta análise considerou a janela orientada para o sul, nos dias 22 de março, 22 de junho e 22 de dezembro, no período entre 6h00min e 18h00min.

Os resultados mostraram que a redução da altura do cânion causou um incremento significativo na iluminância média da sala. Como esperado, o cânion 1/1 teve iluminâncias maiores, devido ao seu maior Fator de Céu.

Apesar dos diferentes fatores de céu, a comparação entre os modelos 1 e 2, quando considerados em uma mesma altura, também não apresentou diferenças constantes de desempenho, nos dias analisados. Com altura 20m, no mês de março, as diferenças entre os modelos 1 e 2 foram maiores entre 12h30min e 15h00min, chegando a 15%, com melhor desempenho do Modelo-2. Nas mesmas condições, para mês de junho, o Modelo-1 apresentou melhor desempenho, com um incremento de 20% ao meio dia. Ver Gráfico 3. No mês de dezembro, ainda para altura 20m, o melhor desempenho foi do Modelo-2, com incremento de 15%. Ver Gráfico 4. Os três gráficos podem ser vistos no Apêncice A. Nessas condições, o Fator de Céu dos modelos 1 e 2 é respectivamente 16% e 19%. O Modelo-2 apresenta um Fator de Céu maior, em uma estimativa de desempenho baseada apenas nesse parâmetro, seria esperado um melhor desempenho deste modelo em todos os dias analisados.

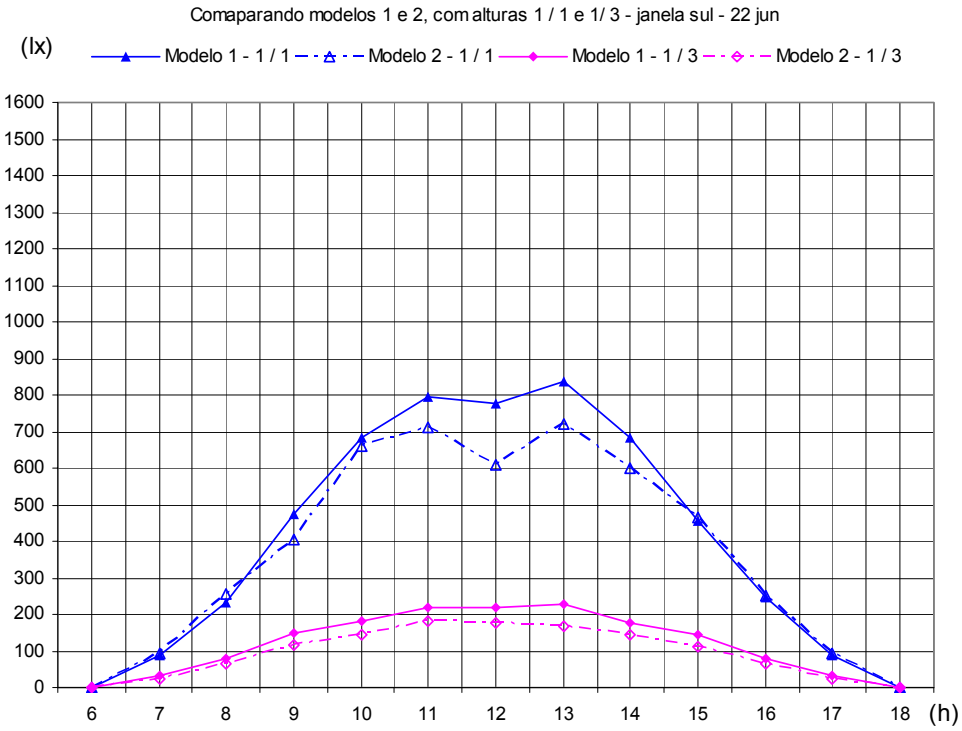



**Gráfico 3 - Comparando os modelos 1 e 2, com alturas 20m e 60m, para janela sul, no dia 22 de junho.**

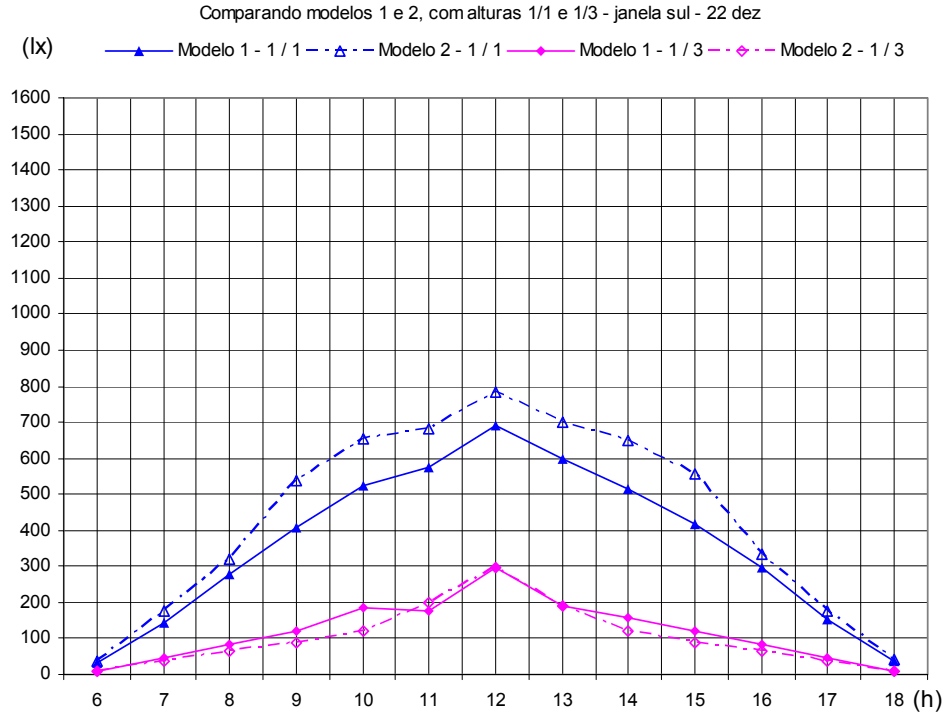



**Gráfico 4 - Comparando os modelos 1 e 2, com altura 20m e 60m, para janela sul e leste, no dia 22 de dezembro.**

A segunda etapa de análises foi feita apenas com cânions Modelo-1. O objetivo foi avaliar isoladamente o efeito da variável altura. Foram comparadas as alturas 10m, 20m, 40m e 60m, que equivalem a cânions 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3 respectivamente. A janela da sala foi considerada nas orientações leste e sul.

Os resultados mostraram que o aumento da altura do cânion causa uma redução considerável na iluminância da sala, devido à redução do Fator de Céu. Entre as alturas 2/1 e 1/3 o Fator de Céu foi de 54% a 2% respectivamente, para janela sul, e de 66% a 5% para janela leste. Assim, quanto maior a altura menor as iluminâncias médias. As iluminâncias mais altas ocorrem com altura 2/1, nesse cânion, a janela da sala tem um ângulo AVO de apenas 4°, com um alto Fator de Céu, praticamente não sendo obstruído pelo entorno.

É importante observar que o desempenho deste modelo para janela leste foi um pouco melhor do que o Modelo-0 (sem obstruções) da etapa anterior, para as mesmas condições. O mesmo ocorreu com a janela sul, com exceção para o dia 22 de dezembro. Esperava-se que o Fator de Céu do Modelo-0, que é o maior de todos, proporcionasse as maiores iluminâncias. Como as obstruções reduzem o Fator de Céu, esse aumento na iluminância média está relacionado à Componente Refletida Externa (CRE), que sob céu parcialmente nublado abrange a luz do Sol e do céu, refletida pelo entorno. A Carta Solar de Maceió mostra que nos meses de março e junho o sol incide nas obstruções em frente à janela sul na maior parte do dia. No mês de dezembro de dezembro essa incidência não ocorre, diminuindo a luminância das obstruções.

A janela voltada para o sul, que possui os menores fatores de céu, apresentou um desempenho melhor nos meses de março e junho, mas no mês de dezembro, com exceção do cânion 2/1, o melhor desempenho foi da janela leste, como mostrado nos Gráfico 5, Gráfico 6 e Gráfico 7. O parâmetro Fator de Céu, usado isoladamente, não esclarece as causas desse fato, uma vez que o Fator de Céu da janela sul é menor que o da janela leste. A maior insolação nas obstruções opostas à janela sul, na maior parte do dia, nos meses de março e junho, aumenta a contribuição do sol refletido pelo entorno e gera os melhores desempenhos. A curva de iluminância média da janela sul apresentou sempre uma simetria em relação ao meio dia, que coincide com

as maiores alturas solares e com as maiores iluminâncias, solar normal e difusa horizontal.

A janela leste, que possui os maiores fatores de céu, apresentou um desempenho um pouco melhor na parte da tarde, coincidido com o horário em que o sol incide nas obstruções em frente à janela, esse efeito é mais perceptível nos cânions 2/1 e 1/1, e no mês de dezembro. Entre as 10h00min e as 14h00min, nos cânions 1/2 e1/3, observa-se um aumento das iluminâncias. O Fator de Céu, se utilizado como parâmetro único, não explica por que no horário da tarde e ao meio dia, observa-se um incremento nas iluminâncias. Isso está relacionado com os ângulos de incidência do sol, determinados pela geometria solar.

O uso do Fator de céu combinado com a orientação da abertura forma um método de análise mais eficaz, quando se tem a ocorrência da radiação solar direta e refletida aliada a radiação difusa do céu, como é caso do céu parcialmente nublado, freqüente no trópico úmido.

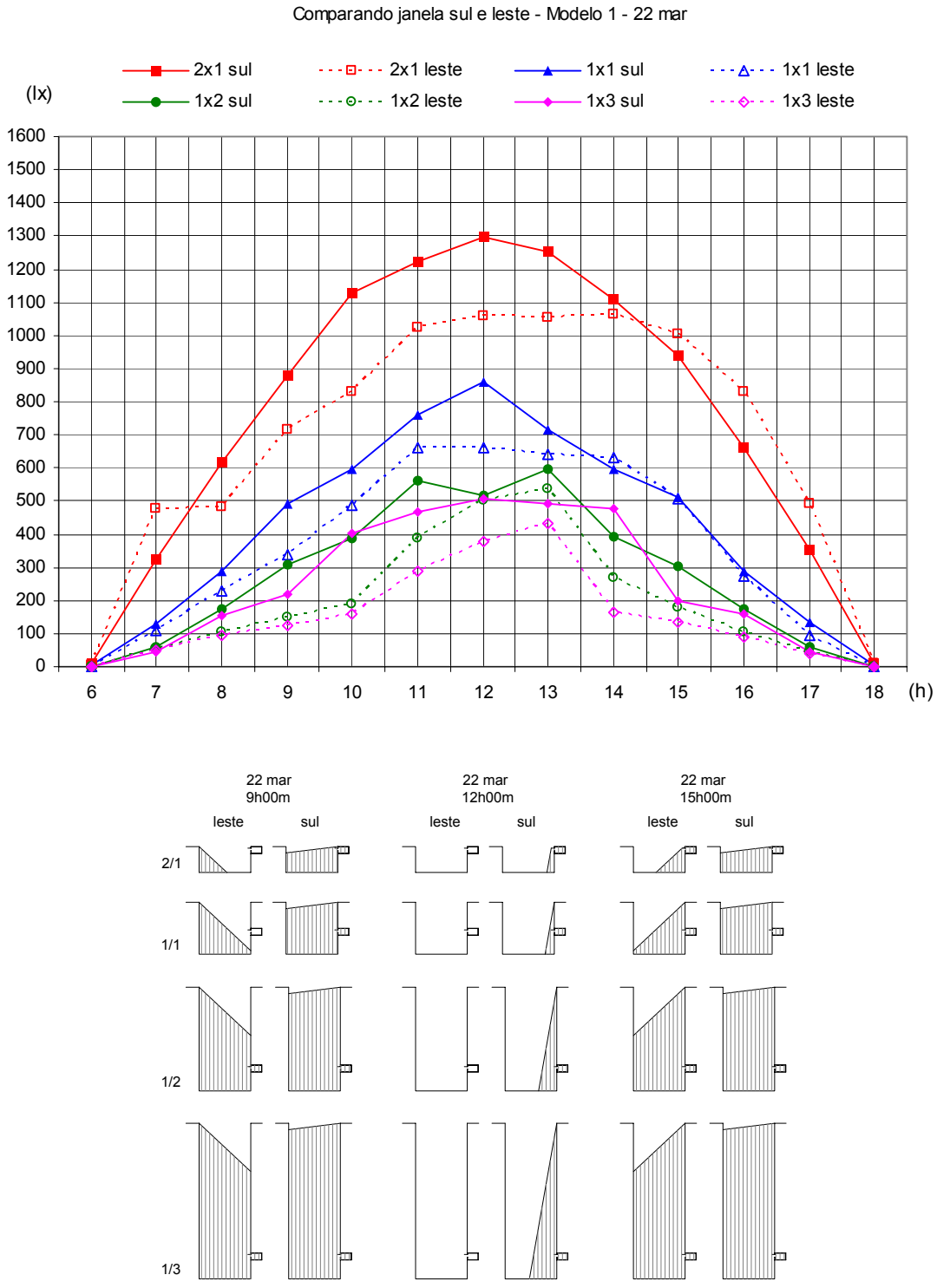



**Gráfico 5 - Comparando as alturas 10m, 20m, 40m e 60m, para janela leste e sul, no dia 22 de março. A figura também mostra a projeção de sombra numa seção dos cânions, para três horários e duas orientações.**

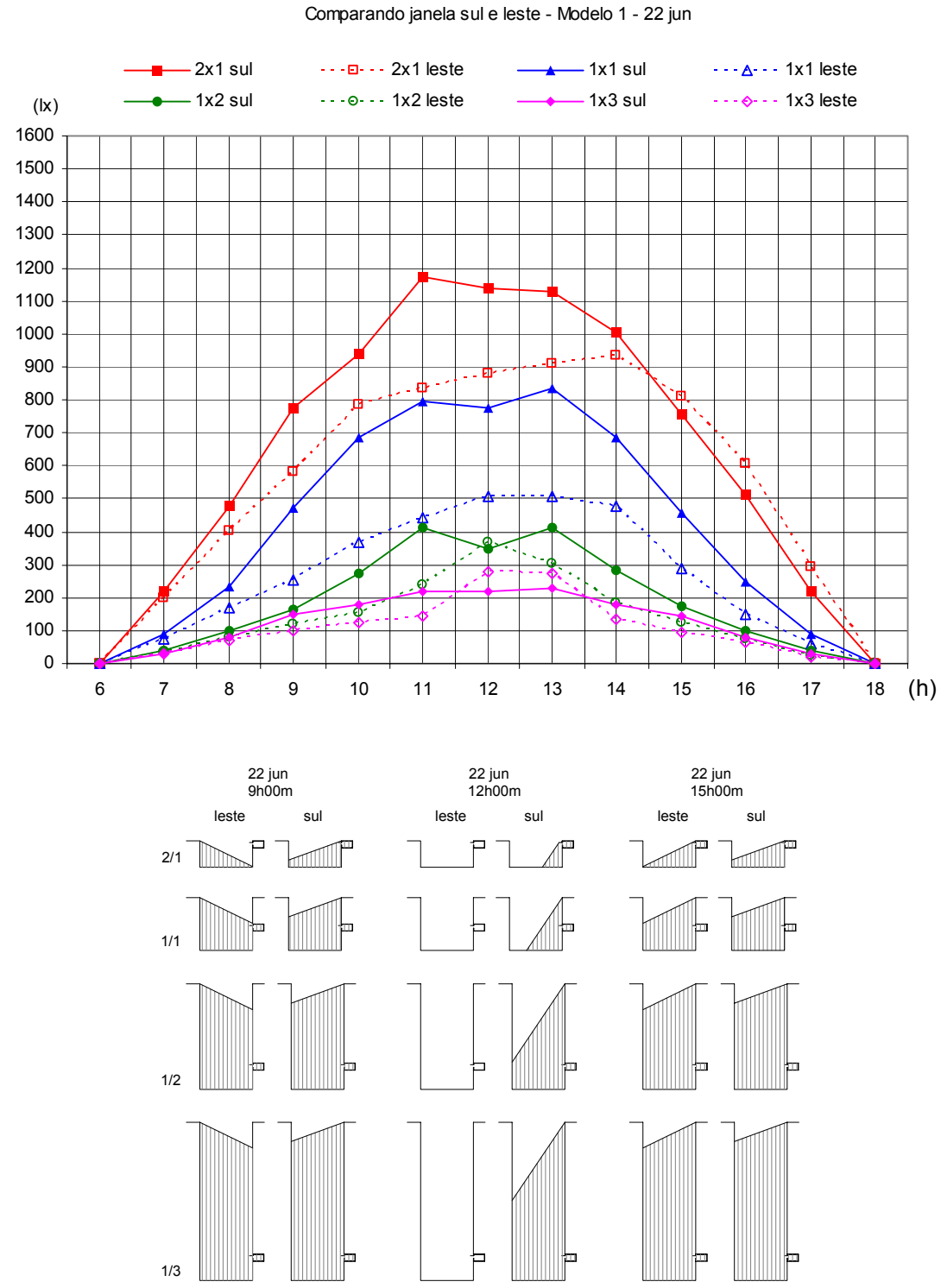



**Gráfico 6 - Comparando as alturas 10m, 20m, 40m e 60m, para janela leste e sul, no dia 22 de junho. A figura também mostra a projeção de sombra numa seção dos cânions, para três horários e duas orientações.**

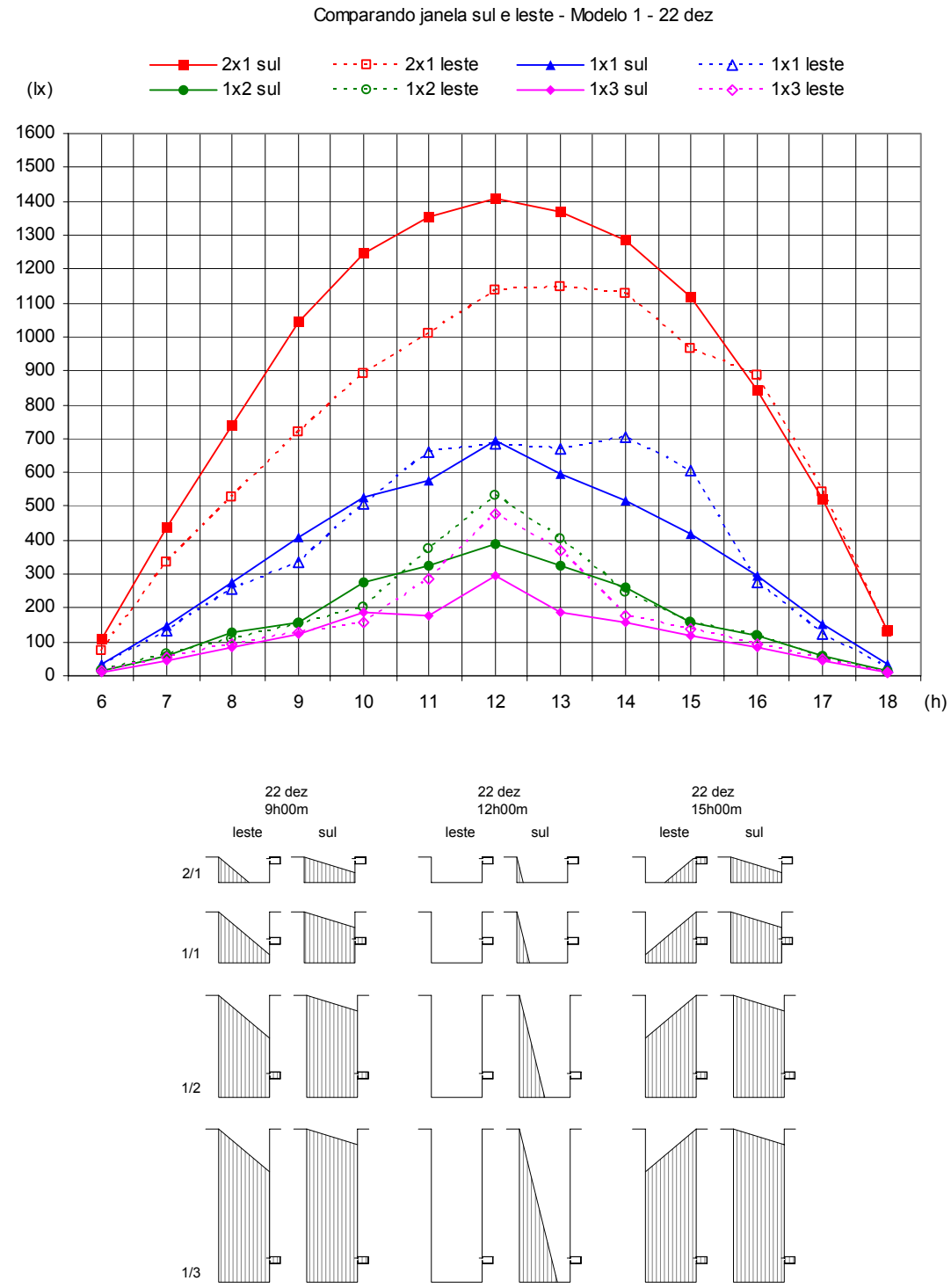



**Gráfico 7 - Comparando as alturas 10m, 20m, 40m e 60m, para janela leste e sul, no dia 22 de dezembro. A figura também mostra a projeção de sombra numa seção dos cânions, para três horários e duas orientações.**

Como parâmetro para avaliar o desempenho dos modelos, ponderando as diferenças de desempenho, adotou-se a iluminância média, agrupada em intervalos relacionados a tarefas visuais condizentes com o espaço da sala de referência.

De acordo com o Código de Edificações da cidade de Maceió-AL, Lei n° 3537/1985 (MACEIÓ-AL, 1985), a sala de referência adotada atende aos padrões mínimos exigidos para um espaço de dormitório ou estar, em edificação residencial, assim como a uma sala ou consultório de edificação comercial.

A norma NBR 5413 de maio de 1991, estabelece os valores apropriados para a execução de diversas tarefas, em diferentes circunstâncias. Acima de 200 lx, um observador com idade entre 40 e 55 anos é capaz de desempenhar satisfatoriamente tarefas que demandem velocidade e precisão média.

As tarefas domésticas mais comuns podem ser desenvolvidas satisfatoriamente com iluminâncias entre 100 e 500 lx. As atividades de escritório são mais diversificadas e exigem iluminâncias mais altas. Salvo tarefas mais específicas e de maior precisão que necessitem de iluminâncias acima de 1000 lx, os valores entre 500 e 1000 já são satisfatórios para boa parte delas.

Para uma análise simplificada, as iluminâncias médias da etapa anterior foram agrupadas em três categorias: valores entre 100 e 500, valores entre 500 e 1000 e valores acima de 1000 lx. Através de um gráfico, esses grupos foram relacionados à duração da sua ocorrência em horas, para cada altura, orientação de janela e mês. Assim o desempenho dos diferentes modelos pode ser comparado mais facilmente, como mostrado pelo Gráfico 8 e Gráfico 9.

Para janela leste, todas as alturas atingiram uma luminosidade suficiente para uma residência, em no mínimo sete horas por dia, nos dias analisados. Isso representa 70% do horário de trabalho diurno. Os cânions 1/2 e 1/3 têm fatores de céu menores que 10%. Os valores acima de 500 lx, adequados para atividades de escritório, foram menos freqüentes, o que sugere a necessidade de iluminação artificial suplementar, na maior parte do ano para os cânions 1/1, 1/2, e 1/3. É importante observar que para o cânion 2/1, os valores estiveram acima de 500 lx em todo o horário de trabalho diurno, para as três datas simuladas. Também ocorreram valores acima 1000 lx, adequados para tarefas visuais mais exigentes. Com o cânion 1/1, no mês de dezembro, o resultado foi melhor que o da janela voltada para sul.

Para janela sul, o diagrama mostra um desempenho um pouco melhor para os cânions 2/1 e 1/1, nos meses de março e junho. No cânion 2/1, os valores estiveram acima de 500 lx praticamente durante todo o horário de trabalho diurno, nos três dias analisados. Os valores acima de 1000 lx ocorreram pelo menos quatro horas por dia, ou 40% do horário de trabalho. No cânion 1/1, que tem Fator de Céu 16%, os valores estiveram acima de 500 lx pelo menos cinco horas por dia, ou 50% do horário de trabalho, nos dias analisados, sendo adequado para escritórios. Para os cânions 1/2 e 1/3, o desempenho é melhor em março e junho e pior em dezembro.

É importante observar que os valores analisados são iluminâncias médias, o que significa que ocorreram valores maiores e menores. Na prática, aquelas tarefas visuais mais exigentes, podem tirar partido da proximidade com a abertura, onde provavelmente as iluminâncias são mais altas.

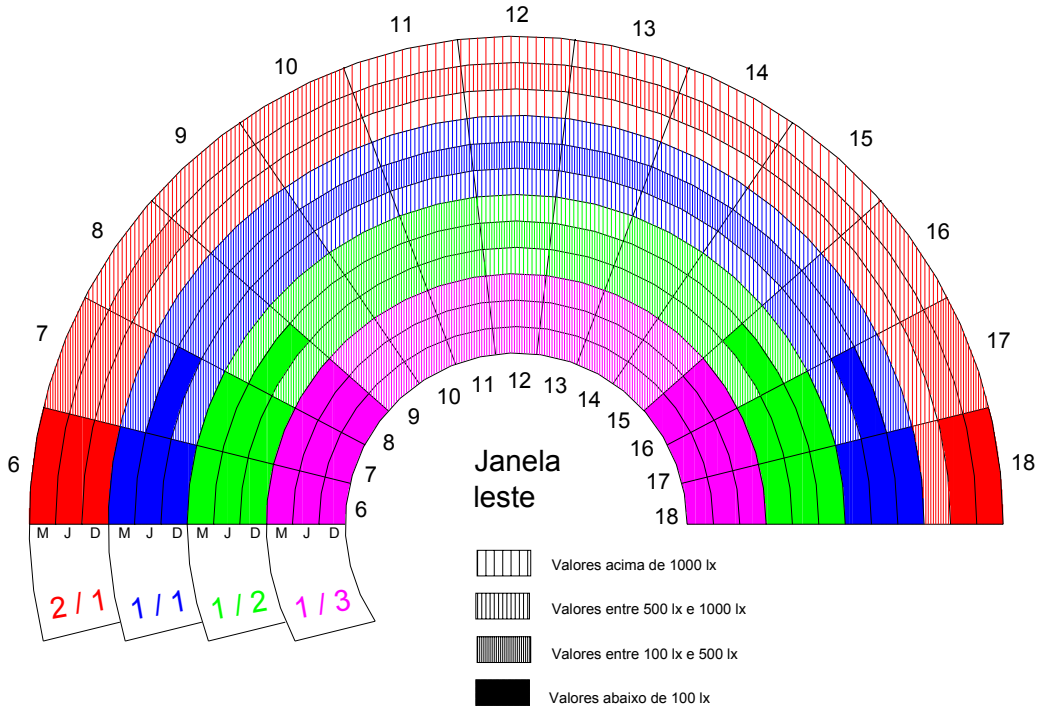



**Gráfico 8 - Comparando os cânions 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3, para janela leste.**

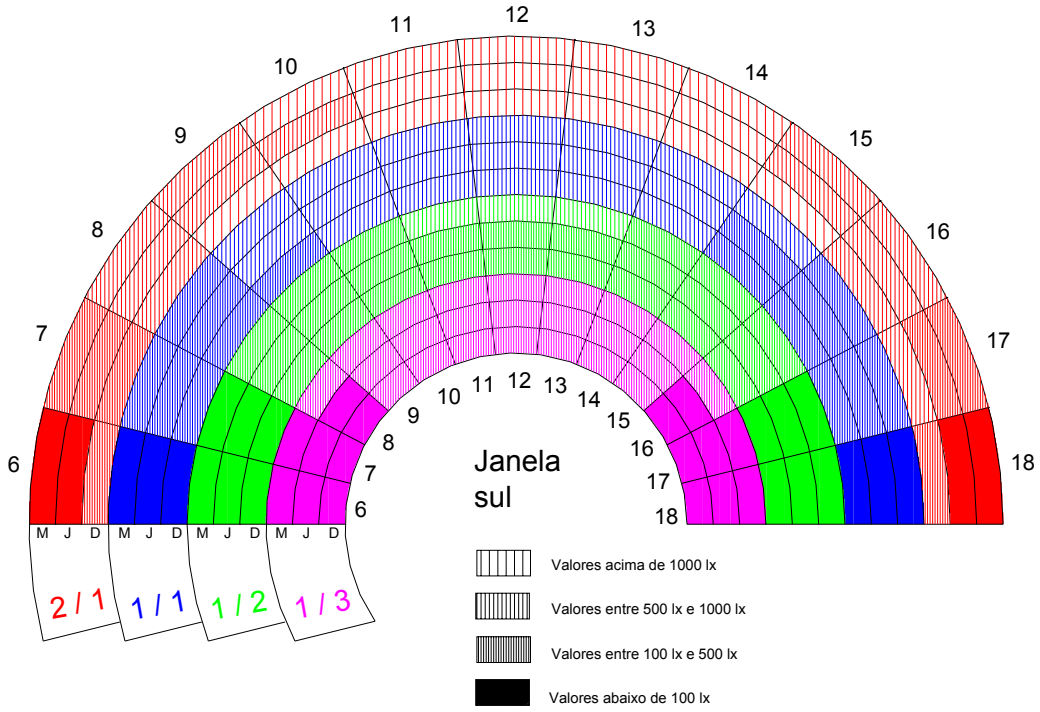



**Gráfico 9 - Comparando os cânions 2/1, 1/1, 1/2 e 1/3, para janela sul.**

Restava ainda entender qual a contribuição da luz refletida em relação à Componente de Céu direta (CC), essa questão foi analisada nessa terceira etapa. Ela se baseou nos dados analisados na etapa anterior para o mês de março.

Sob céu parcialmente nublado, a luz refletida pelo entorno (CRE) engloba a luz do céu e do Sol. O TropLux permite que as contribuições do sol refletido e da Componente de Céu direta sejam analisadas separadamente. Esse recurso foi utilizado para comparar a contribuição percentual da CC, da luz do Sol e do céu refletidas. Considerando a iluminância total como sendo 100%, a contribuição percentual do sol refletido e da CC pode ser determinada através da equação:

$$T_c = E_c / E_i * 100\% \qquad (24)$$

Onde $T_c$ é a taxa percentual que representa a contribuição da componente para a iluminância total, $E_i$ é a iluminância total e $E_c$ é o valor da componente que se quer analisar. A vantagem desse método é oferecer um mesmo parâmetro para comparar diferentes variáveis, como orientação da janela, horário e data. Esse método para análise de componentes de iluminação é semelhante ao usado por Cabús (2004).

As análises dessa terceira etapa foram feitas para o dia 22 de março, com janela orientada para o sul e leste. Esta etapa compara as quatro alturas de cânion em relação à contribuição percentual da CC, do sol e da luz do céu, refletidas.

Nos cânions mais altos (1/2 e 1/3), a combinação de obstrução do entorno e obstrução dos protetores solares faz com que a Componente de Céu seja nula, havendo apenas componentes refletidas.

Por conta do uso dos protetores solares, a partir das 8h00min, em todas as alturas a contribuição da luz do Sol ocorre apenas por reflexão do entorno (CRE).

Para a janela leste, as contribuições do sol refletido, acima de 50% ocorrem aproximadamente entre 11h00min e 14h00min, ou 30% das horas de trabalho, nos cânions 1/2 e 1/3, onde são maiores. No cânion 1/1, a contribuição do sol refletido ultrapassa os 50% entre 13h00min e 15h30min e é consideravelmente maior em relação à janela sul. Para todas as alturas, a contribuição do sol refletido é consideravelmente maior a partir das 10h00min e durante a tarde, quando o sol incide no solo e nas obstruções em frente à janela. Ver Gráfico 10.

Para janela orientada ao sul, que alcançou as maiores iluminâncias no mês de março, a contribuição do Sol supera os 50% entre 9h30m e 14h30m, ou 50% do horário de trabalho, sendo maior para os cânions de altura 1/2 e 1/3. Este horário coincide com as maiores alturas solares do dia e maiores iluminâncias, solar normal e difusa horizontal. Ver Gráfico 11.

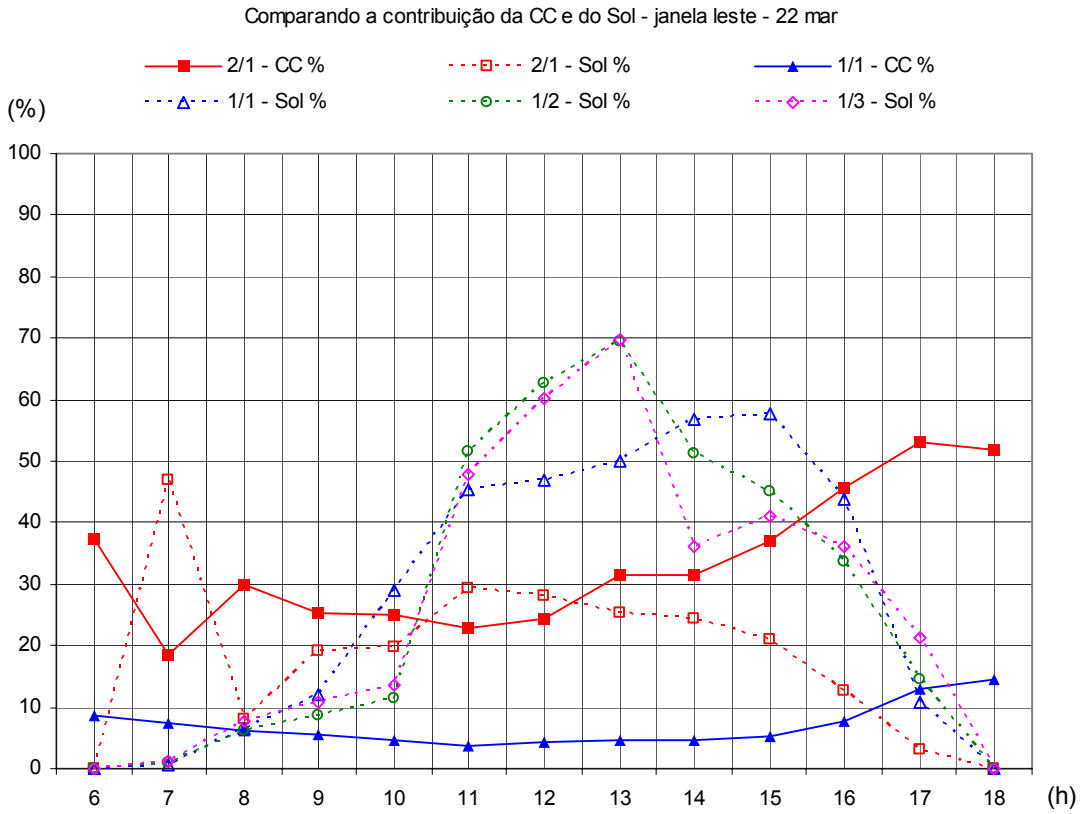



**Gráfico 10 - Comparando as contribuições do sol refletido e da Componente de Céu, para janela leste, no dia 22 março.**

Entre os cânions mais baixos (2/1 e 1/1), a Componente de Céu (CC) praticamente não ultrapassou os 50% em nenhuma das circunstâncias analisadas. Os seus valores foram especialmente baixos para o cânion 1/1, cuja abertura possui um ângulo AVO de 30°, com Fator de Céu de 17% a leste e de 16%, a sul.

Entre todas as condições analisadas, apenas no cânion 2/1, a contribuição da Componente de Céu superou a contribuição do sol refletido.

A contribuição da CC, quando existiu, não foi superior à contribuição da luz do céu refletida em nenhum momento.

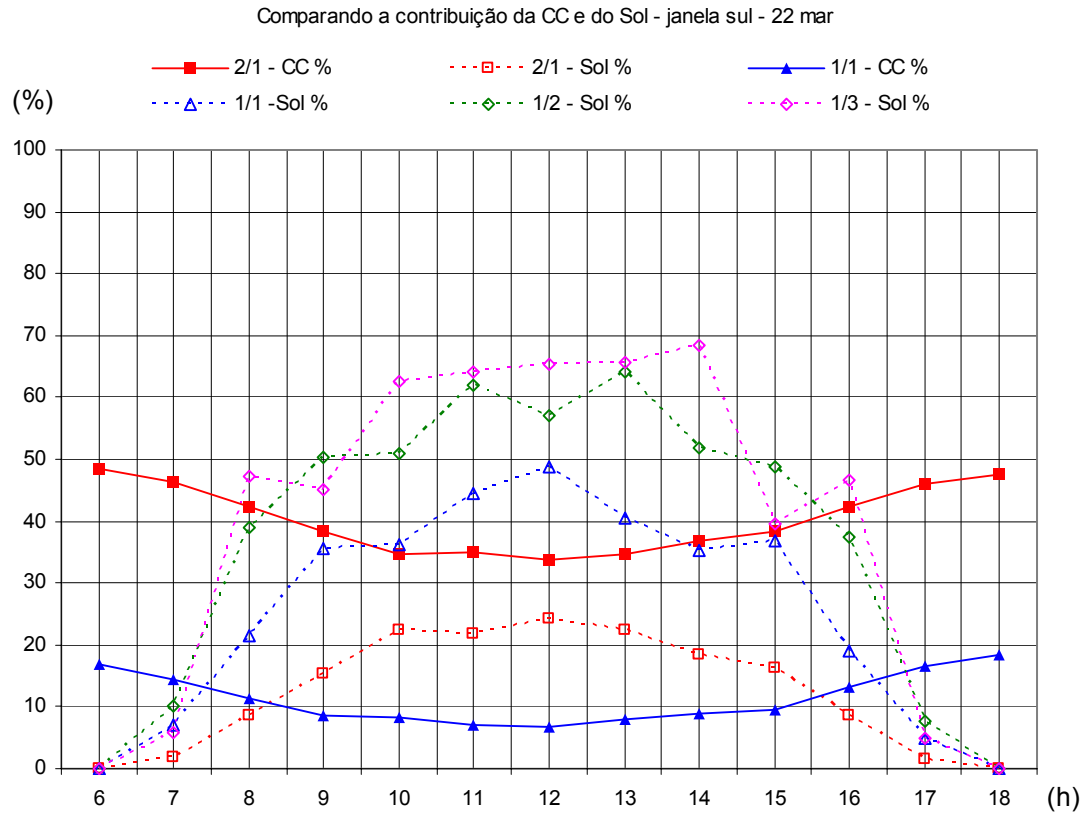



**Gráfico 11 - Comparando a contribuição do sol refletido e da Componente de Céu, para janela sul, no dia 22 de março.**

A partir das análises de resultado aqui realizadas, foi possível chegar a algumas conclusões a respeito das questões propostas. Os principais resultados observados foram:

- O Modelo-3, que possuía o maior Fator de Céu, não apresentou o melhor desempenho em todas as condições simuladas;
- O Modelo-1 com altura 10m, que possuía Fator de Céu na janela de 91%, teve desempenho melhor que o Modelo-0, sem obstruções, devido a luz do sol refletida pelas obstruções opostas à janela, nos três dias analisados, para janela leste, e nos meses de março e junho, para janela sul;
- A janela sul apresentou um desempenho melhor que a janela leste, nos meses de março e junho, embora o seu Fator de Céu fosse menor, isso se dever à luz do sol refletida pelas obstruções opostas a janela nestes meses;

- Apesar dos reduzidos fatores de céu, as iluminâncias ao longo do dia foram significativas, devido à luz refletida pelo entorno que representou a maior parte da iluminância;
- Os melhores desempenhos das janelas sul e leste coincidiram com as maiores contribuições relativas do Sol e podem ser relacionadas com os menores ângulos de incidência dos raios solares nas obstruções do entorno, para cada orientação.
- Entre todas as condições analisadas, apenas no cânion 2/1, a contribuição da Componente de Céu superou a contribuição do Sol.
- A contribuição da CC, quando existiu, não foi superior à contribuição da luz do céu refletida em nenhum momento.

O próximo capítulo relaciona as principais conclusões do trabalho, com base nos resultados aqui relacionados e fazendo referência aos objetivos propostos.

# 5 CONCLUSÕES

Esta seção resume as principais conclusões do presente trabalho, relacionando-as aos objetivos propostos. Ela também relaciona as principais limitações e as sugestões para trabalhos futuros a partir dos resultados alcançados.

## 5.1 Conclusões e objetivos específicos

O primeiro objetivo específico foi avaliar o uso do Fator de Céu, enquanto parâmetro único, para a definição de modelos urbanos adequados ao aproveitamento da luz natural no meio urbano, no trópico úmido. A redução das iluminâncias, à medida que se aumenta a altura dos cânions, mostra que o Fator de Céu tem influência importante para a iluminação, ainda que a maior parte dessa iluminação seja composta por luz refletida. No entanto, ele se mostrou insuficiente para estimar o desempenho observado nos modelos, quando utilizado como parâmetro único. Na primeira e segunda etapa de análise, observou-se que os melhores desempenhos não estiveram sempre relacionados aos maiores fatores de céu.

O segundo objetivo específico foi avaliar a importância do uso da orientação da abertura e das obstruções, enquanto parâmetro adicional, para a definição de modelos urbanos adequados ao aproveitamento da luz natural no meio urbano, no trópico úmido. As diferenças de desempenho entre as orientações sul e leste observadas, mostraram a influência desse parâmetro. A janela sul, que apresentava menor Fator de Céu, teve um desempenho melhor, nos meses de março e junho, para as condições analisadas. O melhor desempenho demonstrado pelas janelas leste na parte da tarde, está relacionado à geometria solar e não pode ser prevista pelo Fator de Céu. Assim, a orientação mostrou-se um parâmetro importante a ser utilizado na definição de modelos, juntamente com o Fator de Céu.

O terceiro objetivo específico foi avaliar a contribuição da luz do Sol e do céu, refletidas, para a iluminação das edificações no meio urbano, no trópico úmido. Os resultados da terceira etapa de análise mostraram a influência significativa da luz refletida para a iluminação de interiores, principalmente nos cânions de menor Fator de Céu. A luz do céu refletida superou a contribuição da Componente de Céu direta

em todas as condições analisadas. O mesmo se observou com a luz do Sol refletida, com exceção apenas do cânion 2/1.

O quarto e último objetivo específico foi contribuir para formar diretrizes de desenho urbano que orientem projetistas e planejadores no desenvolvimento de modelos urbanos que propiciem um maior aproveitamento da luz natural no trópico úmido. A partir dos resultados alcançados, é possível afirmar que uma abordagem adequada para este objetivo deve considerar a orientação e as proteções solares na definição de fatores de céu adequados. Também deve considerar a importância da luz do Sol e do céu, refletidas, tendo uma atenção especial às refletâncias do entorto e à geometria solar.

## 5.2 Conclusões e objetivo geral

Presente trabalho teve como objetivo geral, analisar a influência do entorno construído e da luz refletida para a iluminação natural de edificações no trópico úmido.

Os resultados sugerem que as componentes refletidas têm grande importância para a iluminação natural no trópico úmido. Em todos os casos analisados, ela se mostrou superior à Componente de Céu direta. Conclui-se que uma abordagem correta para tratar a disponibilidade de luz natural no ambiente urbano do trópico úmido, deve adotar parâmetros de refletância média do entorno. Isto é particularmente importante no tocante a refletância dos materiais do solo no espaço público, onde é mais fácil a ação do poder público. Em relação à fachada dos edifícios que formam as obstruções do entorno, as normas podem estipular uma relação entre área e refletância, para manter a refletância média dentro de padrões adequados.

Os resultados também apontam para a contribuição relevante da luz do Sol refletida para a iluminação. Essa contribuição percentual aumenta com a altura dos cânions e a conseqüente redução do Fator de Céu. Conclui-se que além de regular a refletância do entorno, principalmente nos cânions mais altos, é também importante considerar o tempo de insolação no solo e nas obstruções. O melhor desempenho apresentado pelas janelas orientadas ao sul, nos meses de março e junho, e pelas

janelas leste na parte da tarde, mostra a utilidade do uso da geometria solar para estudar os ângulos de incidência dos raios solares.

O desempenho superior dos cânions de altura 10m, quando comparados ao modelo livre de obstruções (Modelo-0), demonstrou que as obstruções têm potencial para ampliar a iluminância nas edificações, não podendo ser tratadas apenas como obstáculos à luz natural.

Através dessas considerações finais, espera-se contribuir para uma nova abordagem na definição de modelos urbanos e instrumentos de planejamento mais adequados ao aproveitamento a luz natural no trópico úmido.

## 5.3 Limitações do Trabalho

- A falta de estudos precedentes sobre o tema nas condições do trópico úmido, gerou uma lacuna de referências, e com isso, um grande número de variáveis a serem analisadas, das quais, os modelos e simulações realizadas puderam apenas abranger uma pequena parte. Nessa subseção serão listadas as principais limitações do trabalho, devidas à adequação ao cronograma proposto ou aos principais objetivos da dissertação:
- Não foi possível avaliar mais opções de orientação, posição da sala de referência, afastamentos, ângulos de obstrução, número de pavimentos, alturas e refletâncias dos modelos de entorno. Ainda assim, os modelos analisados já foram suficientes para produzir um conjunto de resultados que serviu aos objetivos propostos;
- Não foram avaliados diferentes tipos de proteção solar, cujo poder de reflexão poderia ter melhorado o desempenho de alguns modelos;
- Não foi avaliado o efeito de proteções nas aberturas contra as chuvas freqüentes do trópico úmido, nem de dispositivo de controle de ventilação natural;
- Como se optou pela iluminância média, por motivos de simplificação, não foi avaliada a distribuição de iluminâncias no plano de trabalho;

- Não foram feitas avaliações de ofuscamento pela luminância das obstruções do entorno, que seriam importantes na definição das refletâncias médias. No entanto, o ofuscamento está ligado a um conjunto de variáveis que lhe confere certa flexibilidade de tratamento, sendo mais adequado analisá-lo separadamente;
- Todas as superfícies foram consideradas com uma reflexão perfeitamente difusa, comprometendo a avaliação de efeitos direcionais determinados por reflexões especulares e mistas. No entanto, esta condição se aproxima bastante da encontrada na maior parte das superfícies que compõem o espaço urbano;
- O céu de Maceió foi tratado através do único estudo disponível, realizado por Cabús (2002), através dos 15 padrões adotados pela CIE (CIE, 1999) e de uma pequena amostra de dados medidos.

## 5.4 Sugestões para trabalhos futuros

- Padrões adequados de refletância do entorno para o trópico úmido, considerando a ocorrência de ofuscamento.
- Instrumentos legais para o regulamento das refletâncias médias do entorno.
- Modelos urbanos adequados ao aproveitamento da luz natural no trópico úmido, combinando orientação, proteção solar e Fator de Céu.
- Estudos sobre as refletâncias dos materiais, considerando sua combinação de reflexão especular e difusa.
- Estudos sobre o aproveitamento da luz do Sol refletida, considerando as probabilidades de brilho solar.
- Efeito das obstruções do entorno com reflexão especular e mista para a iluminação natural de interiores.

# 6 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Iluminação de interiores* (NBR 5413) ABR 1992, ABNT, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Iluminação natural-parte 1: conceitos básicos e definições.* (Projeto 02:135.02-001) 1999.

ALUCCI, Márcia P; SCARAZZATO, Paulo S. *Subsídios para normalização da iluminação natural no Brasil*. IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. São Paulo, 1997.

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, *A. Daylighting in architecture: a european reference book*. Commission of European Communities. Bruxelas and Lexemburg – James & James Ltda. 1998.

BITTENCOURT, Leonardo S. *Uso das Cartas Solares: diretrizes para arquitetos*. 4ed- Maceió – Ed. Edufal. 2004.

BITTENCOURT, Leonardo S; CÂNDIDO, Christhina.. *Introdução à ventilação natural*. Maceió – Ed. Edufal. 2005.

BROWN, G. Z.; DEKAY, Mark. *Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura*. Trad. Alexandre Ferreira da Silva Salvaterra. 2ed – Porto Alegre: Bookman. 2004.

CABÚS, Ricardo C. *Análise do desempenho luminoso de sistema de iluminação zenital em função da distribuição de iluminâncias*. Dissertação. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

CABÚS, Ricardo C. *Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil*. (PhD). Architecture, University of Sheffield, Sheffield, 2002.

CABÚS, Ricardo C. *Influência da luz refletida no solo na iluminação natural nos trópicos: comparando o desempenho de protetores solares*. I Encontro Latino Americano e X Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. São Paulo: ENTAC. 2004.

CABÚS, Ricardo C. *Troplux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações*. VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído - ENCAC e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído - ELACAC. Maceió. 2005.

CABÚS, Ricardo C. *Troplux – manual do usuário*. Maceió: Grilu. 2005.

CABÚS, Ricardo C. *TropSolar*, versão 2.0: Cabús, Ricardo, 2005.

CABÚS, Ricardo C. *TropLux*, versão 2.13: Cabús, Ricardo, 2006.

CARAM, Rosana M.; LABAKI, Lucila C.; SICHIERI, Eduvaldo P. *Indicativos para o emprego apropriado de vidros planos na construção civil, segundo critérios espectrofotométricos*. III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Gramado, 1995.

CIE - Commission Internationale de l'Eclairage. *Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky*. CIE. Wien. (CIE DS 011.2/E:2002).

CIE – Commission Internationale de l'Eclairage. KITTLER, Richard. *Spatial distribution of daylight – CIE Standard Universal Skies*. (CIE TC3-15) Draft Standard : 1999.

CORBELA, Oscar; YANNAS, Simon. *Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental*. Rio de Janeiro: Revan, 2003. 288p.

ELIASSON, *Ingegard. The use of climate knowledge in urban planning.* Landscape and Urban Planning, n. 48, p. 31-44. 2000. il.

FATHY, Hassan. *Natural energy and e vernacular architecture : principles and examples with reference to hot arid climates*. The United Nations University. London -The University of Chicado Press. 1986.

GAZETAWEB. *Apresenta informações sobre Maceió e Alagoas*. Gazetaweb.com. Disponível em www.gazetaweb.globo.com. Acesso em 03 de Janeiro de 2006. il. color.

GU, Lianhong, et all. *Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil*. Agricultural and Forest Meteorology, n. 106, p. 117-129. 2001

HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. *Iluminação natural*. Trad. Antônio S. L. de Farias. 2 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975.

IES – Illuminating Engeneering Society of North América. *Recommended practice for the calculation of daylight availability*. Jornal of IES, july 1984.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatítica. *Apresenta Mapas e dados estatísticos sobre o Brasil*. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em 28 de abr. de 2005. il. color.

KOENIGSBERGER, O. et all. *Vivendas y edifícios en zonas cálidas y tropicales*. Madrid, Ed. Paraninfo, 1977.

KITTLER, Richard; PEREZ, Richard; DARULA, Stan. *A new generation of sky standards*. Lux Europe, 1997. 359-373 p.

LAM, W. M. *Sunlighting as a formigiver for architecture*. New York: VNR Comp. 1986.

LAMBERTS, Roberto, DUTRA, Luciano, PEREIRA,Oscar R. *Eficiência energética na arquitetura*. São Paulo: PW, 1997.

LINES, J. A. *Principles of Natural Lighting*. Amsterdam, London, New York: Elsevier, 1968.

LITTLEFAIR, Paul J. *Site planning for daylight and sunlight: A guide to good practice*. Buiding Research Establishment Report (CI/S+B – (N11) (A3)), 1991

MACEIÓ-AL. Código de Edificações da cidade de Maceió-AL, Lei n° 3537, 23 de dezembro de 1985. *Institui o Código de Edificações de Maceió compreendendo os objetivos, diretrizes e demais disposições desta Lei*. Plano Diretor de Maceió, 1985.

MACEIÓ-AL. Código de Edificações da cidade de Maceió-AL, Lei n° 5354, 16 de janeiro de 2004. *Institui o Código de Edificações de Maceió compreendendo os objetivos, diretrizes e demais disposições desta Lei*. Plano Diretor de Maceió. 2004.

MAJOROS, András. *Daylighting*, série Passive and Low Energy Architecture Internacional – Design tools and techniques. PLEA Notes, n° 4, Ed. Universidade de Queensland, Austrália. 1998

MOORE, F. *Concepts and practice or architectural daylighting*. New York: VNR Comp. 1985.

NG, Edward. *Studies on daylight design and regulation of high-density residential housing in Hog Kong*. Lighting Research & Technology, v.35, n.2, p.127-139. 2002.

PEREIRA, Fernando O. R. iluminação: apostila do curso de especialização em engenharia de segurança de trabalho. CCT. UFSC, Florianópolis-SC, 1994.

PEREIRA, Fernando O. R. *Envelope solar: um exercício teórico ou uma proposição viável*. III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Gramado, 1995.

SCARAZZATO, Paulo S. *Iluminação dos ambientes construído: normatizar é preciso*. III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Gramado, 1995.

SILVA, Roberto Starck N. da. *Iluminação*. São Paulo: 1977. 352p.

STEVENS, W. R. Building *physics: lighting. Seeing in the artificial environment*. London: Pergamon Press, 1969.

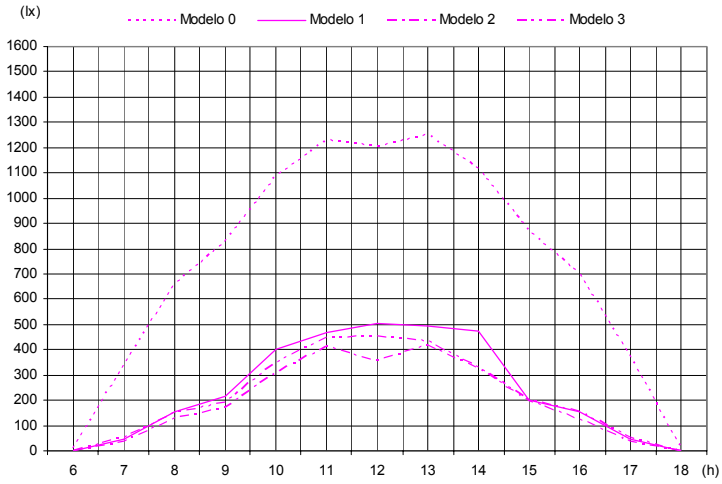
TREGENZA, Peter. R. *Mean daylight illuminance in rooms facing sunlit streets*. Building and Environment, v.30, n.1, p.83-89. 1995.

TREGENZA, Peter. *Luminance and reflectance of clouds*. Lighting Research & Technology, v.28, n.4, p.165-175. 1996.

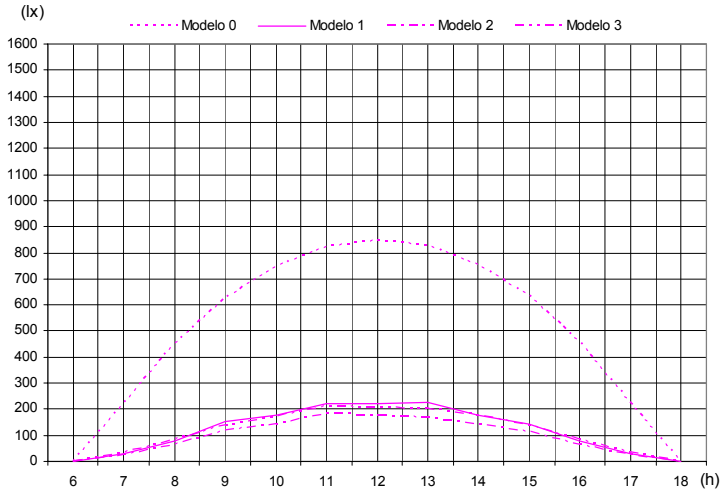
TREGENZA, Peter. *Standard skies for maritime climates*. Lighting Research & Technology, v.31, n.3, p.97-106. 1999.

# Apêndice A – GRÁFICOS

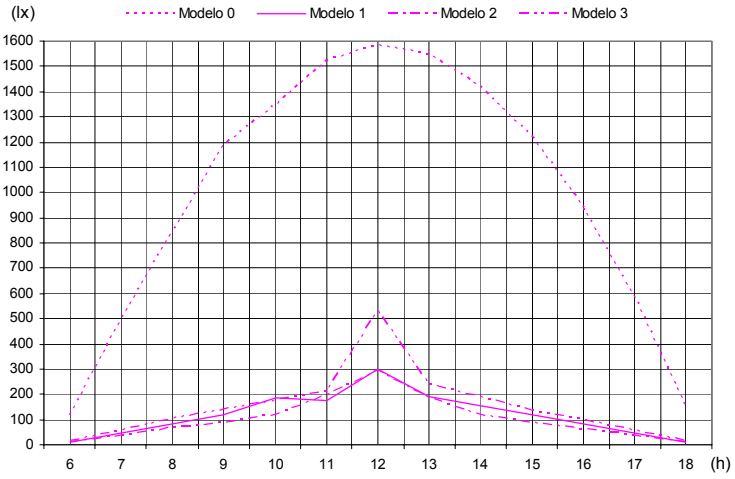
Comparando os modelos 0, 1, 2 e 3 - cânion 1x3 - janela sul - 22 mar



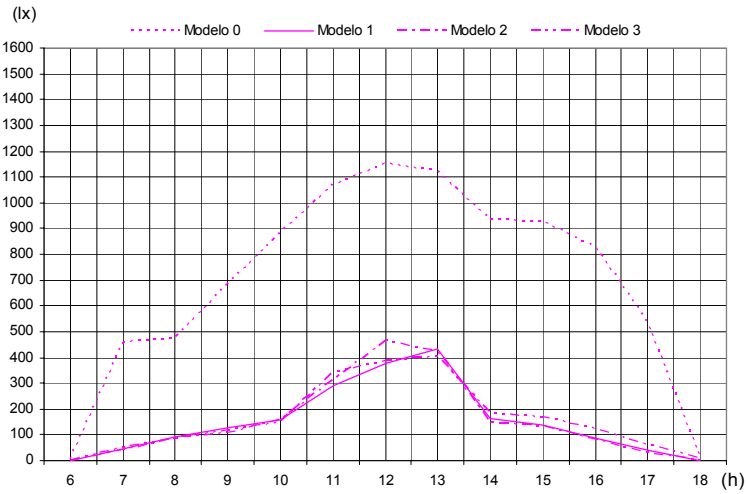

Comparando modelos 0, 1, 2, 3 - cânion 1x3 - janela sul - 22 jun



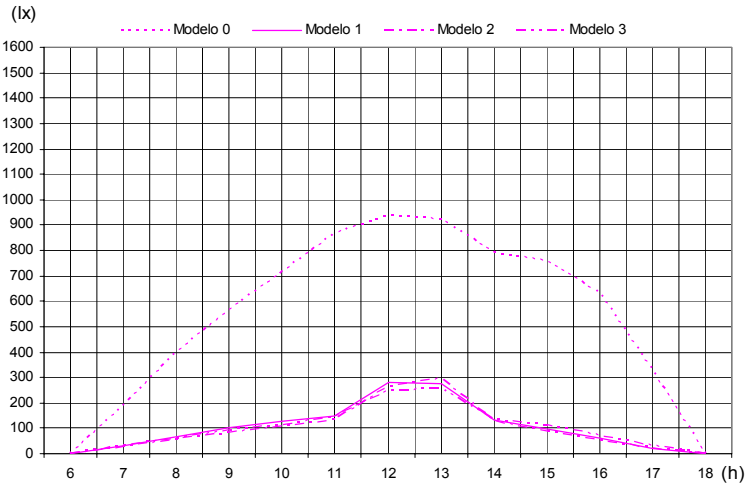

Comparando modelos 0, 1, 2 e 3 - cânion 1x3 - janela sul - 22 dez



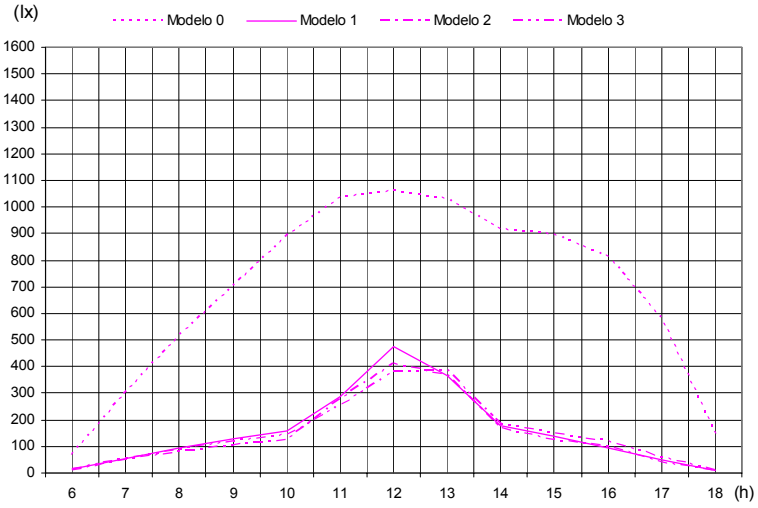
Comparando modelos 0, 1, 2 e 3 - cânion 1x3 - janela leste - 22 mar

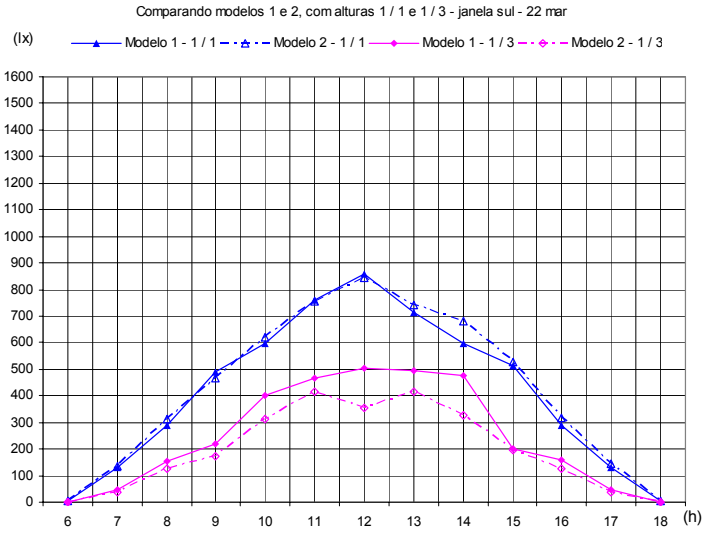


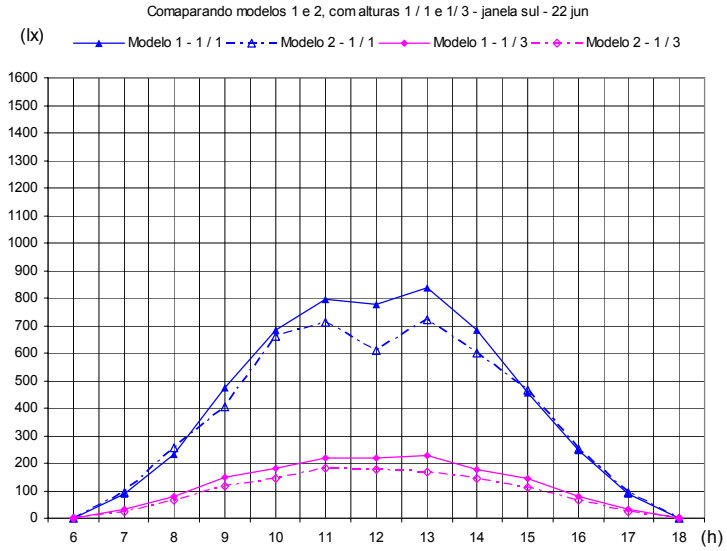

Comparando modelos 0, 1, 2 e 3 - cânion 1x3 - janela leste - 22 jun

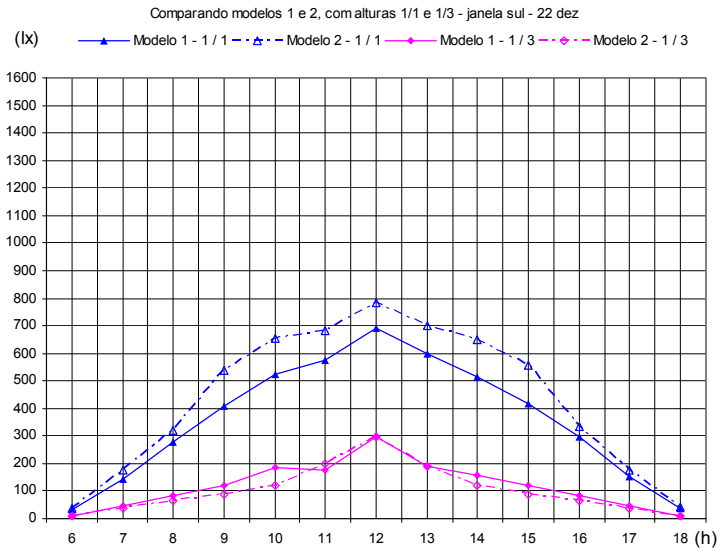



Comparando modelos 0, 1, 2 e 3 - cânion 1x3 - janela leste - 22 dez




Comparando modelos 1 e 2, com alturas 1 / 1 e 1 / 3 - janela sul - 22 mar
(lx)
Modelo 1 - 1 / 1
Modelo 2 - 1 / 1
Modelo 1 - 1 / 3
Modelo 2 - 1 / 3
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 (h)


Comaparando modelos 1 e 2, com alturas 1 / 1 e 1/ 3 - janela sul - 22 jun
(lx)
Modelo 1 - 1 / 1
Modelo 2 - 1 / 1
Modelo 1 - 1 / 3
Modelo 2 - 1 / 3
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 (h)


Comparando modelos 1 e 2, com alturas 1/1 e 1/3 - janela sul - 22 dez
(lx)
Modelo 1 - 1 / 1
Modelo 2 - 1 / 1
Modelo 1 - 1 / 3
Modelo 2 - 1 / 3
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 (h)