

# **Iluminação Natural em Edificações: cálculo de iluminâncias internas - desenvolvimento de ferramenta simplificada.**

**ROBERTA VIEIRA GONÇALVES DE SOUZA**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.**

**Área de Concentração:           Construção Civil**

**Sub-área de concentração:   Conforto Ambiental**

**Orientador: Prof. Fernando Oscar R. Pereira, PhD**

**Florianópolis**

**1997**

SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. **Iluminação natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas - desenvolvimento de ferramenta simplificada.** Florianópolis, 1997. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Defesa: 29/08/97

O trabalho tem como escopo a definição de uma metodologia para determinação de iluminâncias em plano horizontal no ambiente construído sob condições de céu encoberto e céu claro para diversas alturas solares através de procedimento gráfico simplificado. Propõe-se a implementação de um método gráfico para utilização em avaliações iniciais da quantidade de luz que se obtém por determinada abertura - para verificação e comparação de sistemas de iluminação natural ou para verificação da qualidade e eficiência do projeto de iluminação em códigos de obra.

Palavras-chave: Conforto Ambiental; Iluminação natural; Método gráfico; Diagrama de iluminação



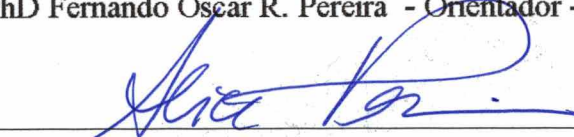
# FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 29/ 08/ 97,  
pela comissão examinadora



---

Prof. PhD Fernando Oscar R. Pereira - Orientador - Moderador



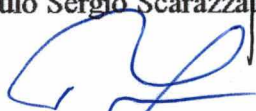
---

Prof. PhD Alice T. Cybis Pereira - Examinadora



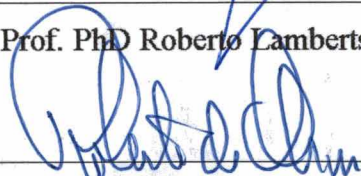
---

Prof. Dr. Paulo Sérgio Scarazzato - Examinador



---

Prof. PhD Roberto Lamberts - Examinador



---

Prof. Dr. Roberto de Oliveira - Coordenador do CPGEC

A meus pais,  
eternos incetivadores.

# AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, por sua orientação em todos os passos do curso e no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFSC, por ter proporcionado as condições para desenvolver o presente trabalho.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, que através de seus coordenadores e secretaria forneceram constante apoio e disponibilidade para obter ou fornecer recursos, materiais e equipamentos necessários ao bom andamento do curso.

Ao Laboratório de Conforto Ambiental do Departamento de Arquitetura pelo fornecimento de equipamentos e espaço físico para a realização da parte experimental deste trabalho.

Ao Laboratório de Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica, por ter cedido espaço para a colocação da maquete para realização das medições previstas.

Ao Laboratório de Meios Porosos e Transferências de Calor, LMPT do Departamento de Engenharia Mecânica, pela avaliação de funcionamento de aparelhos eletrônicos e pelo empréstimo de equipamentos de medição.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq por seu programa de financiamento e fornecimento de bolsas de estudo que possibilitam a existência dos cursos de pós graduação.

À amiga Ediane pelo paciente auxílio na correção desta dissertação.

Aos todos os amigos que colaboraram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

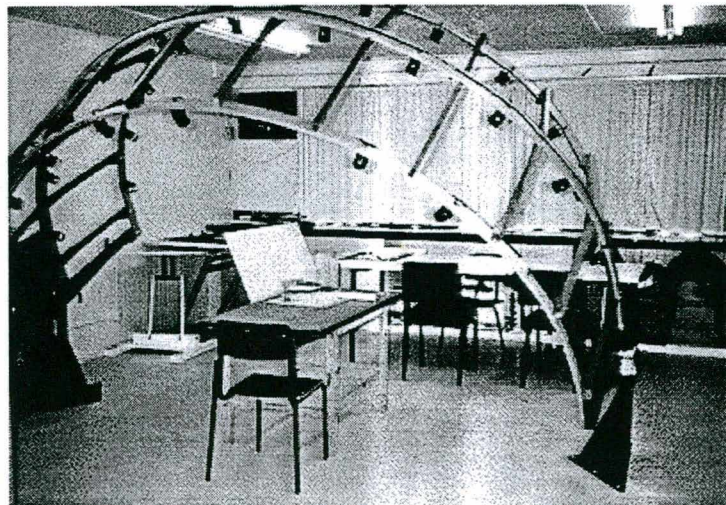


Figura i - Laboratório de Conforto Ambiental do Departamento de Arquitetura da UFSC

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>		<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>		<b>iv</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b>		<b>vii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS</b>		<b>viii</b>
<b>RESUMO</b>		<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b>		<b>xiii</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>01</b>
1.1	A COLOCAÇÃO DO PROBLEMA .....	01
1.2	OBJETIVOS .....	02
1.2.1	Objetivo Geral .....	02
1.2.2	Objetivos Específicos .....	02
1.3	HIPÓTESES .....	03
1.3.1	Hipóteses de Trabalho .....	03
1.3.2	Hipóteses Subjacentes .....	03
1.4	JUSTIFICATIVA .....	04
1.4.1	O Cálculo da Iluminação Natural .....	04
1.4.2	Uso Prático e Teórico dos Resultados a Alcançar .....	04
1.4.3	Modelos de Céu e Legislação .....	06
1.4.4	Estrutura do Trabalho .....	08
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>10</b>
2.1	O PROJETO E O PAPEL DO PROJETISTA .....	10
2.2	O PROJETO DE ILUMINAÇÃO .....	11
2.3	ILUMINAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES .....	13
2.3.1	O Uso da Luz Natural .....	14
2.3.2	Conforto Visual e Luz Natural .....	14

2.4	FONTES DE LUZ NATURAL .....	18
2.4.1	Luz do Sol .....	18
2.4.2	Luz do Céu .....	18
2.4.3	Fontes Indiretas .....	20
2.5	MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS .....	20
2.5.1	Condições de Céu .....	21
2.5.2	Distribuição de Luminâncias para Céu Encoberto .....	22
2.5.3	Distribuição de Luminâncias para Céu Claro .....	23
2.6	MÉTODOS DE PROJEÇÃO DA ABÓBADA CELESTE .....	24
2.6.1	Hemisfera Unitária .....	25
2.6.2	Sistemas de Projeção .....	26
2.7	DIVISÃO DA ABÓBODA CELESTE .....	28
2.7.1	Divisão Proposta por Girardin .....	28
2.7.2	Divisão Proposta por Tregenza .....	28
2.8	ESTIMATIVA DA ILUMINAÇÃO NATURAL .....	30
2.8.1	Componente Celeste - CC .....	30
2.8.2	Componente Refletida Externa - CRE .....	31
2.8.3	Componente Refletida Interna - CRI .....	32
2.9	MÉTODOS PARA CÁLCULO DE ILUMINAÇÃO NATURAL .....	33
2.9.1	<i>Daylight Factor - DF</i> .....	34
2.9.2	Fatores de Correção para Sujeira, Vidros e Molduras .....	36
2.9.3	Diagramas da BRS - Cálculo da Componente Celeste .....	36
2.9.4	Métodos de Grade .....	37
2.9.5	Método do Fluxo Total .....	37
2.9.6	Coefficientes de Luz Natural .....	38
2.9.7	Diagramas de Waldram .....	38
2.9.8	Diagramas de <i>Pepper-Pot</i> .....	39
2.9.9	Modelos em Escala .....	40
2.9.9.1	Uso de Modelos em Escala .....	41
2.9.9.2	Testes Com Modelos em Escala .....	42
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	45
3.1	ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA .....	45

3.2	ELABORAÇÃO DOS DIAGRAMAS .....	46
3.3	GEOMETRIA DA INSOLAÇÃO .....	46
3.4	REPRESENTAÇÃO BIDIMENSIONAL DA ABÓBODA CELESTE .....	51
3.4.1	Projeções da Hemisfera Unitária em Plano Bidimensional .....	52
3.5	DIVISÃO DA ESFERA UNITÁRIA E FATORES DE FORMA DE CADA SUBDIVISÃO .....	53
3.5.1	Cálculo dos Fatores de Forma para a Esfera Unitária .....	55
3.6	DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS .....	56
3.6.1	Distribuição de Luminâncias para Céu Uniforme .....	56
3.6.2	Distribuição de Luminâncias para Céu Encoberto .....	57
3.6.3	Distribuição de Luminâncias para Céu Claro .....	58
3.6.3.1	Relação de Luminância Entre Um Ponto e o Zênite .....	58
3.6.3.2	Céu Claro Padrão CIE .....	59
3.6.3.3	Ângulo Entre o Sol e o Centro do Elemento de Céu .....	59
3.6.3.4	Determinação do Fator de Luminâncias .....	60
3.6.4	Construção de Máscaras de Obstrução .....	61
3.7	CÁLCULO DA COMPONENTE CELESTE - CC .....	63
3.8	COMPARAÇÃO COM <i>PEPPER POT</i> .....	65
3.9	CÁLCULO DA COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA - CRE	67
3.9.1	Céu Encoberto .....	67
3.9.2	Céu Claro .....	68
3.9.2.1	Obstrução não Iluminada pelo Sol .....	68
3.9.2.2	Obstrução Iluminada pelo Sol .....	69
3.10	CÁLCULO DA COMPONENTE REFLETIDA INTERNA - CRI	72
3.11	CÁLCULO DA CONTRIBUIÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL - CIN	73
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>74</b>
4.1	APRESENTAÇÃO DO MODELO .....	74
4.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO .....	76
4.2.1	Cálculo da Componente Celeste - CC .....	76
4.2.2	Cálculo da Componente Refletida Interna - CRI .....	80



4.3	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL .....	82
4.3.1	Medição da Quantidade de Luz .....	82
4.3.2	Fotometria .....	82
4.3.3	O Modelo em Escala Reduzida .....	83
4.3.3.1	Localização do Modelo .....	84
4.3.3.2	Orientação das Janelas .....	86
4.3.3.3	Salas do Modelo .....	87
4.3.4	Medição dos Níveis de Iluminação .....	88
4.3.5	Equipamentos Utilizados .....	89
4.3.5.1	Fotosensores .....	89
4.3.5.2	DataLogger LI-1000 .....	93
4.3.6	Fontes de Erro nas Medições .....	94
4.3.7	Tratamento de Dados .....	95
4.3.7.1	Correção dos Valores de Iluminação Difusa Externa .....	95
4.3.7.2	Verificação da Refletividade das Superfícies do Modelo .....	96
4.3.7.3	Cálculo da CRI para Superfícies Internas do Modelo .....	98
4.3.8	Medições .....	98
4.4	COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	107
4.4.1	Sala de Superfícies Pretas .....	107
4.4.1.1	Comparação entre Valores Medidos e Valores Calculados pelos Métodos DCRL e <i>Pepper Pot</i> .....	108
4.4.2	Salas de Superfícies Brancas .....	112
4.5	CONSIDERAÇÕES .....	114
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	117
5.1	CONCLUSÕES .....	117
5.2	RECOMENDAÇÕES .....	119
6	GLOSSÁRIO .....	121
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	126
	ANEXO 1 .....	131
	ANEXO 2 .....	143
	ANEXO 3 .....	144
	ANEXO 4 .....	149

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema da estruturação da pesquisa.	09
Figura 2.1	Distribuição de luminâncias para céu encoberto	22
Figura 2.2	Distribuição de luminâncias para céu claro	22
Figura 2.3	Projeção de uma área S em uma esfera unitária	25
Figura 2.4	Sistema de projeção ortográfico	26
Figura 2.5	Sistema de projeção equidistante	27
Figura 2.6	Sistema de projeção estereográfica	27
Figura 2.7	Projeção estereográfica de acordo com a divisão proposta por GIRARDIN	28
Figura 2.8	Projeção estereográfica de acordo com a divisão proposta por TREGENZA	29
Figura 2.9	Componente celeste - CC	31
Figura 2.10	Componente refletida externa - CRE	31
Figura 2.11	Componente refletida interna - CRI	32
Figura 2.12	Definição do <i>Dayling Factor</i>	35
Figura 2.13	Diagrama de Waldram para céu padrão CIE	39
Figura 2.14	Diagrama <i>Pepper Pot</i> para altitude solar de $60^{\circ}$	40
Figura 2.15	Céus artificiais	44
Figura 3.1	Azimute e altitude solar	47
Figura 3.2	Diagrama de trajetórias solares para Florianópolis, SC	50
Figura 3.3	Projeção de um objeto na esfera unitária	51
Figura 3.4	Projeção da abóboda celeste em plano bidimensional	52
Figura 3.5	Projeção das bandas de altitude de $10^{\circ}$ em forma estereográfica	53
Figura 3.6	Projeção estereográfica de $10^{\circ}$ em altitude por $10^{\circ}$ de azimuth	53
Figura 3.7	Projeção ortográfica da abóboda celeste com incremento de altitude de $10^{\circ}$	55

Figura 3.8	Projeção ortográfica da abóboda celeste com incremento de altitude de $12^{\circ}$	56
Figura 3.9	Desenho esquemático dos ângulos utilizados para determinação do ângulo formado entre o sol e determinado ponto situado na abóboda celeste	60
Figura 3.10	Diagrama usado para construção de máscaras de obstrução	62
Figura 3.11	Máscara de obstrução para combinação de placas horizontais e verticais externas a uma janela	62
Figura 3.12	DCRL para céu claro para altitude solar de $15^{\circ}$	65
Figura 3.13	Porção de céu “vista” através de uma superfície refletora	68
Figura 3.14	Projeção de obstrução externa na hemisfera unitária vista através de uma abertura	70
Figura 3.15	Diagrama com fatores de forma para a hemisfera unitária	71
Figura 3.16	Projeção estereográfica das superfícies internas de um ambiente	72
Figura 4.1	Planta esquemática do ambiente mostrando a disposição dos três pontos de medição internos com respectivos ângulos de visão de abertura	75
Figura 4.2	Planta esquemática do ambiente com as medidas obtidas no modelo em escala	76
Figura 4.3	Localização do azimute do sol no DCRL	77
Figura 4.4	Superposição da máscara de obstrução sobre o DCRL	78
Figura 4.5	Parcela de céu não obstruída pela abertura de iluminação	78
Figura 4.6	Máscaras de obstrução para os pontos de medição	79
Figura 4.7	Projeção das superfícies internas do ambiente em relação aos pontos de medição	81
Figura 4.8	Modelo em escala reduzida posicionado sobre prancheta inclinável	84
Figura 4.9	Orientação do modelo em escala reduzida - vista fachada sul	85
Figura 4.10	Localização do prédio da Engenharia Mecânica B no campus da UFSC	85
Figura 4.11	Localização do modelo em escala reduzida no prédio da Engenharia Mecânica B	85

Figura 4.12	Projeção do entorno da maquete em lente de projeção equidistante	86
Figura 4.13	Vista da porção sul a que o modelo em escala reduzida está sujeito	87
Figura 4.14	Vista das aberturas das salas em estudo com anteparo revestido de camurça fosca preta na parte inferior do modelo para minimizar as reflexões do solo	88
Figura 4.15	Suportes cilíndricos para encaixe dos fotosensores	90
Figura 4.16	Diagrama do circuito de amplificação	90
Figura 4.17	Caixa do circuito de amplificação	91
Figura 4.18	Dispositivo de calibração das fotocélulas Megatron	91
Figura 4.19	Teste dos fotosensores Megatron encaixados em suportes cilíndricos de madeira revestidos de preto ou branco, ligados aos datalogger LI-1000	93
Figura 4.20	Esquema com o processo de medição da refletância de superfícies	97
Figura 4.21	Céu encoberto com distribuição de luminâncias de céu encoberto típico da cidade de Florianópolis-SC	102
Figura 4.22	Dia de céu claro apresentando turvamento	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Dados para implementação da divisão em zonas de ângulo sólido semelhante	29
Tabela 3.1	Meses e respectivos valores numéricos mensais	49
Tabela 3.2	Fatores de forma para incrementos azimutais e de altitude de 10°	55
Tabela 3.3	Fatores de forma para incrementos de altitude de 12° e incrementos azimutais como proposto por Tregenza	55
Tabela 3.4	Valores da relação $L_p/L_z$ - distribuição de luminâncias para a altitude solar de 30° e turvamento de 5,5	63
Tabela 3.5	Valores da contribuição relativa de luz para cada porção de céu considerada	64
Tabela 3.6	Somatório das luminâncias relativas de quadrantes de 45° de área tomados a partir do sol para o método DCRL	66
Tabela 3.7	Somatório das luminâncias percentuais de quadrantes de 45° de área tomados a partir do sol para o método <i>Pepper Pot</i>	66
Tabela 4.1	Valores calculados para os pontos do modelo em estudo para o dia 30 de abril às 9:15	80
Tabela 4.2	Área projetada das superfícies internas do ambiente em estudo em relação aos pontos P1, P2 e P3	81
Tabela 4.3	Área projetada e relação de área projetada x reflexão média calculadas para cada um dos pontos da sala de superfícies brancas com $\rho_m = 0,8$	82
Tabela 4.4	Área projetada e relação de área projetada x reflexão média calculadas para cada um dos pontos da sala de superfícies brancas com $\rho_m = 0,8$ e relação de área projetada x reflexão média calculadas para cada um dos pontos da sala de superfícies pretas com $\rho_m = 0,10$	98

Tabela 4.5	Valores de altitude e azimute solar, correção da hora $X_h$ , correção do anel de sombreamento para o dia 24 de abril.	99
Tabela 4.6	Valores de iluminâncias externas e internas corrigidos para o dia 3 de maio medidos em lux para a sala revestida de preto	100
Tabela 4.7	Valores de iluminâncias internas corrigidos para o dia 3 de maio medidos em lux para a sala pintada de branco	100
Tabela 4.8	Valores de iluminâncias externas e internas corrigidos para o dia 24 de abril medidos em lux para a sala revestida de preto	103
Tabela 4.9	Valores de iluminâncias internas corrigidos para o dia 24 de abril medidos em lux para a sala pintada de branco	103
Tabela 4.10	Valores de iluminâncias externas e internas corrigidos para o dia 7 de maio medidos em lux para a sala revestida de preto	105
Tabela 4.11	Valores de iluminâncias internas corrigidos para o dia 7 de maio medidos em lux para a sala pintada de branco	105
Tabela 4.12	Valores obtidos para os pontos de medição externo $E_p$ , pontos internos P1, P2 e P3, com os respectivos valores da CC calculadas para cada um dos pontos. Dia 03 de maio. Céu encoberto.	107
Tabela 4.13	Valores obtidos para os pontos de medição externo $E_p$ , pontos internos P1, P2 e P3, com os respectivos valores da CC calculada para cada um dos pontos. Dia 24 de abril. Céu claro - baixo turvamento	108
Tabela 4.14	Valores obtidos para os pontos de medição externo $E_p$ , pontos internos P1, P2 e P3, com os respectivos valores da CC calculada para cada um dos pontos. Dia 07 de maio. Céu claro - alto turvamento	108
Tabela 4.15	Valores da CC calculados pelo uso dos DCRLs para o dia 03 de maio, nos horários selecionados	109
Tabela 4.16	Valores da CC calculados pelo uso dos DCRLs para o dia 24 de abril, nos horários selecionados	109
Tabela 4.17	Valores da CC calculados pelo uso dos DCRLs para o dia 07 de maio, nos horários selecionados	109

Tabela 4.18	Valores da CC calculados pelo método <i>Pepper Pot</i> para o dia 03 de maio, nos horários selecionados.	109
Tabela 4.19	Valores da CC calculados pelo método <i>Pepper Pot</i> para o dia 24 de abril, nos horários selecionados	110
Tabela 4.20	Valores da CC calculados pelo método <i>Pepper Pot</i> para o dia 07 de maio, nos horários selecionados.	110
Tabela 4.21	Valores de CRI a partir dos valores medidos paratodos os horários de medição ( $CRI_{médio}$ ), com os respectivos desvios padrão, CRI calculado pelo método proposto e diferença percentual entre os valores obtidos por medição e calculados. Dia 03 de maio - céu encoberto.	113
Tabela 4.22	Valores de CRI a partir dos valores medidos paratodos os horários de medição ( $CRI_{médio}$ ), com os respectivos desvios padrão, CRI calculado pelo método proposto e diferença percentual entre os valores obtidos por medição e calculados. Dia 24 de abril - céu claro.	113
Tabela 2.23	Valores de CRI a partir dos valores medidos paratodos os horários de medição ( $CRI_{médio}$ ), com os respectivos desvios padrão, CRI calculado pelo método proposto e diferença percentual entre os valores obtidos por medição e calculados. Dia 07 de maio - céu claro com turvamento.	113

# LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1	Distribuição relativa de luminâncias para céu claro por octantes de céu, de acordo com o método poposto.	66
Gráfico 3.2	Distribuição de luminâncias para céu claro por octantes de céu, de acordo com o método <i>Pepper Pot</i> .	67
Gráfico 4.1	Variação percentual apresentada pelos valores da CC para as orientações L, N, O e S, nos pontos P1, P2 e P3.	80
Gráfico 4.2	Dia 03 de maio. Iluminâncias externa e interna medidas para a sala revestida de preto.	101
Gráfico 4.3	Dia 03 de maio. Valores de iluminância interna para a sala revestida de preto em detalhe.	101
Gráfico 4.4	Dia 24 de abril. Iluminâncias externa e interna medidas para a sala revestida de preto.	103
Gráfico 4.5	Dia 24 de abril. Valores de iluminâncias internas em detalhe.	104
Gráfico 4.6	Dia 7 de maio. Iluminâncias externa (corrigida do fator de sombreamento) e interna medidas para a sala revestida de preto.	105
Gráfico 4.7	Dia 7 de maio. Valores de iluminância interna em detalhe.	105



# LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$a_k$  - área do trecho do céu dentro da zona  $k$ , [estereoradianos]

$A_p$  - área projetada

$A_{pe}$  - área projetada na abóboda de uma superfície externa a partir do ponto de observação

$A_{pi}$  - área projetada de cada superfície

$A_w$  - área da janela

$B$  - fator de correção para molduras da abertura, divisórias do vidro, etc...

$CRE_{abs}$  - valor absoluto da componente refletida externa, em lumen/m<sup>2</sup>

$D$  - número do dia do mês, variando de 1 a 30 ou de 1 a 31, exceto para o mês de fevereiro

$d_k$  - coeficiente de luz natural para iluminância em um dado ponto

$G$  - fator de correção para vidros outros que não o vidro simples liso

$E_{dH}$  - iluminação difusa horizontal

$E_{dHmédia}$  - iluminação difusa horizontal média

$E_H$  - iluminância horizontal no ponto  $P$

$E_p$  - iluminância no ponto  $P$

$E_s$  - iluminação escalar no ponto  $P$

$E_{sn}$  - iluminância devido ao sol, perpendicular ao plano de incidência, em klx

$E_{sv}$  - iluminância devido ao sol em um plano vertical, em klx

$g$  - fator de correção para o anel de sombreamento

$g_c$  - fator de correção para céu claro

$g_e$  - fator de correção para céu encoberto

$h$  - hora local marcada no relógio

$h_s$  - hora solar verdadeira

$i$  - valor numérico mensal

$J$  - dia Juliano

$L$  - luminância do difusor uniforme de área  $S$

$L_{E\gamma}$  - luminância de um elemento de céu

$L_{ez}$  - luminância do zênite

$L_k$  - luminância do céu dentro da zona  $k$ , [ $cd/m^2$ ]

$L_p/L_z$  - relação da luminância do zênite pela luminância de um ponto localizado na abóboda celeste.

$L(\alpha, \theta)$  - distribuição de luminâncias, em função do azimute  $\alpha$  e da amplitude  $\theta$  da porção

de céu

$m$  - fator de correção =  $G \times M \times B$

$M$  - fator de correção devido à manutenção

$\underline{M}$  = Número do mês do ano, sendo igual a 1 para janeiro e 12 para dezembro;

$n$  - número de elementos de céu

$\underline{n}$  - número de superfícies

$S$  - elemento de área qualquer localizada no espaço

$S_1$  - rebatimento da área  $S$  na hemisfera unitária

$S_2$  - área projetada na base pela  $S$  rebatida na superfície da hemisfera

$x_h$  - equação horária

## LETRAS GREGAS

$\alpha$  - ângulo de azimute

$\alpha_e$  - azimute da elevação (fachada)

$\alpha_s$  - azimute do sol

$\alpha_z$  - ângulo azimutal entre o sol e a normal à elevação

$\beta$  - ângulo de incidência

$\delta_s$  - declinação do sol, em graus

$\eta$  - ângulo entre a direção da porção de céu e a normal à superfície contendo P

$\varphi$  - ângulo compreendido entre o sol e o ponto P, na posição do ponto em  $\alpha$  (rotação em sentido horário) e com altitude solar de  $Z_o$

$\varphi$  - ângulo compreendido entre o sol e o ponto P

$\gamma$  - ângulo de elevação do elemento de céu acima do horizonte

$\gamma_i$  - limite inferior da banda de altitude

$\gamma_s$  - limite superior da banda de altitude

$\gamma_s$  - altitude solar

$\phi$  - ângulo entre a normal ao ponto P e o centro da área S

$v_{ij}$  - função de visibilidade ( $v_{ij} = 1$  se o elemento de céu for totalmente visto do ponto P e

0, caso contrário)

$\lambda$  - longitude local, em graus

$\lambda_p$  - longitude do meridiano padrão do local, em graus e múltiplo de 15

$\theta$  - amplitude

$\rho$  - coeficiente de reflexão da superfície

$\rho_m$  - refletância média

$\rho_{mi}$  - refletância média de cada superfície interna

$\xi$  - ângulo zenital do ponto P

$\omega$  - ângulo sólido subentendido pela área S

$\omega_i$  - ângulo sólido sob o qual se vê o elemento do céu i

## SIGLAS

CC - componente celeste

$C_{C_{lux}}$  - componente celeste em lux

CIE - (pag. 58 ?)

CIN - contribuição de iluminação natural

CRE - componente refletida externa

CRI - componente refletida interna

CU - coeficiente de utilização

DCRI - diagrama de contribuição relativa de luz

*DF - daylight factor*

FF - fator de forma

# RESUMO

A presente proposta de dissertação tem como escopo a definição de uma metodologia para determinação de iluminâncias em plano horizontal no ambiente construído sob condições de céu encoberto e céu claro para diversas alturas solares.

Propõe-se a implementação de um método gráfico para cálculo de iluminâncias internas a ser utilizado em avaliações iniciais da quantidade de luz que se obtém por determinada abertura. Tal método poderá ser utilizado na fase de anteprojeto, para verificação e comparação de sistemas de iluminação natural propostos ou para verificação da qualidade e eficiência do projeto de iluminação em códigos de obra.

A proposta do uso de um método gráfico se justifica pelo caráter didático e intuitivo que este tipo de ferramenta possui, facilitando uma rápida visualização da influência da adoção de determinado sistema de aberturas e facilitando a comparação entre sistemas de iluminação propostos na fase inicial de estudos.

Num país como o Brasil, que possui a maioria do ano com predominância de céus claros ou parcialmente encobertos, a utilização de modelos de céu encoberto ou uniforme como parâmetro para se determinar a entrada mínima de luz natural em determinado ambiente pode não ser eficaz a nível de legislação urbana. Determinar valores levando-se em consideração um céu de baixa luminosidade, pode causar problemas de superdimensionamento de aberturas para a iluminação em relação a certas orientações, favorecer a ocorrência de ofuscamento e aumentar desnecessariamente os ganhos de calor.

Portanto, a ferramenta gráfica criada se propõe a possibilitar o rápido cálculo de iluminâncias internas de forma a assegurar níveis adequados de iluminação natural nos ambientes.

*Palavras-chave:* iluminação, iluminação natural, luz natural, cálculo de luminâncias, geometria solar, legislação de edificações, método gráfico.

# ***ABSTRACT***

The present dissertation aims to define a methodology to determine horizontal plan illumination in the internal environment under clear sky conditions for several solar altitudes and its application in urban legislation.

The implementation of a graphic method is proposed to calculate the internal illuminance to be used in initial evaluations of lighting quantity (amount) that is obtained through a determined aperture. This method can be easily used in the pre design phase, in order to allow the verification and comparison of proposed natural illumination systems or to allow the verification of lighting design in building codes.

The proposal to use a graphic method is justified by the potential didactic and illustrative character of this kind of tool. It enables a quick visualization of the influence of the adoption of certain aperture systems and makes it easier to compare among a variety of daylighting systems.

In a tropical country like Brazil where most of the year has clear or partially clouded skies, the use of sky uniform or overcast sky models in order to determine the minimum light entrance in a internal room, is not the most efficient way when dealing with urban and construction legislation, enabling the emerging of over dimensioning aperture problems, increasing the possibility of glare occurrence.

Therefore, a proposal to implement the created tool in order to assure adequate levels of internal natural lighting through vertical openings is proposed.

*Key-words:* lighting, natural lighting, daylighting, luminance evaluation, solar geometry, building codes.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 A COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Com o aparecimento de um mercado consumidor mais exigente e com o desenvolvimento da tecnologia de construção e projeto, torna-se premente a procura por uma sistematização adequada de processos que permitam ao arquiteto/projetista de iluminação analisar de forma clara e concisa as variáveis com que deve trabalhar, os dados e recursos que tem à sua disposição, e as formas de avaliação dos sistemas de iluminação natural e artificial (SOUZA, 1995).

Atualmente no Brasil não existem normas ou orientações em códigos de obra a propósito da utilização de métodos de estimativa de luz natural para verificação do atendimento de eventuais exigências humanas e construtivas no que diz respeito a utilização desta fonte de iluminação para atendimento das necessidades humanas e conservação de energia. Existem apenas normas concernentes aos níveis mínimos de iluminação para execução de tarefas e relativos à utilização de dispositivos artificiais de iluminação.

A criação de normas que digam respeito à utilização da luz natural em ambientes deve ser baseada em metodologias de fácil incorporação ao processo de projeto habitual do arquiteto. O cálculo do nível interno de iluminação deve ser feito levando-se em conta as condições de céu e a interferência de elementos internos e externos ao ambiente. A dificuldade está em se incorporar em um mesmo procedimento, todas as variáveis utilizadas neste processo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

- Estabelecer uma metodologia para avaliação da quantidade de luz incidente em um ponto interior de um ambiente através de determinada abertura ou conjunto de aberturas.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as tabelas e ferramentas necessários para a implementação do método de avaliação da quantidade de luz natural incidente em determinado ponto do ambiente;
- verificar, por meio de medições em modelo reduzido, os níveis de iluminação médios para ambientes internos em Florianópolis;
- comparar os resultados obtidos pela aplicação do método de cálculo de iluminâncias e pelas medições experimentais.



## 1.3 HIPÓTESES

### 1.3.1 HIPÓTESES DE TRABALHO

- ◆ Métodos gráficos para a determinação da iluminação interna adaptados para levar em conta distribuição de céu não uniforme são ferramentas confiáveis;
- ◆ métodos gráficos adaptados apresentam boa sensibilidade com respeito à orientação das aberturas;
- ◆ a aplicação do método de projeções estereográficas possibilita a avaliação da eficácia do uso de modelos de céu claro, ou encoberto e comparar o resultado destes modelos com medições feitas em modelos reduzidos;
- ◆ o uso de ferramentas práticas de avaliação quantitativa da luz incidente em um plano, facilita a implementação das características básicas iniciais para a execução de um bom projeto de iluminação natural;

### 1.3.2 HIPÓTESES SUBJACENTES

- Métodos gráficos de avaliação permitem a rápida estimativa de níveis internos de iluminação;
- métodos gráficos são uma forma habitual de trabalho para o arquiteto.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

### 1.4.1 O CÁLCULO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Atualmente existem diversos métodos e práticas para se verificar a quantidade de luz existente nos planos verticais e horizontais de determinado ambiente, além da presença de ofuscamento, contraste, distribuição. Estes variam de ábacos, para aplicação manual, a programas computacionais - em uma escala abrangente de níveis de complexidade.

“Métodos de cálculo para uso em problemas arquiteturais demandam, uma certa velocidade de uso sem que haja um grande sacrifício de acuidade. (...) É importante que métodos demorados sejam o mais simplificados possível. Um método que combine técnicas numéricas e técnicas gráficas tem se mostrado a melhor solução” (PLEIJEL, 1954).

O arquiteto que realiza seus estudos prévios através de um procedimento baseado em análises gráficas, deve introduzir a iluminação natural nesse processo de estudo em uma linguagem comum a todo o resto do projeto, para que este entre em “vibração” com os elementos distintos que o conformam (SOTERAS, 1985).

A proposta do uso de um método gráfico, portanto, se justifica também pelo caráter didático e ilustrativo que este tipo de ferramenta possui - facilitando uma rápida visualização da influência da adoção de determinado sistema de aberturas e tornando ágil a comparação entre sistemas de iluminação propostos na fase inicial de estudos.

Este trabalho visa portanto, o desenvolvimento de uma ferramenta prática de determinação de iluminâncias em planos internos horizontais para aplicação de projetistas na área de iluminação natural. Tal ferramenta deve ser de fácil aplicação para definição de parâmetros iniciais de projeto e para propiciar ao projetista/arquiteto um visão mais direta dos efeitos de orientação e dimensionamento de aberturas para iluminação natural.

### 1.4.2 USO PRÁTICO E TEÓRICO DOS RESULTADOS A ALCANÇAR

Acredita-se que a utilização de tabelas e ábacos ou diagramas que permitam a tomada de decisões rápidas para o projeto com relação à validade ou não do uso de determinados sistemas de iluminação natural, auxiliará na obtenção preliminar de dados

e no desenvolvimento de bons projetos de iluminação: mais econômicos e energeticamente mais eficientes.

Os diagramas desenvolvidos no presente trabalho de dissertação consideram a distribuição de luminâncias para céus encobertos e claros e possibilitam a verificação dos níveis de iluminância em determinados pontos situados em planos horizontais no interior de ambientes.

Pretende-se que o conjunto de diagramas desenvolvidos venham a ser utilizados em avaliações iniciais da quantidade de luz, ainda na fase de anteprojeto. Estes diagramas servirão de diretrizes no dimensionamento e na comparação entre sistemas de iluminação natural propostos.

A implementação destes diagramas gera, ainda, a possibilidade de se avaliar a eficácia do uso de modelos de distribuição de luminâncias para céu claro, encoberto e comparar o resultado obtido por outros métodos de cálculo de iluminação como o *Pepper Pot* (MOORE, 1991) e pelo cálculo de luminâncias por modelo de distribuição de iluminâncias de céu uniforme de GIRARDIN (1994).

Cabe ressaltar que, em termos de legislação construtiva a nível nacional, não há, hoje, nas normas brasileiras, qualquer especificação quanto a avaliação de desempenho de edificações do ponto de vista de entrada mínima de luz natural no ambiente interno, considerando condições de céu variáveis. Com a necessidade de poupança de energia emergente no país, parece vital que se pense na proposição de uma legislação no sentido de se otimizar o uso de iluminação natural, pelo menos para edificações comerciais, que gastam para iluminação 40% do seu consumo total de energia elétrica.

Segundo LYNES (1968), a ocorrência de céus encobertos em países de clima tropical é bastante inferior à de países de clima temperado, onde sua predominância faz com que este modelo seja o mais utilizado em normalizações concernentes à iluminação natural.

Deveria ser estudada portanto, de forma mais consistente, a validade do uso dos diferentes modelos de distribuição de luminâncias (uniforme, encoberto, claro, parcialmente encoberto). O ideal seria se fazer a verificação do nível de iluminação interna nos meses em que sua predominância seja clara, verificando-se qual a percentagem durante o ano que caracteriza a ocorrência de determinado tipo de distribuição de luminâncias de céu para cada uma das localidades a ser estudada. Geralmente no Nordeste os meses de seca, e portanto de céu claro, vão de agosto a

março, com estação chuvosa nos meses de outono e inverno. Já o centro-sul do país apresenta clima com estação chuvosa no verão e seca nos meses de outono e inverno.

A partir da constatação do percentual anual que tais meses representam, seria feita a consideração sobre a necessidade da adoção de cada um dos modelos de distribuição de luminâncias de céu - (a nível de legislação da edificação) caso seja verificada sua preponderância durante parte significativa do ano. Segundo SCARAZZATO (1995), uma verificação ideal só poderia ser feita a partir de medições realizadas durante um número mínimo de anos, as quais não se possui hoje no país, ou através da utilização de modelos preditivos de simulação das condições de céu existentes.

#### 1.4.3 MODELOS DE CÉU E LEGISLAÇÃO

Adotam-se basicamente três modelos para distribuição de luminâncias para se calcular a componente celeste: céu claro - onde se leva em consideração a presença e posição do sol; céu uniforme - de distribuição homogênea por toda a abóbada; e céu encoberto - onde o zênite apresenta luminância três vezes superior à luminância do horizonte (PEREIRA, 1994 - A).

A legislação construtiva (códigos de obra e normas) referentes à incidência de luz natural no interior das edificações, estudadas (Inglaterra, Belo Horizonte, Curitiba) são baseadas em modelos de céu encoberto - pelo uso de fatores de luz diurna - *daylight factor*<sup>1</sup> - o que não condiz com a realidade brasileira. Na Inglaterra, por exemplo - onde a legislação leva em conta 5.000 lux como nível de iluminância médio produzido por um céu - pode-se afirmar que ao se trabalhar com um modelo de céu encoberto estará se levando em conta a condição predominante, considerada crítica. Já no Brasil durante grande parte do ano, se obtém isto sim, altos valores de iluminância externa. Um céu claro no Brasil pode apresentar iluminâncias em plano horizontal desobstruído da ordem de 100.000 lux. Como se pode verificar pelas normais de nebulosidade de 1961 a 1990 do DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (1992), os altos níveis de iluminação se devem à ocorrência predominante de céus claros e parcialmente encobertos, no território nacional (BRE, 1986; PBH, 1930; IPPUC, 1969; VALADARES, 1995).

---

<sup>1</sup> Ver capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Segundo CHICHERCHIO (1978), não se pode esquecer que, por onde entra luz, entra também o calor e se dimensionarmos as aberturas considerando como condições externas aquelas correspondentes a um dia nublado ou chuvoso, as aberturas resultarão fatalmente grandes, o que predisporá o ambiente a uma excessiva recepção de calor nos dias quentes e claros. Para as aberturas verticais o controle dos raios solares pode ser feito por meio de placas de sombreamento, admitindo uma área envidraçada maior. Porém quando há entrada direta de radiação solar no ambiente, esta além dos efeitos térmicos, produzirá regiões de iluminação altíssimas, em contraste com a iluminação mais baixa, conseqüente da radiação difusa.

É o caso, então, de se reavaliar o que seria um céu típico para cálculo de luminâncias para a situação brasileira, levando-se em conta os tipos de céu predominantes em cada época e região do país. Seria o céu típico um céu parcialmente nublado, ou de menor luminosidade? Ou um céu claro com distribuição menos homogênea e maior intensidade luminosa no quadrante em que se localiza o sol, a ser analisado para cada horário do dia? Para que se possa analisar tais questões, é necessário que se faça uma avaliação criteriosa dos níveis de iluminação externa presentes nas diversas localidades do país em várias épocas do ano, através da análise de dados de disponibilidade de luz natural.

No entanto “uma questão que logo vem à tona dado o atual estado da arte no Brasil, é a que se refere a informações confiáveis sobre a própria disponibilidade de luz natural nas várias regiões do país”, visto não dispormos ainda de bancos de dados com estes valores. Estas informações poderão ser obtidas então de duas maneiras: “1) através de medições sistematizadas, o que pressupõe a existência de recursos materiais e humanos, bem como de um período de tempo suficientemente longo para evitar-se erros decorrentes de atipicidades sazonais e anuais (o que levaria um espaço de tempo de pelo menos três anos), e 2) através da utilização de modelos preditivos.” Como ainda não existem, no Brasil, medições sistematizadas quanto a níveis de iluminação, não há como conseguir dados de luminâncias consistentes para um céu real. Na falta desta estrutura podemos recorrer a modelos preditivos de cálculo da disponibilidade de luz (SCARAZZATO, 1995).

O termo disponibilidade de luz se refere à quantidade de luz do sol e do céu presente em uma dada localidade, hora, data e condição de céu específicos. A IES (1993), fornece equações de cálculo da disponibilidade de luz determinadas através de

medições realizadas ao longo de 60 anos - que fornecem valores médios de iluminâncias e luminâncias. As equações fornecem os valores mais próximos à média dos dados obtidos ao longo do tempo. Ressalta-se aqui que os dados assim calculados podem apresentar variações substanciais em relação a valores instantâneos medidos de iluminâncias. Considera-se no entanto que este tipo de equações fornecem resultados bastante satisfatórios e servem como base para pesquisas e avaliações de iluminação natural.

#### 1.4.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho se divide em 5 capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Avaliação dos Diagramas Propostos, e Conclusão. Na introdução se faz a apresentação do tema a ser desenvolvido, abordando-se os objetivos a serem alcançados e as hipóteses a serem levadas em conta no trabalho.

Na Revisão Bibliográfica se faz um estudo visando promover uma atualização sobre a abordagem dada ao estudo da iluminação natural pelos principais autores encontrados na literatura. Neste capítulo aborda-se a inserção da iluminação natural no processo de projeto, bem como as vantagens de sua utilização. Distingue-se as fontes de iluminação natural e as formas existentes para sua quantificação, destacando-se os principais métodos existentes.

Na Metodologia se descreve o processo proposto para o cálculo da iluminação obtida em determinado ponto interno ao ambiente devido à iluminação vinda do céu e das reflexões externas e no ambiente interno. Neste capítulo são descritas as etapas seguidas para a obtenção dos valores de iluminância para pontos localizados em planos horizontais. Se descreve também nesta etapa o procedimento para a montagem dos diagramas usados nos cálculos destes valores, divididos em componente celeste, componente refletida externa e componente refletida interna..

No Estudo de Caso se desenvolve um modelo de ambiente para testes do método proposto no capítulo de Metodologia que serve de base para a realização de testes teóricos e experimentais. Se faz a apresentação da parte experimental desta pesquisa onde se utiliza um modelo em escala reduzida para verificação de níveis internos de iluminação obtidos em um ambiente. Neste capítulo também é feita a comparação e análise dos valores obtidos pelo método teórico e pelo método experimental a fim de verificar a aplicabilidade do primeiro.

Na Conclusão é apresentada a discussão final do trabalho juntamente com suas limitações e propostas para trabalhos futuros.

Na figura 1.1 pode-se ver um esquema da estrutura desta pesquisa.

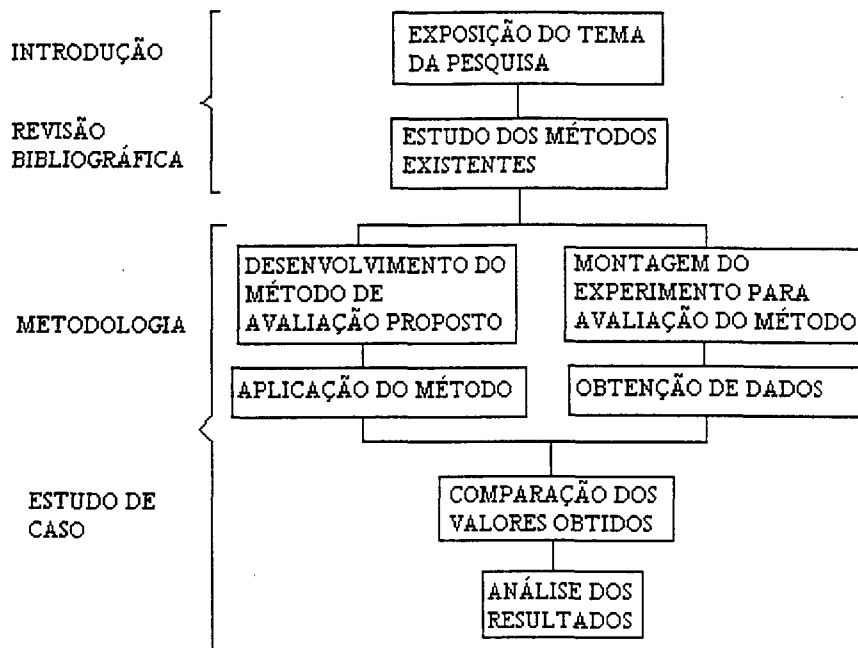


Figura 1.1 - Esquema da estruturação da pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O PROJETO E O PAPEL DO PROJETISTA**

Os propósitos, programas, processos do projeto, tecnologia de construção e processos de construção modernos, requerem a colaboração de especialistas, o balanceamento de objetivos múltiplos e interrelacionados para a resolução de conflitos. Os seguintes propósitos desta arquitetura são então apresentadas (LAM, 1986):

- fornecer conforto e prazer ao usuário no ambiente interior;
- satisfazer as necessidades programáticas dos usuários;
- minimizar o gasto de energia na edificação;
- otimizar a imagem pública da arquitetura;
- minimizar os custos iniciais de construção.

Uma edificação é mais valiosa quando ela fornece a máxima satisfação ao levar em conta os propósitos acima. Os custos iniciais de curto prazo podem ser minimizados por sistemas de construção bem integrados e pelo uso de materiais e métodos adequados para cada localidade. Os custos de longo prazo incluem operação e manutenção da edificação, o custo monetário, produtividade pessoal, e o custo de substituição da edificação. Enquanto alguns destes custos são intrínsecos ao programa da edificação, a maioria pode ser minimizada por um projeto inteligente. No entanto, para se alcançar esta sinergia, se requer a colaboração de especialistas - projetista de arquitetura, estrutural, mecânico, de iluminação, etc. - para a evolução de conceitos e detalhamento de projetos, trabalhando em um processo de equipe multidisciplinar (LAM, 1986).

Segundo DREYFUS (1960), para se determinar a influência de determinadas condições climáticas sobre o homem, se introduz a noção de conforto. A sensação de conforto é subjetiva e bastante imprecisa. Seria, portanto, mais racional, sob diversos pontos de vista, se avaliar estas ou aquelas condições climáticas por sua influência na saúde ou no desempenho de longo prazo dos indivíduos. Os itens mais importantes para



o conforto no interior das edificações são, além dos níveis de pressão sonora, tempo de reverberação e amortecimento, a temperatura do ar local, sua umidade, a temperatura radiante média, a velocidade do ar, o nível geral de aclaramento e a distribuição das luminâncias no campo de visão.

A maioria dos arquitetos e projetistas de iluminação possuem um entendimento limitado sobre as relações entre quantidade de luz, visibilidade e a percepção de brilho. Geralmente eles desconhecem a diferença entre iluminância (medida em lux) e luminância (medida em candelas), as unidades básicas da iluminação. Eles são, portanto, incapazes de discernir se um espaço é insuficientemente iluminado ou se ele simplesmente “parece” escuro devido ao uso de cores escuras ou paredes mal iluminadas. Porque é difícil se julgar a quantidade de luz, o projeto de iluminação deve ser baseado no que se pode perceber e no que se deseja visualizar - a qualidade do ambiente luminoso (LAM, 1986).

Os projetistas devem aprender a projetar usando conceitos que possam ser julgados por suas mentes e não somente através do uso de instrumentos. Esta percepção é fundamental para se poder utilizar plenamente as oportunidades de liberdade e criatividade disponíveis para a concepção do projeto do ambiente luminoso. O melhor uso da luz natural não se refere somente a economia de energia mas também à criação de ambientes mais agradáveis e luminosamente prazerosos para os ocupantes. Para se atingir estes objetivos deve se dar prioridade ao projeto de iluminação e insolação. Outros fatores que devem ser considerados são os efeitos da luz solar no conforto térmico e na saúde biológica de pessoas e plantas (LAM, 1986).

## 2.2 O PROJETO DE ILUMINAÇÃO

O termo “luz” refere-se a energia radiante capaz de excitar a retina humana e criar sensação visual causada por uma banda relativamente estreita de comprimento de ondas (menor que um oitavo) de radiação de energia eletromagnética, de cerca de 380 a 780 nm (nanômetro =  $10^{-9}$ m). Livrementemente, o termo é também aplicado a radiação de energia em si mesmo. Esta radiação de energia apresenta dupla característica: consiste em partículas de energia, fótons, mas também tem propriedades de movimento de onda. Visualmente há variações individuais na visualização dentro destes limites (SZOKOLAY, 1980; IES, 1993).

“Uma boa iluminação resulta do acertado agenciamento da luz, feito de maneira a proporcionar uma aparência correta do objeto, exposto ao nosso olhar, permitindo-nos reconhecê-lo ou identificá-lo. Uma iluminação deficiente, ao contrário, é aquela que falseia as formas, os contornos e as cores do objeto que vemos, desfigurando-o ou tornando difícil identificá-lo”. “As aberturas por onde a luz diurna penetra nos recintos, os focos de luz artificial que completam ou substituem a iluminação natural, e as superfícies capazes de modificar a distribuição ou a intensidade dos feixes luminosos, todos estes elementos desempenham uma função que não pode ser subestimada no projeto e na execução dos edifícios, qualquer que seja a natureza destes” (VIGNEAU, apud PRADO, 1961; PRADO, 1961).

Segundo PRADO (1961), tem-se que a boa iluminação apresenta vantagens a diversos níveis. Vantagens fisiológicas uma vez que facilita a visão, poupa os órgãos visuais, suaviza o trabalho e diminui a fadiga além de tornar mais proveitosa a recreação. Vantagens técnicas por possibilitar a execução de tarefas de precisão, melhorar a qualidade e aumentar a quantidade da produção, diminuir riscos, e prevenir acidentes. Vantagens estéticas uma vez que embeleza a aparência dos objetos, realça seu valor artístico e favorece o exame das várias partes de um todo. E finalmente, fornece vantagens psicológicas por determinar uma impressão de bem-estar e inspirar segurança.

Um projeto de iluminação de qualidade será então aquele que atender de forma adequada às necessidades do homem com relação a informação visual, sejam elas relacionadas à execução de atividades - satisfeitas pelo provimento de uma quantidade suficiente de luz ao exercício das tarefas visuais - ou necessidades biológicas por informação visual, relacionadas aos conceitos de sobrevivência e segurança, que englobam as necessidades por orientação espacial, ajuste do relógio biológico, contato com elementos da natureza e delimitação do território pessoal (ALVARES, 1995). Há também que se atentar para se proporcionar adequados níveis de contraste, evitar ofuscamento, fazendo uso adequado das cores e de dispositivos e sistemas de iluminação.

Um bom ambiente visual afeta a habilidade de um pessoa de ver adequadamente os objetos de um ambiente, discernir entre figura e fundo e desempenhar tarefas visuais (LAM, 1986). Os objetos e superfícies que fornecem importantes informações visuais devem distinguir-se de seu fundo. Da mesma forma, objetos e superfícies que não forem críticas para determinado ambiente visual não devem ser destacados. Ao se estabelecer

um bom ambiente visual, a forma como algo é iluminado é geralmente mais importante do que a quantidade de luz que ele recebe. Um ambiente visual pobre é aquele em que a informação não pode ser discernida imediatamente porque não há contraste suficiente para capacitar ao observador distinguir o que é importante se ver (ROBBINS, 1986).

Um bom projeto de iluminação irá englobar aspectos relacionados à adequação de dimensionamento e forma das aberturas para melhor aproveitamento do uso de sistemas de iluminação natural e irá fazer uso de sistemas de iluminação artificial para obter níveis adequados de iluminação para desenvolvimento das tarefas requeridas no ambiente, complementando os níveis obtidos com a iluminação natural, visando ainda conservar energia e diminuir o aporte de calor pelas luminárias (ELEY ASSOCIATES, 1993).

Uma iluminância adequada não significa necessariamente boa iluminação. A qualidade ou adequabilidade da iluminação também deve ser considerada, incluindo a distribuição de luminâncias, ausência de ofuscamento, direcionalidade - é necessário um alto valor escalar para revelar forma e textura, definição de cores e efeitos psicológicos e estéticos. A iluminação pode reforçar o caráter arquitetural de um espaço, mas pode também destruí-lo. O contraste é um fenômeno subjetivo e pode ser experimentado como uma consequência de dois efeitos diferentes: contraste e saturação. Se um contraste excessivo (superior a 10:1) ocorrer no campo de visão, a eficiência visual pode ser diminuída. Os efeitos de saturação são causados quando a luminância média no campo de visão é superior a 25.000 cd/m<sup>2</sup>. Neste caso, mesmo sem contraste, o ofuscamento irá ocorrer (SZOKOLAY, 1980).

### 2.3 ILUMINAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES

Dentro do estudo da iluminação, destaca-se o uso da iluminação natural como fonte primeira de iluminação usada desde os primórdios da arquitetura e a qual se deve dar atenção especial por suas características e potencial de aproveitamento. O trabalho de dissertação a ser desenvolvido aqui se baseia na utilização desta fonte de luz para a iluminação de ambientes internos.

### 2.3.1 O USO DA LUZ NATURAL

“Chama-se natural à iluminação que se obtém com a luz proveniente do sol e representada quer pelos raios solares diretos, quer pelos raios indiretos da mesma proveniência, mas retransmitidos pelo céu, pelas nuvens, pela vegetação, pelos edifícios ou por outros corpos (PRADO, 1961).

A luz natural é uma luz dita de espectro total. A qualidade da luz natural como uma fonte iluminante é uma razão importante para seu uso em uma edificação. Sendo a combinação da luz do céu e da luz do sol, a luz natural é uma das fontes de luz que mais aproximadamente se adequa à resposta visual humana e fornece um bom ambiente visual (ROBBINS, 1986).

A iluminação natural é tanto arte quanto ciência, ou seja, é tanto um elemento de projeto quanto um sistema ambiental. Como elemento de projeto, ela pode salientar aspectos estéticos e qualitativos de uma construção e deve ser parte integrante da filosofia do projeto. Como um sistema ambiental, ele deve ser sujeito ao mesmo grau de análise rigorosa que qualquer sistema ambiental recebe e como tal seus atributos de desempenho devem ser descritos (incluindo iluminação, energia e economia), bem como suas características físicas e sua interação com outros sistemas ambientais (iluminação artificial, estrutura, aquecimento e refrigeração), geralmente de forma quantitativa (ROBBINS, 1986).

### 2.3.2 CONFORTO VISUAL E LUZ NATURAL

A evolução da humanidade tem sido feita predominantemente à luz do dia e do sol, o máximo de sensibilidade do olho humano ocorrendo na faixa do espectro solar. Portanto, estando o olho humano melhor adaptado à iluminação natural, acredita-se que seu uso no interior de edificações propiciará melhores condições de trabalho e de produtividade dos usuários (PEREIRA, 1994 - A).

A iluminação natural em ambientes internos é fornecida para uso das pessoas e o projeto de iluminação natural deve respeitar suas necessidades de percepção visual. Os projetistas devem entender as condições que capacitam as pessoas a enxergar bem e confortavelmente. O conforto visual humano sob o ponto de vista da iluminação natural não consiste simplesmente em se proporcionar níveis adequados de iluminação; deve-se controlar o ofuscamento direto e refletido e os padrões de contraste devem ser adequados. Há também que se levar em conta o desafio de fornecer uma boa iluminação

natural sem que se tenha excessivos ganhos solares durante a estação quente (BAKER, 1993).

O conforto visual depende das luminâncias no campo visual. Uma iluminação de 100.000 lux pode ser bastante agradável se em uma paisagem verde escura ( $\rho = 0,3$ ; portanto com uma luminância de  $9.500 \text{ cd/m}^2$ ), mas pode ser intoleravelmente ofuscante se em uma praia de areia branca ( $\rho = 0,9$ ; luminância de  $29.000 \text{ cd/m}^2$ ). O desempenho de tarefas visuais pode ser prejudicado sob as mesmas condições acima, por exemplo, se alguém estiver lendo. A luz do sol incidente sobre o papel faria sua luminância ser excessiva. Se o papel for sombreado, ele ficará mais escuro que seu fundo ou que o entorno, e isto irá reduzir sua visibilidade (SZOKOLAY, 1980).

### 2.3.3 O PROJETO E A ILUMINAÇÃO NATURAL

Há muito se reconhece a estreita ligação entre a iluminação natural e o projeto de um edifício. Na Roma antiga, Vitruvius já enfatizava a importância de se considerar propriamente a orientação de janelas em seus tratados. (BAKER, 1993) “Mas somente nas últimas décadas esta relação passou a ser expressa em termos quantitativos e lógicos. A necessidade de obter iluminação natural no edifício, regula os pés-direitos, a profundidade das salas, a disposição do espaço de circulação, a necessidade de fontes de iluminação interior e conseqüentemente, a eficiência da utilização da área disponível” (HOPKINSON, 1975).

O uso da luz natural pode afetar o arranjo funcional do espaço, o conforto visual e térmico dos ocupantes, a estrutura, o uso de energia na edificação, bem como o tipo e uso de iluminação elétrica e de sistemas de controle associados. De fato, se a luz natural for considerada uma fonte viável de iluminação na edificação, seu uso pode ter ramificações em todos os aspectos do processo de projeto, do planejamento urbano ao projeto de interiores, da pré avaliação e programação do projeto até sua especificação e construção (ROBBINS, 1986).

O projeto para a luz solar é o projeto consciente da forma de uma edificação para se utilizar a luz solar para iluminação e para benefício térmico. É uma ciência que se desenvolveu lentamente através de gerações de forma a atender as necessidades visuais e térmicas, dentro das restrições dos materiais e técnicas de construção disponíveis. Edificações projetadas dentro destes princípios respondem tanto à luz solar direta quanto à luz solar modificada por difusão ou reflexão pela abóboda celeste, nuvens,

elementos naturais ou feitos pelo homem presentes na paisagem, e as próprias edificações. A arquitetura conformada pelo projeto de luz solar é positiva e seletiva na admissão e redirecionamento da luz solar direta (LAM, 1986).

#### 2.3.4 VARIABILIDADE

Os movimentos diários e sazonais do sol em relação a determinada localidade geográfica produzem um padrão previsível da quantidade e direção da luz natural potencialmente disponível. Um padrão aleatório coexiste com este padrão previsível e é causado por mudanças no clima, temperatura e poluição do ar (IES, 1993).

A característica variabilidade - a qualidade “viva” da luz natural, não é necessariamente uma desvantagem. Sob certas circunstâncias, uma iluminação variável pode ajudar a concentração, enquanto medida do grau de atenção e acuidade de visualização. Ela significa, no entanto, que predições de luz natural não podem objetivar um alto grau de precisão e que os critérios de projeto devem inevitavelmente ser baseados em um tratamento estatístico de dados meteorológicos (LYNES, 1968).

A iluminação natural ainda desempenha outras funções importantes para o homem além dos aspectos iluminantes: ela apresenta variações de qualidade e quantidade conseqüentes da movimentação aparente da fonte - o sol - e das condições atmosféricas. Essas mudanças de direção e alterações de cor (indo dos amarelados, alaranjados e vermelho no crepúsculo, para o branco ao meio dia) ajustam-se à alternância dos dias e noites no controle de determinados ciclos vitais (CHICHERCHIO, 1978). Porque ela se move, muda de caráter, e varia com o clima, a luz natural pode fornecer às edificações uma qualidade viva inalcançável por qualquer outro elemento de projeto (ROBBINS, 1986).

Mas a variabilidade da luz natural que muda com a altura do sol sobre o horizonte, as diferenças no grau de cobrimento da abóboda celeste e com a presença de nuvens, faz com que não seja possível se adotar valores exatos para sua mensuração, devendo estes se basear em estatísticas feitas sobre dados empíricos (SOTERAS, 1985).

#### 2.3.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Cabe aqui, salientar que a luz natural nem sempre está disponível durante todo o período de trabalho ou para utilização no desenvolvimento de tarefas visuais, seja por apresentar condições de céu com luminosidade insuficiente para promover uma boa

iluminação interna dos ambientes - dias nublados, chuvosos, atmosfera com alta concentração de poluentes que turvam a abóbada celeste - seja por estar presente em apenas parte do dia, não cobrindo os períodos noturnos e, em alguns casos, os primeiros horários da manhã e do fim de tarde.

Existem ainda tarefas que exigem níveis de iluminação especiais e uniformes para seu desenvolvimento, por vezes não proporcionados apenas pela utilização de luz natural, exigindo o uso de iluminação complementar. Há então que se lançar mão de sistemas de iluminação artificial, mas deve-se conceber estes sistemas de forma integrada e adequada à utilização da luz natural, de forma a complementar os níveis de iluminação existentes (HOPKINSON, 1975).

O uso da luz natural pode ainda trazer uma relevante contribuição para a diminuição do consumo de energia elétrica em edificações industriais, comerciais, institucionais e residenciais. Nos Estados Unidos, estudos indicam que a iluminação representa mais da metade da eletricidade gasta em prédios comerciais, onde um prédio comercial típico usa 36 kWh/m<sup>2</sup>.ano para iluminação e mais 6 kWh/m<sup>2</sup> para retirar o calor gerado pela iluminação (ELEY ASSOCIATES, 1993); um melhor aproveitamento da luz natural pode reduzir sensivelmente o dimensionamento e sobrecarga do sistema de iluminação durante o período do dia, podendo ainda reduzir o dimensionamento dos sistemas de refrigeração artificial para os meses quentes e a demanda nos horários de pico. Em um sistema de iluminação natural corretamente projetado, que incorpore conservação de energia como critério de projeto, a luz elétrica seria desligada ou diminuída sempre que uma quantidade suficiente de luz natural estiver presente para fornecer iluminação de tarefa ou de fundo (ROBBINS, 1986).

Cabe ressaltar aqui; que a iluminação natural é uma das mais eficientes formas de iluminação. No caso das lâmpadas incandescentes apenas 10% da entrada de energia é emitida na forma de luz; o resto é convertido em alguma forma de calor, geralmente próximo do infravermelho. No caso das lâmpadas fluorescentes, aproximadamente de 20 a 35% da energia é emitida como luz. Na luz natural, 55% da energia térmica está dentro do espectro visível (ROBBINS, 1986). Em termos de produção de luz, isto significa dizer que a eficiência luminosa da luz solar é de 100 - 130 lm/W e da luz proveniente da abóbada celeste é de 90 - 115 lm/W, enquanto as lâmpadas fluorescentes comuns fornecem de 60 - 70 lm/W e as incandescentes de 10 - 50 lm/W (PEREIRA, 1994 -B).

## 2.4 FONTES DE LUZ NATURAL

As fontes de luz, para fins de projeto, podem ser caracterizadas como diretas - luz do sol e luz difusa do céu; e indiretas - luz de difusores refletivos ou translúcidos que foram originalmente iluminados por outras fontes primárias ou secundárias (MOORE, 1991).

### 2.4.1 LUZ DO SOL

A luz do sol fornece de 60 a 110 klux no plano horizontal (de 10 a 15 vezes maior que a luz proporcionada por um céu encoberto). Por tal, ela é intensa demais para ser utilizada como iluminação de tarefa. Por sua importância como fonte de aquecimento solar passivo, a radiação solar direta é geralmente considerada indesejável para propósitos de iluminação. Tal é um fato enganoso uma vez que, a eficácia luminosa da luz solar direta, embora menor que a luz proveniente de um céu claro, é ainda consideravelmente maior que muitas das alternativas elétricas usadas. A luz solar, portanto, introduz em uma edificação menos calor por lumen que a maioria das fontes elétricas. (MOORE, 1991, PEREIRA, 1994 - B).

Temos ainda que a luz direta do sol é abundante durante a maior parte do horário de trabalho, especialmente nos meses de verão, indicando que sistemas de aberturas corretamente projetados podem garantir iluminação necessária para substituir a iluminação artificial. A alta eficiência luminosa e a excelente reprodução de cores da luz solar, corroboram ainda, na opção por uma solução viável para redução da carga de refrigeração através da substituição do lumen elétrico pelo da luz do sol, com menor conteúdo de calor (PEREIRA, 1994 - B).

Para que sua utilização em ambientes internos seja viável, pode-se usar recursos para torná-la uma fonte de luz refletida o que faria com que os níveis de iluminação sejam menores do que os obtidos pelos raios solares diretos e fazendo com que o foco direcional desta fonte de luz seja mais uniformemente distribuído pelo ambiente que se deseja iluminar.

### 2.4.2 LUZ DO CÉU

A luz do céu é um resultado da refração e da reflexão da luz solar ao passar pela atmosfera. Sob céus claros, o pequeno tamanho das partículas atmosféricas faz com que



o comprimento de onda da luz seja refratada na porção azul do espectro, fornecendo uma cor azul ao céu. Sob tais condições, o céu é mais escuro a 90° do sol, e mais claro próximo ao sol. Sob céus encobertos, as partículas de água relativamente maiores refratam e refletem difusamente todos os comprimentos de onda de forma igual em todas as direções. Tal resulta em um céu de cor branca, aproximadamente três vezes mais claro no zênite do que no horizonte (MOORE, 1991).

Enquanto a luz solar é uma fonte pontual, a luz do céu é uma fonte superficial. Ela produz uma iluminação suave, não direcional, relativamente sem sombras. Os níveis de iluminação resultantes são consideravelmente menores do que os produzidos pela luz solar direta; podendo variar de 5.000 a 20.000 lux (MOORE, 1991, PEREIRA, 1994 - B).

A distribuição de luminâncias varia de acordo com as condições atmosféricas (presença de nuvens, nebulosidade, poluição atmosférica, etc.). As distribuições mais empregadas pelas técnicas de simulação correntes são: céu uniforme, céu encoberto e céu claro. De acordo com a IES (1993), quando um céu não está completamente encoberto, a distribuição de luminâncias deste céu pode mudar rapidamente e com grandes gradientes quando o sol é obscurecido, parcialmente obscurecido ou completamente revelado. Por esta razão o presente estudo não abordará este tipo de distribuição.

A luminosidade que provém diretamente do sol é em muitos casos rejeitada nos interiores habitados, embora seja esta a fonte primária da luz e de valores mais elevados em termos de iluminação. Tal se deve ao fato de que esta fonte de iluminação pode causar calor indesejado, ofuscamento, contrastes muito altos, envelhecimento e descoloração de mobiliário e peças do ambiente. Já a luz do céu embora traga um aporte menor de luz ao ambiente, possui níveis mais confortáveis e mais constantes.

Por todas estas razões ao se estudar a iluminação natural, a luz proveniente do céu adquire maior importância que a luz proveniente do sol (SOTERAS, 1985).

Segundo SOTERAS (1985), poderia se fazer um paralelo entre a iluminação natural e a iluminação artificial da seguinte forma:

- o sol seria um foco de luminosidade fixa que se desloca seguindo determinadas trajetórias, a iluminação recebida dependendo da sua posição instantânea em relação ao receptor;

- a luz de céu seria uma fonte luminosa extensa que pode-se decompor em pequenos elementos de superfície com ação luminosa concentrada, tratando-a, assim, como uma acumulação de fontes pontuais, que similarmente se poderia considerar como uma grande quantidade de focos fixos em sua posição, mas variáveis em sua luminância ao longo do tempo. Esta variabilidade depende das condições atmosféricas e da posição do sol. Na presente dissertação se utiliza deste paralelo para se construir o diagrama de distribuição de luminâncias proposto.

### 2.4.3 FONTES INDIRETAS

Quando uma superfície refletiva fosca é iluminada por uma fonte primária, sua luminância resultante a torna uma fonte indireta de iluminação. Uma vez que esta superfície pode ser considerada como difusora, ela se torna então, uma fonte distribuída - a qualidade e distribuição de sua luz sendo virtualmente idêntica à luz direta do céu admitida através de uma abertura de tamanho similar. Se iluminada diretamente pelo sol, a iluminação refletida por uma superfície branca pode chegar a 50.000 ou 100.000 lux, substancialmente maior que a luminância da abóboda celeste. De modo similar, materiais translúcidos de vidro podem ser utilizados como fontes indiretas (MOORE, 1991).

## 2.5 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS

“O cálculo da luz recebida da “fonte” é consideravelmente mais complexo para a luz natural do que para fontes de luz elétrica. A determinação da iluminância incidente através de janelas e zenitais deve levar em conta as características de variação entre o sol e as aberturas para iluminação natural (IES, 1993).

Para que se possa estudar o comportamento da luz distribuída através da abóboda celeste, utiliza-se do conceito de luminância<sup>1</sup> e não o de intensidade luminosa uma vez que a abóboda é aqui assumida como uma superfície iluminante e não como uma fonte pontual de iluminação.

O desempenho de uma fonte de luz de grande superfície, como a abóboda celeste, para a qual a lei do inverso do quadrado da distância não é aplicável, não pode ser definido pela curva polar de sua intensidade luminosa. A superfície precisa ser

subdividida em pequenas zonas, para as quais a concentração de fluxo emitido numa dada direção é denominada de luminância (PEREIRA, 1996 B).

A iluminação produzida em um ponto por cada elemento de uma fonte de luz depende apenas de sua luminância e do ângulo sólido que ela subentende. É independente da distância da fonte. Por exemplo; a iluminação produzida pelo céu visto através de uma janela é independente da “distância” do céu; ela é completamente definida pela direção e luminância de cada zona de céu e pelo ângulo sólido que subentende. Nós podemos especificar a iluminação em qualquer ponto do espaço apenas em termos do campo de luminância cercado o ponto (LYNES, 1968).

A partir dessa noção, modelos que expressam como se dá a distribuição desta iluminância pela abóboda celeste - de acordo com os vários tipos de céu determinados a partir das condições de céu - serão apresentados a seguir.

### 2.5.1 CONDIÇÕES DE CÉU

Condição de céu é a aparência da abóbada celeste quando vista por um observador situado na superfície terrestre, está relacionada à distribuição espacial da sua emissão de luz (PEREIRA, 1996 A).

A iluminação exterior é uma função das condições de tempo. Em um dia brilhante de sol com uma atmosfera clara, pode se superar os 100.000 lux, enquanto sob um céu encoberto e uma atmosfera poluída, a iluminância horizontal pode não alcançar 2.000 lux, mesmo ao meio-dia (SZOKOLAY, 1980).

Sob condições de céu claro, a luminância do sol é aproximadamente de 1.650 Mcd/m<sup>2</sup> (megacandela/m<sup>2</sup>), mas o céu pode ter um azul profundo (típico de dias claros em céus tropicais) com luminâncias tão baixas quanto 1.000 cd/m<sup>2</sup>. Nuvens brancas isoladas em tal céu podem mostrar luminâncias de até 30.000 cd/m<sup>2</sup> (SZOKOLAY, 1980).

Devido à extrema variabilidade das condições de iluminação exteriores, uma base para a análise de projetos pode ser estabelecida apenas por métodos estatísticos. Somente medições contínuas ou horárias da iluminação exterior de um céu desobstruído permitiriam a construção de um gráfico com curvas para a variação horária da luz, para, digamos, um dia típico de cada mês (SZOKOLAY, 1980). Devido à complexidade de distribuição de diferentes condições reais do céu, se referenciará os dois tipos de céu

---

<sup>1</sup> Ver Glossário.

padronizados internacionalmente, quais sejam: Céu Claro e Céu Encoberto. Não será levada em consideração a condição de céu uniforme, que se caracteriza pela uniformidade da luminância em todos os pontos da abóboda celeste, devido à inexistência dessa condição em condições reais (PEREIRA, 1996 A).

### 2.5.2 DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS PARA CÉU ENCOBERTO

Em um dia completamente encoberto não há luz solar direta atingindo o solo e a luz de céu é tão uniformemente difundida que o padrão da luminância de céu é visualmente simétrico com relação ao zênite. A luminância de um céu encoberto é menor no horizonte do que acima. Este tipo de céu resulta da refração/reflexão da luz direta do sol (em todos os comprimentos de onda) em grandes partículas de água em suspensão na atmosfera. O resultado é uma abóboda cinza-claro, com a porção zenital apresentando uma luminância três vezes maior que a da porção próxima à linha do horizonte (LYNES, 1968; PEREIRA, 1994 - B). Esta condição de céu está padronizada internacionalmente pela CIE (1996), sendo a luminância de um ponto qualquer da abóboda equivalente a uma fração da luminância do zênite (ver equação 3.7). A figura 2.1 representa uma distribuição típica de céu claro.

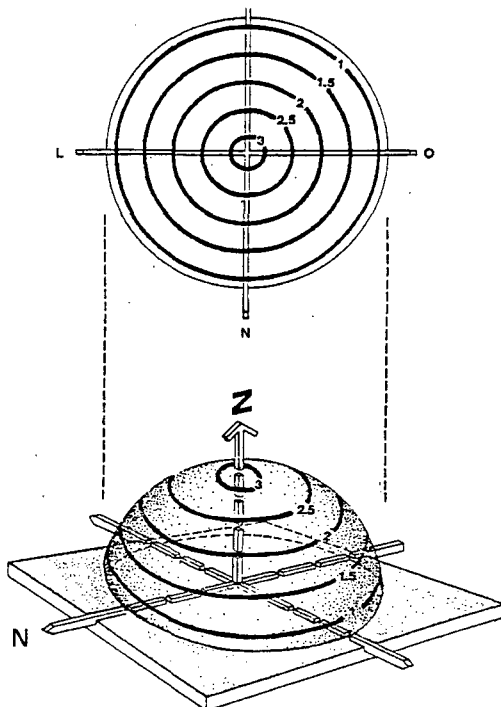


Figura 2.1 - Distribuição de luminâncias para céu encoberto<sup>2</sup>

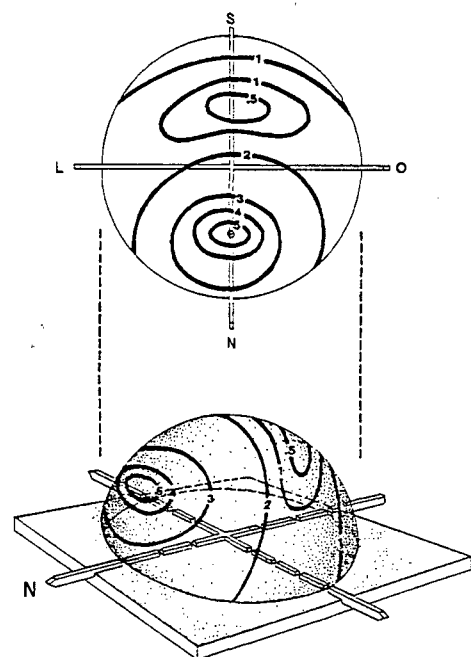


Figura 2.2 - Distribuição de luminâncias para céu claro<sup>3</sup>

<sup>2</sup>Fonte: MOORE, 1991.

### 2.5.3 DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS PARA CÉU CLARO

O modelo de distribuição de luminâncias do céu em um dia claro se baseia inteiramente na luz do sol dispersa em sua passagem pela atmosfera, chamada de luz do céu. Este tipo de céu se caracteriza pela inexistência de nuvens e baixa nebulosidade, onde as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que apenas os comprimentos de onda da porção azul do espectro sejam refletidas em direção à superfície da terra, conferindo esta cor ao céu. No espaço exterior, além da atmosfera terrestre, o céu vazio parece negro. Uma distribuição de luminâncias típicas de céu claro pode ser vista na figura 2.2.

A luminância de um dado elemento de céu visto da terra dependerá de (LYNES, 1968; CIE, 1996. PEREIRA, 1994-B):

- da altitude do elemento acima do horizonte;
- do ângulo zenital do sol, medido em radianos a partir do zênite;
- do ângulo no solo, entre o ponto central do elemento e o centro do sol;
- do fator de turvamento da atmosfera do local.

Nestas condições, o céu apresenta sua porção mais escura a  $90^\circ$  do sol e sua parte mais brilhante ao redor deste, tendendo ainda a ser mais brilhante nas regiões próximas à linha do horizonte, devido à maior espessura da massa de ar que a luz deve atravessar (TREGENZA, 1994).

Esta condição encontra-se padronizada pela CIE (1996), onde a luminância de qualquer ponto da abóbada celeste é dada como uma fração da luminância do zênite, em função da posição do sol e da posição relativa do ponto considerado (ver equação 3.9 - capítulo Metodologia).

#### • **Determinação dos níveis de iluminação em superfícies expostas à abóbada celeste**

A partir dos modelos de distribuição da iluminância de uma fonte, pode-se determinar os níveis de iluminação em superfícies expostas à fonte, para cada um dos pontos da geometria a ser estudada, no caso a abóbada celeste (MIGUET et al, 1996).

Teoricamente a iluminação em um ponto P (centro da porção de céu de orientação qualquer) devido à hemisfera e não obstruído é dado a seguir:

---

<sup>3</sup>Idem.

$$E_p = \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\alpha, \theta) \cdot \cos\theta \cdot \cos\eta \cdot d\theta \cdot d\alpha \quad [\text{Equação 2.1}]$$

onde:

$E_p$  - iluminância no ponto P

$L(\alpha, \theta)$  - distribuição de luminâncias, em função do azimute  $\alpha$  e da altitude  $\theta$  da porção de céu

$\eta$  - ângulo entre a direção da porção de céu e a normal à superfície contendo P

Mas, uma vez que há obstruções, não há solução fácil para esta equação e o único caminho é dividir o ambiente urbano (o tamanho de cada porção a ser definido de acordo com o gradiente de energia), e avaliar a iluminância de acordo com a seguinte expressão:

$$E_p = \sum_{i=1}^n v_{ij} \cdot \omega_i \cdot L(\alpha_i, \theta_j) \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\eta_i \quad [\text{Equação 2.2}]$$

onde:

$n$  - número de elementos de céu

$\omega_i$  - ângulo sólido sob o qual se vê o elemento de céu  $i$

$v_{ij}$  - função de visibilidade ( $v_{ij} = 1$  se o elemento de céu for totalmente visto do ponto P e  $0$ , caso contrário)

$L(\alpha_i, \theta_j)$  - distribuição de luminâncias, em função de um azimute  $\alpha_i$  e de uma altitude  $\theta_j$  da porção de céu

$\eta_i$  - ângulo entre a direção da porção de céu e a normal à superfície contendo P a cada variação de  $\alpha_i$  e  $\theta_j$

Esta expressão significa que para cada ponto P, as “quantidades” de luz emitidas pelos elementos de céu que são visíveis do ponto, são adicionadas, levando em consideração sua altitude e ângulo sólido (MIGUET et al, 1996).

## 2.6 MÉTODOS DE PROJEÇÃO DA ABÓBODA CELESTE

Para se trabalhar com a abóboda celeste como uma fonte de energia luminosa, convém fazer sua representação gráfica em um plano bidimensional. Os princípios e meios para sua representação são apresentados a seguir.

### 2.6.1 HEMISFERA UNITÁRIA

Ao se estudar a distribuição espacial da luz que chega a qualquer ponto P em um plano horizontal, é conveniente se visualizar o ponto cercado de uma hemisfera de raio unitário. Círculos de altitude e raios de azimuth, definem a direção do ponto P para cada ponto na hemisfera e em direção a qualquer ponto no espaço, dentro ou fora da hemisfera (LYNES, 1968).

A figura 2.3 mostra uma hemisfera de raio unitário construída em relação a um ponto P situado em um plano horizontal. A área S representa um difusor de forma arbitrária possuindo luminância uniforme de L e compreendendo um ângulo sólido  $\omega$  em relação ao ponto P. A iluminação escalar em P será:

$$E_s = \omega L / 4\pi \quad \text{[Equação 2.3]}$$

onde:

$E_s$  - iluminação escalar no ponto P

$\omega$  - ângulo sólido subentendido pela área S

L - luminância do difusor uniforme de área S

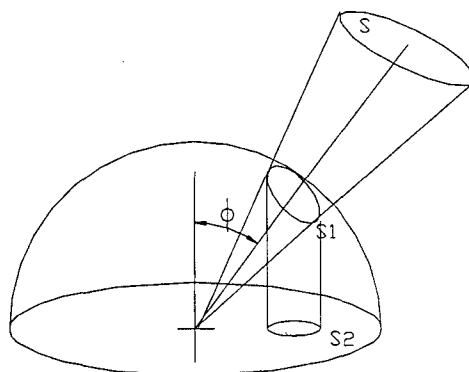


Figura 2.3 - Projeção de uma área S em uma esfera unitária

Uma vez que o ângulo sólido,  $\omega$  é igual para a área projetada da superfície S na superfície da hemisfera unitária, chamada de  $S_1$ , tem-se que a iluminação escalar  $E_s$  é diretamente proporcional à área projetada da fonte S na hemisfera unitária e a iluminância horizontal  $E_H$  pode ser expressa por:

$$E_H = \frac{L \cos\phi \cdot \omega}{\pi} \quad \text{[Equação 2.4]}$$

onde:

$E_H$  - iluminância horizontal no ponto P

$\phi$  - ângulo entre a normal ao ponto P e o centro da área S

Como  $(\cos\phi \cdot \omega)$  é igual a área interceptada na hemisfera unitária, projetada na base da hemisfera. A iluminância horizontal é diretamente proporcional à projeção  $S_2$  da área  $S_1$  na base da hemisfera unitária (LYNES, 1968) e é então expressa por:

$$E_H = L / \pi \cdot S_2 \quad [\text{Equação 2.5}]$$

onde:

$S_2$  - área projetada na base pela área S rebatida na superfície da hemisfera.

### 2.6.2 SISTEMAS DE PROJEÇÃO

A seguir se descreve os três principais sistemas de projeção utilizados para representação da hemisfera celeste.

- **Projeção ortográfica:** este tipo de projeção é contida dentro do círculo de horizonte. Pontos da hemisfera são projetados no plano do horizonte, com linhas de projeção paralelas verticais. A desvantagem deste método é que os círculos de altitude de igual distância angular, ficam mais espaçados perto do zênite, mas muito próximos uns dos outros próximos ao horizonte, o que significa que a precisão de leitura é diminuída nesta porção de céu (SZOKOLAY, 1980) como pode ser visto na figura 2.4.

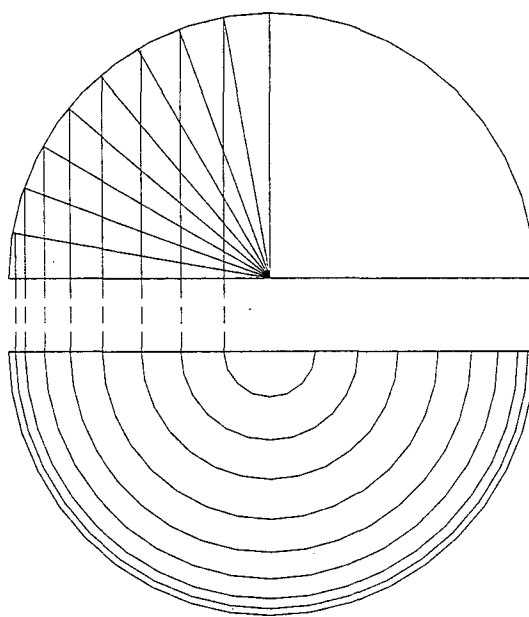


Figura 2.4 - Sistema de projeção ortográfico.



- **Projeção equidistante:** neste método de projeção, os ângulos de altitude aparecem igualmente espaçados. Esta característica assegura igual facilidade de leitura para ângulos altos e baixos e é de fácil plotagem. Um pequeno círculo direcionado para o ponto de observação será achatado em uma figura elíptica quando próxima da borda, um diâmetro ficando sempre do mesmo tamanho e o outro aumentando até que seja  $\pi/2$  vezes maior (OLGYAY, 1992). Na figura 2.5 se mostra círculos de altitude em projeção equidistante.

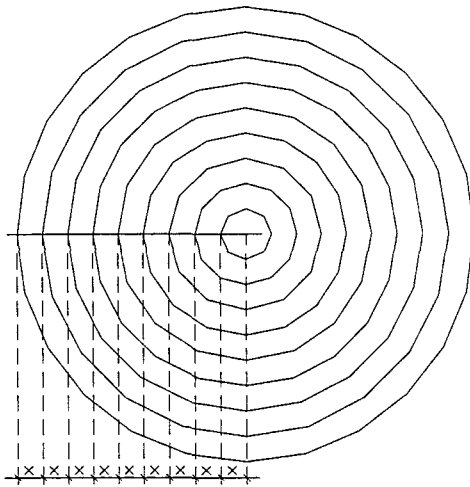


Figura 2.5 - Projeção equidistante.

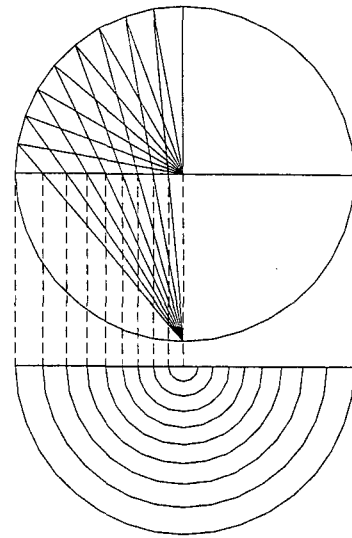


Figura 2.6 - Projeção estereográfica.

- **Projeção estereográfica:** é um dos métodos que foi desenvolvido para superar a dificuldade presente no método de projeção ortográfica. Pontos da hemisfera são projetados no círculo do horizonte, com um método de projeção radial com centro no nadir, ou seja, a uma distância de  $r$  abaixo do ponto do observador. Os círculos de altitude são ligeiramente mais espaçados próximo ao horizonte do que perto do zênite, mas isto é tido como uma vantagem, uma vez que fornece melhor resolução em ângulos de baixa altitude. A formulação matemática e a construção do gráfico é mais simples. Este método é adotado em alguns locais no Estados Unidos, Inglaterra, Austrália e pelos países do Commonwealth (SZOKOLAY, 1980). A forma de construção de um gráfico de projeções estereográficas pode ser vista na figura 2.6.

## 2.7 DIVISÃO DA ABÓBODA CELESTE

Há que se adotar um determinado sistema de divisão da abóboda celeste para que se possa calcular os incrementos nos ângulos azimutais e de altitude, necessários para a determinação dos fatores de forma e da contribuição da quantidade de luz relativa a determinado ponto situado na abóboda celeste.

### 2.7.1 DIVISÃO PROPOSTA POR GIRARDIN

As projeções em plano horizontal na forma proposta por GIRARDIN (1994), permitem tomar os valores para distribuição de céu uniforme por ela calculados para cada uma das divisões feitas, como sendo os valores dos fatores de forma que representam a área de projeção da abóboda em um plano ao nível do horizonte (ver figura 2.7).

No entanto, para o cálculo da relação  $L_p/L_z$ , este tipo de divisão da abóboda celeste se mostra de difícil apropriação para certas frações de céu, especialmente aquelas próximas à linha do horizonte.

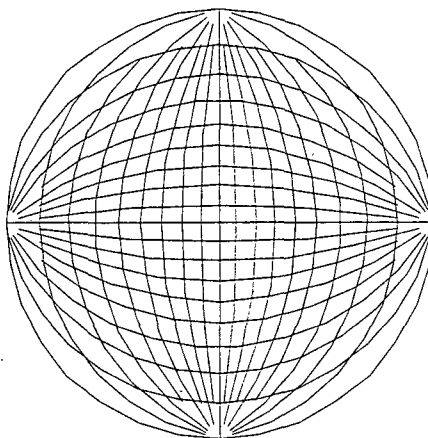


Figura 2.7 - Projeção estereográfica de acordo com a divisão proposta por GIRARDIN (1994)

### 2.7.2 DIVISÃO PROPOSTA POR TREGENZA

A divisão proposta pelo autor possui ângulos sólidos praticamente iguais para todas as bandas de altitude. Segundo o autor, o diâmetro ótimo de uma zona de céu é de 0,2 radianos (11,5 graus). Tal permite que cada zona seja tratada, com erro insignificante, como uma fonte pontual. Se recomenda a utilização deste tipo de subdivisão, para a realização de medidas de luminância de céu, em que o padrão de

varredura seja baseado em 145 zonas de 12 graus de altitude, centradas no azimute do sol como pode ser visto na figura 2.8.

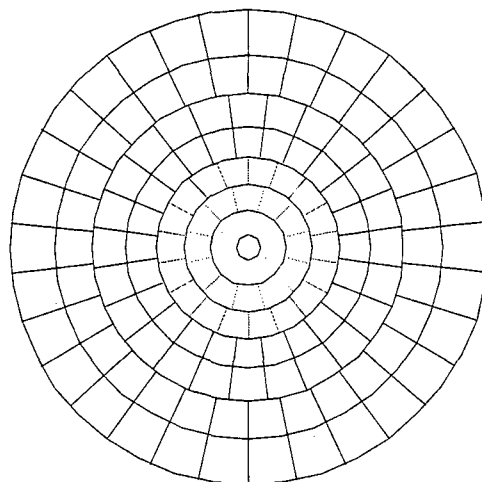


Figura 2.8 - Projeção estereográfica de acordo com a divisão proposta por TREGENZA (1993)

Ao se obter matematicamente os valores para distribuição de céu claro e encoberto de acordo com este padrão de divisão de porções de céu, se facilita sobremaneira a comparação do modelo matemático proposto com futuras medições realizadas sob céu real ou sob céus artificiais.

O ângulo sólido subentendido por uma zona de céu pode ser calculado por:

$$\text{ângulo sólido} = 2\pi(\text{sen}\gamma_s - \text{sen}\gamma_i) / (\text{número de zonas na banda})$$

[Equação 2.6]

onde:

$\gamma_s$  - limite superior da banda de altitude

$\gamma_i$  - limite inferior da banda de altitude

A seguir se mostra na tabela 2.1 com os ângulos sólidos calculados para a divisão proposta por TREGENZA (1993).

Tabela 2.1 - Dados para implementação da divisão em zonas de ângulo sólido semelhante.

Centro banda de altitude (graus)	6	18	30	42	54	66	78	90
Número de zonas na banda	30	30	24	24	18	12	6	1
Incremento de azimute	12	12	15	15	20	30	60	360
Ângulo sólido (steradianos)	0,0435	0,0416	0,0474	0,0407	0,0429	0,0445	0,0455	0,0344

Ao se utilizar a proposta de TREGENZA (1993) para divisão de zonas de céu, que propõe a utilização de um incremento de  $12^\circ$  para as altitudes e implementação de 145 zonas com ângulos azimutais variáveis, se obtém, no entanto, um diagrama menos uniforme em termos de leitura, tornando o cálculo dos valores mais demorado. Este método garante porém, que a posterior implementação de luminâncias medidas para céus reais se dê de forma mais dinâmica. Este procedimento de cálculo, pode ainda ser facilmente implementado por meio de um programa de planilha eletrônica (ver anexos).

## 2.8 ESTIMATIVA DA ILUMINAÇÃO NATURAL

De acordo com SZOKOLAY (1980), podem ser feitas redefinições do sistema de iluminação através da distinção dos vários caminhos que a luz percorre para alcançar um ponto interno do ambiente. São diferenciados três caminhos básicos:

- a) luz proveniente da porção de céu visível no ponto considerado, expresso como componente celeste (CC);
- b) luz refletida de superfícies opostas, expressa como a componente refletida externa (CRE);
- c) luz proveniente do ambiente externo que atinge o ponto após múltiplas reflexões nas superfícies internas, expressas como a componente refletida interna (CRI).

A soma destas 3 componentes fornece o total de iluminação natural que atinge determinado ponto  $E_p = CC + CRE + CRI$ . O cálculo separado de cada uma das 3 componentes se justifica pelo fato de que cada uma pode sofrer influência de fatores diferentes.

A seguir se apresenta mais detalhadamente cada uma destas componentes juntamente com suas principais características.

### 2.8.1 COMPONENTE CELESTE (CC)

É a porção da iluminância total de um ponto situado em um dado plano que é recebida diretamente de um céu com distribuição de luminância conhecida ou assumida, em relação à iluminância total em um plano horizontal devido a um hemisfério deste céu desobstruído (TREGENZA, 1993) como mostrado na figura 2.9.

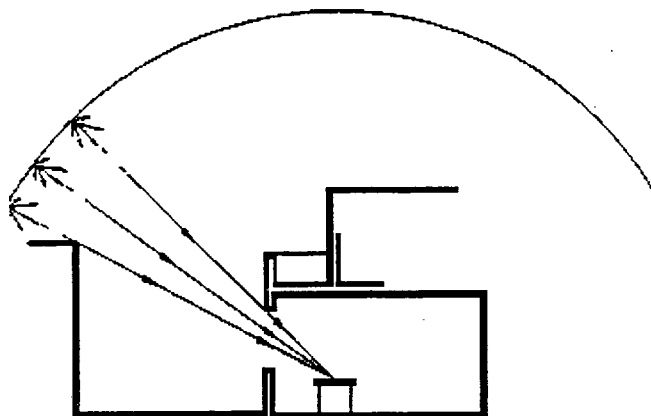


Figura 2.9 - Componente celeste - CC (Fonte: SOTERAS, 1985)

Sua magnitude depende da área de céu visível a partir do ponto considerado e do tipo de distribuição de céu adotado. Também depende da posição da área considerada, ou seja, se é próxima do horizonte onde a luminância é menor ou se próxima ao zênite onde a luminância é maior. A CC pode ser a maior parcela de contribuição da luz natural em um ponto, quando deste se “enxerga” o céu (SZOKOLAY, 1980).

### 2.8.2 COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA (CRE)

É a porção da iluminância total de um ponto situado em um dado plano que é recebida de obstruções que refletem a luz direta por elas recebida como mostra a figura 2.10.

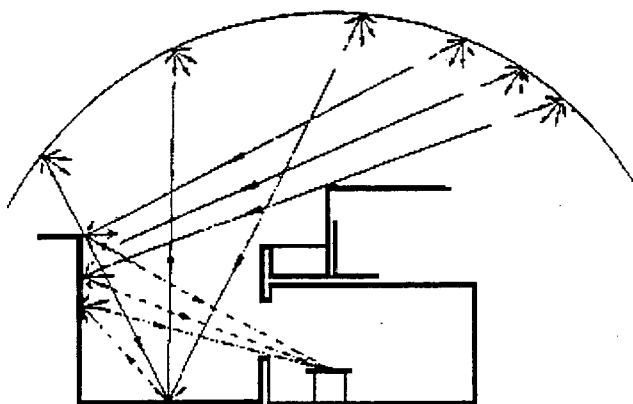


Figura 2.10 - Componente refletida externa - CRE (Fonte: SOTERAS, 1985)

Pode-se calcular a componente de céu (CC) e a componente refletida externa (CRE) ponto a ponto em um local e em diversos planos por meio de fórmulas matemáticas, conseguindo-se bastante precisão. Os valores dependem basicamente da posição relativa entre as superfícies iluminantes e o plano de referência. Esta

dependência explica alguns feitos como: a importância do tamanho da abertura; a redução na iluminação no ponto de referência à medida em que se afasta da abertura iluminante; que aberturas verticais fornecem uma iluminação mais uniforme que janelas horizontais de iguais dimensões; uma mesma área envidraçada distribuída de diferentes maneiras produz efeitos bastante distintos com relação à distribuição de luz; as prateleiras de luz produzem um melhor distribuição de luz; o mesmo ponto recebe iluminação distinta de acordo com o plano a que pertença (GIRARDIN, 1994).

Se houver uma obstrução externa oposta à janela, então o limite inferior da componente de céu será representada pela multiplicação da área de obstrução pela refletância da obstrução ou pela iluminação incidente na superfície, se conhecida (SZOKOLAY, 1980).

Caso contrário, pode-se tomar como base 0,2 se forem utilizados os diagramas de céu padrão encoberto CIE. Usando-se os diagramas para céu uniforme, assume-se metade do valor da refletância ou um fator multiplicativo de 0,1 (SZOKOLAY, 1980).

### 2.8.3 COMPONENTE REFLETIDA INTERNA (CRI)

A componente refletida interna é aquela que chega ao ponto depois de haver sido refletida e interrefletida nas superfícies interiores do local, como se mostra na figura 2.11. Seu cálculo é mais complexo ao produzirem-se reflexões e interreflexões entre as superfícies iluminantes; pode-se trabalhar com base em conceitos sobre troca de radiação que dão origem a métodos muito trabalhosos ou se recorrer a métodos simplificados de menor precisão (GIRARDIN 1994).

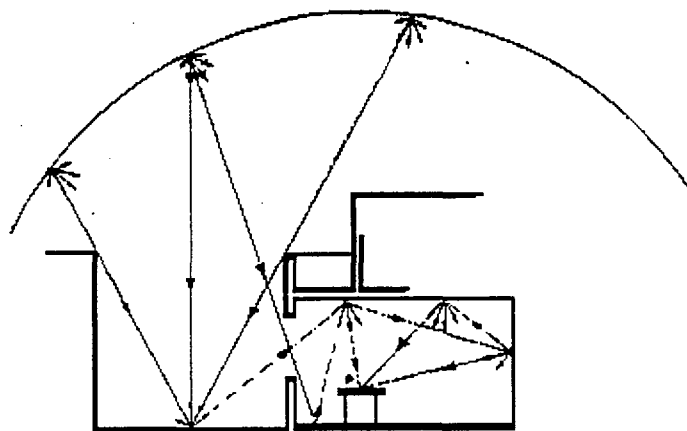


Figura 2.11 - Componente refletida interna - CRI (Fonte: SOTERAS, 1985)

No cálculo da iluminância total em um plano de trabalho se inclui o cálculo da componente refletida interna, CRI das paredes internas e outras superfícies do ambiente. A proporção de luz recebida por reflexões internas irá depender não somente dos fatores de reflexão, mas também da forma do interior (LYNES, 1968).

A iluminação horizontal no fundo de ambiente iluminados lateralmente é geralmente muito menor do que o vetor iluminação<sup>4</sup>, então aqui a luz interrefletida pode fornecer uma proporção substancial da iluminação total em um plano horizontal. As reflexões internas contribuem mais fortemente para a iluminação escalar; nestes casos a iluminação chegando de diversas direções é somada aritmeticamente. O vetor iluminação em uma abertura superior (zenital) iluminada lateralmente é pouco afetado por interreflexões, uma vez que a magnitude da iluminação interrefletida é pequena se comparada com a magnitude do vetor iluminação, e quantidades iguais de fluxo interrefletido chegando a um ponto de direções opostas, produzirá uma componente de vetor nulo (LYNES, 1968).

Devido à pequena variação em seus valores, o efeito da CRI atenua as diferenças que se produzem nos valores da CC e da CRE ao se afastar da abertura. Contribui desta forma para uma melhor distribuição da luz e suaviza as sombras e o contorno.

Nos casos em que os valores da CC são muito baixos ou nulos (pontos nos quais não se vê o céu), se torna fundamental aumentar o valor da CRE sobre a qual é, por vezes, possível se atuar e o valor da CRI sobre a qual atua o arquiteto (SZOKOLAY, 1980).

## 2.9 MÉTODOS PARA CÁLCULO DE ILUMINAÇÃO NATURAL

A distribuição da iluminação natural interna pode ser obtida através de três metodologias distintas: métodos gráficos simplificados, simulações com modelos em escala reduzida e modelagem matemática através de simulações de computador (PEREIRA, 1994-B).

Segundo PEREIRA (1994-B), os métodos gráficos são de fácil aplicação e permitem uma rápida análise do efeito relativo de diversos parâmetros de projeto. No entanto, permitem a análise de apenas um ponto de cada vez, dificultando a realização

---

<sup>4</sup> Ver Glossário.

de estudos paramétricos, sendo ainda limitados por suposições teóricas inerentes à sua implementação.

A modelagem matemática por computador como método de análise de projetos de iluminação, é rápida e flexível, permitindo extensas avaliações paramétricas, podendo ser desenvolvida simultaneamente com avaliações térmicas e de consumo de energia. A modelagem porém, além de requerer equipamento computacional adequado, pode exigir ainda uma entrada extensiva de dados, por vezes bastante trabalhosa, sendo também, limitada por suposições teóricas assumidas em algoritmos de problemas complexos.

Os procedimentos experimentais com modelos em escala se mostram uma forma bastante efetiva para se fazer a determinação dos níveis de iluminação internos permitindo a investigação de sistemas de aberturas mais complexos. Suas desvantagens são a demanda de tempo, a limitação com relação a realização de estudos paramétricos e a necessidade de instrumentação fotométrica adequada.

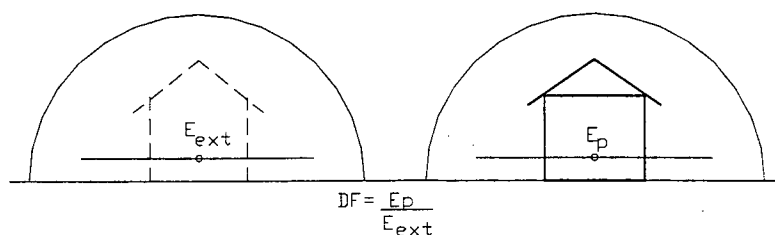
### 2.9.1 DAYLIGHT FACTOR - DF

Uma dificuldade séria em se estimar sistemas de iluminação natural é a variabilidade da luz que vem do céu e do sol, que não podem ser caracterizados por um único coeficiente de utilização para um dado sistema de iluminação e de aberturas. Tal fato levou ao desenvolvimento do *daylight factor* -  $DF^5$ , por volta de 1895, um indicador de desempenho ainda largamente usado nos dias de hoje. O  $DF$  é definido como a taxa de iluminação natural em um dado ponto de um plano devido à luz recebida direta ou indiretamente de um céu de distribuição de luminâncias conhecida em relação à iluminação em um plano horizontal devido a uma hemisfera desobstruída do céu como pode ser visto na figura 2.12. A luz direta do sol é excluída em ambas as parcelas. Geralmente o  $DF$  é determinado para o plano de trabalho a 75 cm acima do piso. Suas vantagens são que ele expressa a eficiência de um ambiente e seu sistema de janelas para iluminação natural. As pessoas percebem luminâncias relativas mais que luminâncias absolutas - o  $DF$  expressa a quantidade de luz em um espaço em relação à luz que seria vista no espaço exterior, sem obstruções. Note que esta forma de avaliação trata a luz não só quantitativamente como qualitativamente (LOVE e NAVVAB, 1993).

---

<sup>5</sup> British Standard Institution. Code of practice for daylighting. British Standard BS 8206: Part 2 (1992)



Fonte 2.12 - Definição do *Daylight Factor*

Para se estimar o *DF* em um ambiente iluminado lateralmente, se calcula a *CC* que chega diretamente do céu e a componente refletida externa, *CRE*, recebida após reflexões das superfícies externas como, por exemplo, paredes de prédios vizinhos. A soma destas duas componentes é então ajustada para permitir o cálculo do efeito de transmissividade do vidro e do acúmulo de sujeira e as múltiplas reflexões que influenciam a quantidade e a distribuição de luz natural dentro do próprio ambiente. O *DF*, a *CC* e a *CRE* são expressos como um percentual da iluminância em um plano horizontal externo, exposto à totalidade do céu, lembrando que para uma abertura totalmente desobstruída a *CRE* é zero (LYNES, 1968).

Para obtenção do valor do *DF* considera-se que, uma vez que a iluminação é aditiva, pode se obter a iluminação total em um ponto adicionando os valores dentro da máscara de obstrução da abertura que se queira estudar. Onde o contorno da máscara cortar uma subdivisão em duas, o número interno pode ser calculado proporcionalmente à área interna à máscara. A iluminação encontrada desta forma é aquela devida a um céu encoberto com iluminância de 10.000  $\text{lm}/\text{m}^2$  em um local desobstruído a céu aberto - mas somente se a abertura for desobstruída e se as paredes e teto forem tão improvavelmente escuras que não reflitam qualquer luz natural para o plano de trabalho. Se estas condições forem alcançadas, o *DF* do ponto é igual à percentagem de 10.000  $\text{lm}/\text{m}^2$  ou 1/100 da soma dos números internos à máscara de obstrução (LYNES, 1968).

No entanto, segundo LOVE e NAVVAB (1993), o *DF* sofre de sérias limitações:

- \* por definição a luz solar direta não deve atingir os pontos exteriores ou interiores para os quais o *DF* é determinado;
- \* os valores medidos mostraram considerável variação mesmo sob condição de céu encoberto;

- \* ele é difícil de se determinar e utilizar no caso de céus claros porque ele muda com a posição do sol;
- \* a iluminação de outras superfícies que não a horizontal é crítica para a percepção humana da adequação da iluminação; é especialmente importante este tipo de análise quando a iluminação é vertical e o  $DF$  por conceito é expresso em termos de iluminação horizontal;
- \* quando o desempenho do sistema de iluminação é representado em termos do  $DF$ , os efeitos combinados de iluminação natural e artificial são difíceis de se quantificar, porque a intensidade da iluminação artificial é independente da intensidade da iluminação natural.

### 2.9.2 FATORES DE CORREÇÃO PARA SUJEIRA, VIDROS E MOLDURAS

Os cálculos de luz natural devem permitir que se faça uma estimativa da influência da sujeira acumulada na área envidraçada, das propriedades de transmissão do meio vítreo e da luz interceptada por molduras, divisórias, etc. Fatores de correção são então aplicados ao cálculo da luz natural. De acordo com LYNES (1968), são eles:

- ✦ M = fator de correção devido à manutenção;
- ✦ G = fator de correção para vidros outros que não o vidro simples liso;
- ✦ B = fator de correção para molduras da abertura, divisórias do vidro, etc.

Em habitações e prédios de escritórios onde as janelas são mantidas praticamente limpas, o fator de manutenção pode ser tomado como 1, porque uma janela transparente irá parecer suja antes que qualquer fator de redução de transmissividade possa ser medido (LYNES, 1968).

### 2.9.3 DIAGRAMAS DA BRS - CÁLCULO DA COMPONENTE CELESTE

A BRS (Building Research Station) desenvolveu uma série de diagramas utilizando o princípio do ângulo sólido projetado, que fornecem uma leitura direta do  $DF$  em percentagens. Existem 10 gráficos: 5 para distribuição uniforme de céu e 5 para o céu padrão CIE, do tipo encoberto - janelas verticais, abertura com vidro horizontal, com vidro a 30°, com vidro a 60°, e aberturas sem vidro (SZOKOLAY, 1980).

Fatores de correção para manutenção (M), fator do vidro (G) e fator de emolduramento (B) devem ser levados em consideração (SZOKOLAY, 1980).

#### 2.9.4 MÉTODOS DE GRADE

Vários métodos de projeção podem ser usados para representar a abóboda celeste bidimensionalmente e para subdividi-la em pequenas áreas, cada qual representando uma unidade de luz. Uma imagem de uma abertura e de suas obstruções pode ser construída na mesma projeção e superposta ao gráfico. O número de pequenas áreas coincidindo com a abertura desobstruída fornecerá a CC.

Pelo estabelecimento da grade pode-se fazer uma estimativa da distribuição da luz natural em um ambiente, e calcular a CC e a CRE para cada um dos pontos da grade. A CRI média deve ser calculada e adicionada ao valor, após o que se aplicam os fatores M, G e B. Por interpolação entre os valores da grade, um grupo de *DFs* podem ser estabelecidos e pode-se, então, indicar a distribuição da luz natural (SZOKOLAY, 1980).

Tais métodos são particularmente úteis quando a forma das aberturas ou obstruções são complexas ou quando outros fatores como trajetórias solares ou a vista devam ser considerados conjuntamente com a iluminação natural. Para cálculos rotineiros, os métodos de grade são um tanto trabalhosos (SZOKOLAY, 1980).

#### 2.9.5 MÉTODO DO FLUXO TOTAL

O sistema pode ser considerado como uma caixa fechada na qual a luz é admitida através de uma abertura. Se a iluminância na superfície da janela ( $E_w$ ) for estabelecida e multiplicada pela área da janela ( $A_w$ ), o produto será o fluxo total incidente na janela (em lumens). Esta quantidade de fluxo será reduzida pelos fatores de manutenção (M), do vidro (G) e por obstruções e barras da janela (B). O fluxo efetivo dividido pela área do piso deve fornecer um valor médio de iluminação, mas para se obter o valor em dado ponto, deve-se usar o coeficiente de utilização (CU), que depende das proporções geométricas do ambiente, da refletância das paredes e teto, do tipo de sistema de abertura e da posição relativa do ponto em relação à janela (SZOKOLAY, 1980).

Este método, também conhecido como “método lumen de projeto de iluminação natural”, é similar ao método para projeto de iluminação artificial. Se sugere, no entanto, que seu uso seja restrito ao projeto de iluminação zenital, nos casos em que se

deseja uma iluminação uniforme e geral. Para o uso de iluminação lateral, o método de divisão de fluxo irá fornecer resultados bem mais confiáveis (SZOKOLAY, 1980).

### 2.9.6 COEFICIENTES DE LUZ NATURAL

Os coeficientes de luz natural incluem relações geométricas que determinam a iluminância da luz natural. Cada coeficiente é a proporção entre a luminância de um trecho do céu, e a iluminância na edificação devido a luz deste trecho. O céu pode ser dividido em zonas de altitude e azimute, e encontrado o coeficiente de luz natural para cada zona. A iluminância total da luz natural em um ponto é então a soma dos produtos da luminância média de cada zona do céu pela área subentendida da zona, e o coeficiente de luz natural correspondente (TREGENZA, 1993):

$$E = \sum_k L_k a_k d_k, [\text{lux}] \quad [\text{Equação 2.7}]$$

onde:

$L_k$  é a luminância do céu dentro da zona  $k$ , [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$a_k$  é a área do trecho do céu dentro da zona  $k$ , [esteradianos]

$d_k$  é o coeficiente de luz natural para iluminância em um dado ponto

### 2.9.7 DIAGRAMAS DE WALDRAM

Este método é utilizado para janelas verticais, e distribuição de céu encoberto. O diagrama representa metade da hemisfera celeste e é dividida em múltiplos de 50, por exemplo  $20 \times 25 = 500$  quadrados iguais. Cada quadrado representa 0,1% da CC. Os limites verticais são representados por linhas verticais, mas as linhas horizontais são construídas usando-se as linhas projetadas do diagrama. A hemisfera celeste é projetada em uma superfície vertical cilíndrica. O eixo horizontal possui uma escala linear, em ângulos azimutais,  $90^\circ$  à direita e à esquerda do  $0^\circ$ , que é a direção normal à janela. A escala vertical é baseada em  $Y = 1 - \cos 2\theta$ , e pode ser produzida por projeção dos ângulos de um semicírculo. A figura 2.13 mostra um diagrama de Waldram com linhas descendentes para representar janelas verticais, dividido em  $20 \times 25 = 500$  quadrados. Cada quadrado representa 0,1% do  $DF$ .

No diagrama de Waldram a luminância de céu é representada por uma grade regular e o contorno da janela deve ser plotada de uma forma trabalhosa, sendo mostrada como um forma irregular. Se a janela tiver que ser projetada por métodos de

perspectiva normal, a representação de áreas de igual luminância deverá ser irregular. (SZOKOLAY, 1980).

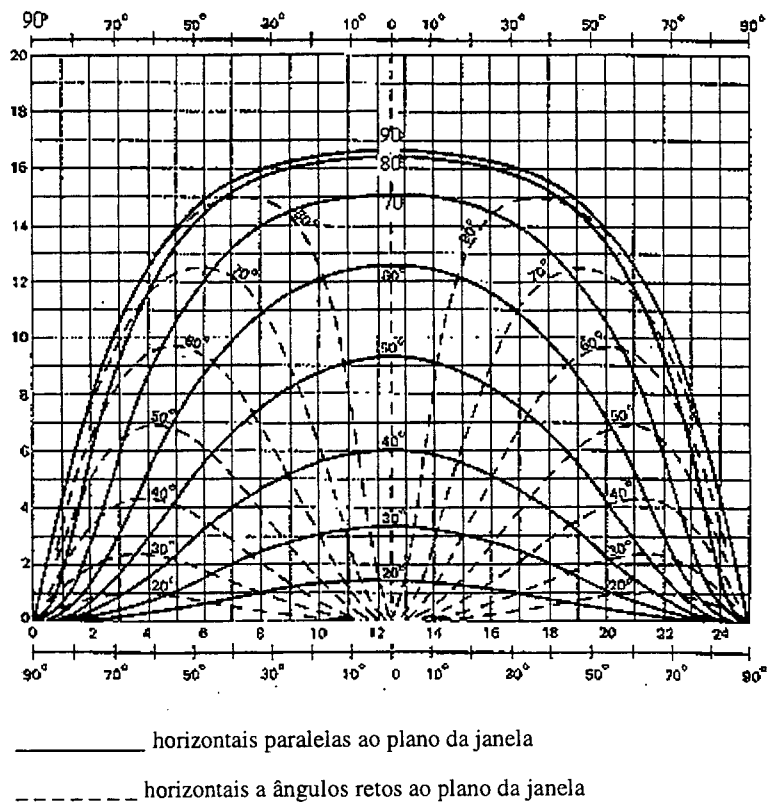


Figura 2.13 - Diagrama de Waldram para céu padrão CIE (Fonte: SZOKOLAY, 1980).

### 2.9.8 DIAGRAMAS PEPPER-POT

São diagramas para se estimar a componente de céu para condições de céu encoberto e claro. Os diagramas são constituídos de pontos distribuídos como função da distribuição de luminâncias no céu e da correção do cosseno para o ângulo de incidência.

Neste método, a abóboda celeste é projetada de um ponto de vista em um plano vertical. A figura então criada é subdividida em áreas de diferentes tamanhos, cada qual representando uma unidade de igual intensidade luminosa do céu (unidade de área do céu x sua luminância). Cada unidade destas é representada por um ponto, como pode ser visto na figura 2.14. A subdivisão - ou seja, o espaçamento dos pontos - é feita de forma que cada ponto represente uma quantidade definida do fator de luz diurna. Uma hemisfera celeste forneceria um *DF* de 100% (SZOKOLAY, 1980).

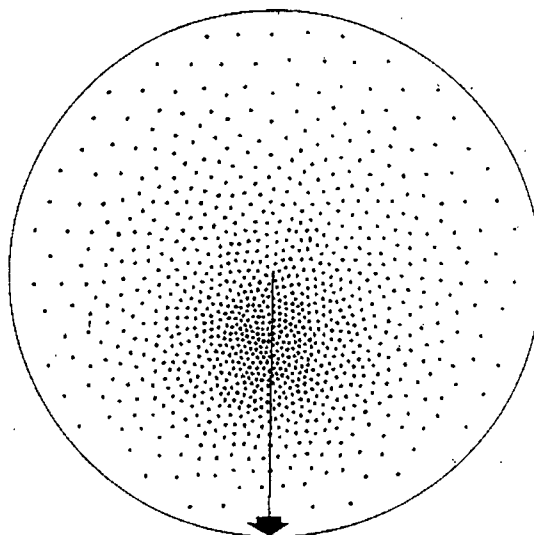


Figura 2.14 - Diagrama Pepper Pot para altitude solar de 60°.

Ao se desenhar uma vista em perspectiva da janela a partir de determinado ponto, sobre a qual se superpõe o diagrama *Pepper Pot*, o número de pontos visíveis da abertura fornecerá o valor da componente celeste para aquele ponto. Os fatores de correção para manutenção, transmissividade do vidro e presença de obstruções no plano da abertura, M, G e B devem ser aplicados.

### 2.9.9 MODELOS EM ESCALA

Pode-se confiar em modelos em escala para prever a entrada de luz natural em qualquer prédio. Este é o único método confiável de predição em situações incomuns, geometrias complexas ou janelas com alto grau de obstrução.

O processo de tomada de decisão no projeto geralmente pode ser facilitado pelo uso de modelos em escala de forma a se avaliar diferentes opções de projeto. O uso de fotometria em modelos em escala é uma técnica estabelecida que tem sido usada no projeto de iluminação natural há bastante tempo. A vantagem que o modelamento físico possui em relação ao uso de programas computacionais se torna óbvia quando se considera situações reais de projeto onde geometria complexa e/ou os métodos de cálculo não satisfazem as necessidades do usuário. O modelo em escala fornece um método simples de se mudar uma variável de cada vez, como por exemplo a geometria da janela, sua localização, orientação, formas de zenitais, sistemas de sombreamento ou propriedades superficiais de espaços interiores (NAVVAB, 1996).

### 2.9.9.1 Uso de Modelos em Escala

Modelos arquitetônicos são ferramentas utilizadas no processo de projeto para estudar e explorar diferentes aspectos do projeto e construção de edificações. Ao contrário de outros modelos físicos nos quais o comportamento do fenômeno físico sofre distorções pelo efeito da escala, o modelo para iluminação não requer compensações em função da escala. Um modelo em escala que duplique perfeitamente um espaço real, exposto às mesmas condições de céu apresenta um padrão de distribuição de iluminação interna idêntico. Tal se deve ao fato de que o comprimento de onda da luz visível é extremamente reduzido em relação ao tamanho dos modelos em escala; assim a luz se reflete nas superfícies internas da mesma forma que no espaço real (PEREIRA, 1995).

Em um modelo espacial de uma edificação, as relações angulares e direcionais devem ser as mesmas que na edificação original. Isto significa que a iluminação em qualquer ponto no modelo em escala será idêntica à iluminação na edificação original, desde que as luminâncias corretas possam ser reproduzidas. A escala do modelo é irrelevante, mas cores e texturas devem ser precisas (LYNES, 1968).

Segundo PEREIRA (1995), as principais vantagens do estudo através de modelos são:

- ⇒ obtenção de dados quantitativos precisos, mesmo com modelos simplificados;
- ⇒ adequabilidade para lidar com geometrias complexas;
- ⇒ facilidade nas comparações pela simplicidade na variação de parâmetros;
- ⇒ possibilidade de avaliações qualitativas por meio de observação direta ou por fotografias;
- ⇒ objeto familiar na prática de projeto;
- ⇒ o modelo serve como ferramenta de comunicação com outros membros da equipe e clientes.

Ao se utilizar modelos em escala pode-se reduzir o erro devido a certos fatores que incluem a relativa calibração dos sensores, o conhecimento das refletâncias das superfícies e a fidelidade com a qual o modelo duplica o espaço e as aberturas em estudo. Já outros fatores são mais difíceis de se regular (LOVE e NAVVAB, 1991):

- o tamanho da fotocélula: em um modelo em escala um sensor de dado tamanho apresenta uma vista diferente da porção de céu se comparado com o

### 2.9.9.1 Uso de Modelos em Escala

Modelos arquitetônicos são ferramentas utilizadas no processo de projeto para estudar e explorar diferentes aspectos do projeto e construção de edificações. Ao contrário de outros modelos físicos nos quais o comportamento do fenômeno físico sofre distorções pelo efeito da escala, o modelo para iluminação não requer compensações em função da escala. Um modelo em escala que duplique perfeitamente um espaço real, exposto às mesmas condições de céu apresenta um padrão de distribuição de iluminação interna idêntico. Tal se deve ao fato de que o comprimento de onda da luz visível é extremamente reduzido em relação ao tamanho dos modelos em escala; assim a luz se reflete nas superfícies internas da mesma forma que no espaço real (PEREIRA, 1995).

Em um modelo espacial de uma edificação, as relações angulares e direcionais devem ser as mesmas que na edificação original. Isto significa que a iluminação em qualquer ponto no modelo em escala será idêntica à iluminação na edificação original, desde que as luminâncias corretas possam ser reproduzidas. A escala do modelo é irrelevante, mas cores e texturas devem ser precisas (LYNES, 1968).

Segundo PEREIRA (1995), as principais vantagens do estudo através de modelos são:

- ⇒ obtenção de dados quantitativos precisos, mesmo com modelos simplificados;
- ⇒ adequabilidade para lidar com geometrias complexas;
- ⇒ facilidade nas comparações pela simplicidade na variação de parâmetros;
- ⇒ possibilidade de avaliações qualitativas por meio de observação direta ou por fotografias;
- ⇒ objeto familiar na prática de projeto;
- ⇒ o modelo serve como ferramenta de comunicação com outros membros da equipe e clientes.

Ao se utilizar modelos em escala pode-se reduzir o erro devido a certos fatores que incluem a relativa calibração dos sensores, o conhecimento das refletâncias das superfícies e a fidelidade com a qual o modelo duplica o espaço e as aberturas em estudo. Já outros fatores são mais difíceis de se regular (LOVE e NAVVAB, 1991):

- o tamanho da fotocélula: em um modelo em escala um sensor de dado tamanho apresenta uma vista diferente da porção de céu se comparado com o



espaço em escala real. Nos locais onde a iluminância muda rapidamente (como próximo a janelas sem proteção) erros significativos podem ocorrer;

- o nivelamento do sensor: em espaços iluminados lateralmente onde grande parte da luz que chega ao sensor é recebida em ângulos oblíquos, pequenos erros no nivelamento do sensor podem resultar em altas margens de erro na medição;
- a colocação do sensor: embora não seja difícil de dispor as fotocélulas com precisão suficiente em um modelo em escala na maioria das condições, pequenos erros na colocação destes em modelos podem resultar em erros relativamente grandes quando os gradientes de fluxo são altos.

Para estudos de iluminação interna, o tamanho relativo do sensor fotométrico para a medição pode causar um distúrbio quando inserido num modelo em escala muito pequeno. Considerando-se a altura de uma cadeira, a altura do sensor também deve ser considerada (MOORE, 1984).

Outros fatores como materiais de construção disponíveis e portabilidade afetam a escala do modelo. Como a maioria dos modelos vai ser usada para comparação de várias alternativas, a construção deve ser modular para permitir alterações. Um cuidado especial deve ser tomado para detalhar todas as aberturas (MOORE, 1984).

### 2.9.9.2 Testes com Modelos em Escala

Os testes com modelos em escala podem ser conduzidos sob céu real ou sob céu artificial. O teste sob céu real é o mais fácil e mais barato. No entanto, condições de céu e tempo imprevisíveis mudam as iluminâncias interiores consideravelmente. Mesmo em dias “idênticos”, os valores as medidas de luminância de céu podem variar em até 15%. Por esta razão se recomenda que medidas relativas de iluminância possam ser usadas como base para se comparar projetos alternativos (MOORE, 1984).

#### **Céu real: encoberto**

A luminância relativa de um céu encoberto varia com a altitude do sol encoberto, mas a proporção de 1:3 da luminância do zênite para o horizonte, permanece constante. Por isso, o *daylight factor* de uma edificação particular permanecerá constante. Tal permite que testes externos sejam conduzidos com alto grau de acuidade sob um céu completamente encoberto (MOORE, 1984).

**Céu real: claro**

No modelo para céu claro os ângulos solares que se deseja avaliar podem ser obtidos pela inclinação dos modelos em relação ao sol, para se obter os ângulos desejados de altura e azimute. Nesse processo é obvio que a inclinação expõe o modelo a uma vista “diferente” do céu e do terreno. No entanto, se o projeto for feito para utilizar luz difusa, a componente de iluminação devido a componente celeste é geralmente tão grande que as variações de contribuição devidas ao terreno e ao céu, são insignificantes (O’LAUGHING e POWER, 1983 apud MOORE, 1984). Na prática, mesmo a iluminação natural através de aberturas é menos afetada por uma leve inclinação do modelo do que seria de se esperar por causa das luminâncias similares entre as superfícies do terreno iluminadas pelo sol e o céu claro (MOORE, 1984).

Comparações entre modelos testados sob céu claro devem ser baseadas numa razão de um “fator de janela” da iluminância interior pela exterior, no plano da abertura primária e as alturas e azimutes relativos do sol devem ser idênticos (MOORE, 1984).

**Céu real: parcialmente encoberto**

As condições de céu parcialmente encoberto, onde a distribuição de brilho do céu muda consideravelmente através do período de teste, são inadequadas para teste em modelos e devem ser evitadas. Tal se deve à grande variação das luminâncias de nuvens em relação à posição relativa do sol (MOORE, 1984).

**Céus artificiais**

Estudos com modelos em escala podem ser feitos sob céu real, mas as limitações impostas por variações no clima podem ser bastante sérias. O céu artificial simula condições de céu encoberto padrão, fornecendo tanto distribuições para céu uniforme quanto para o céu encoberto padrão CIE. A precisão da distribuição é mais importante do que os valores numéricos de luminâncias obtidas (SZOKOLAY, 1980).

Existem 2 formas básicas de céus artificiais: a hemisférica e a retangular (ver a figura 2.15). A hemisférica pode ser constituída por um domo com superfície opaca e difusora iluminado por baixo, ou um domo translúcido (hemisférico ou geodésico), com luzes montadas por trás. Os céus retangulares possuem um teto luminoso e 4 paredes verticais forradas com espelhos. As múltiplas reflexões entre espelhos paralelos opostos fornecem um efeito de horizonte infinito. A absorção do espelho de vidro durante as

múltiplas reflexões asseguram uma distribuição de luminâncias semelhante à do céu encoberto padrão CIE (SZOKOLAY, 1980).

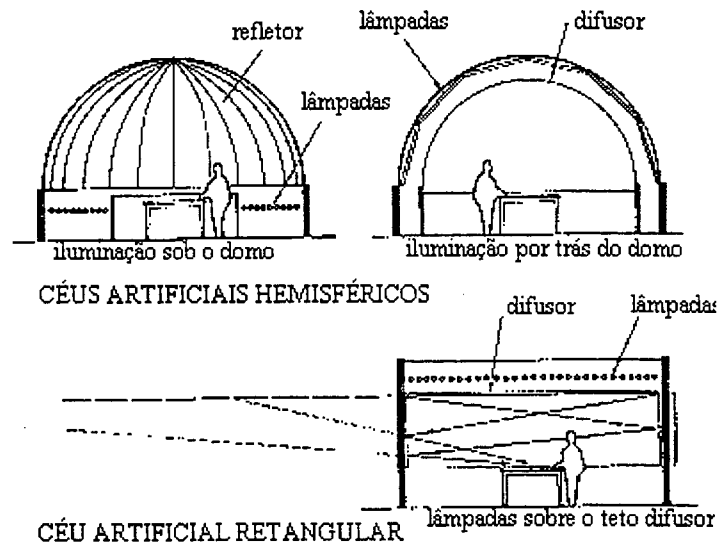


Figura 2.15 - Céus artificiais (Fonte: SZOKOLAY, 1980)

Entre estes temos:

- Céu de domo esférico: são geralmente branco opacos e iluminados por luzes interiores perimetrais. O modelo é localizado no centro e recebe luz refletida do domo circundante de forma similar àquela de um céu encoberto. A distribuição de luminâncias de um tal céu pode ser regulada se ajustando as luzes do perímetro. Uma vez que o domo é de tamanho finito, ele apresenta um horizonte não real. Para minimizar esse erro, o domo deve ser relativamente grande se comparado aos modelos.
- Caixa de espelhos: uma alternativa menos cara que o domo. Combina um teto luminoso e paredes espelhadas para criar um céu com um horizonte "infinito" como resultado de múltiplas interreflexões. Uma vez que parte da luz é absorvida em cada reflexão do espelho, esta configuração tende a se aproximar naturalmente da distribuição de luminâncias de um céu encoberto.

## **3. METODOLOGIA**

Neste capítulo se faz a apresentação de uma nova metodologia para o cálculo da quantidade de luz que chega a um ponto interno, visando facilitar o processo de cálculo e integrá-lo ao projeto em forma gráfica, habitual ao projetista. Nesta etapa será desenvolvido o método para a obtenção da CIN - Contribuição de Iluminação Natural, baseado no cálculo das três componentes em que se divide a luz natural para fins de estudo: componente celeste (CC), componente refletida externa (CRE) e componente refletida interna (CRI).

### **3.1 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA**

O método de cálculo aqui proposto pretende fornecer a projetistas uma ferramenta prática de estimativa da quantidade de luz natural incidente em um ponto de um plano de trabalho horizontal, no interior de uma edificação.

Para a realização deste trabalho de dissertação são utilizados os conceitos de luminância, iluminância e de distribuição de luminâncias de céu apresentados anteriormente, e os cálculos e métodos matemáticos apresentados a seguir. Neste capítulo são apresentados detalhadamente os métodos de cálculo utilizados para a execução dos diagramas de contribuição relativa de luz (DCRL) baseados nas distribuições de luminâncias para céu claro e encoberto. Tais diagramas serão utilizados para cálculo de iluminâncias internas em plano horizontais.

Os diagramas a serem apresentados neste estudo, são feitos a partir da elaboração de planilhas eletrônicas para montagem de tabelas plotadas sobre gráficos em projeção estereográfica. Estes diagramas representam a distribuição de luminâncias em céu

encoberto e em céu claro para as altitudes solares de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°, e são usados para se calcular os níveis de iluminância em um ponto escolhido, situado em planos horizontais no interior de ambientes iluminados naturalmente, juntamente com os procedimentos de cálculo para as componentes refletida externa e interna.

A somatória dos valores obtidos para a componente celeste CC, a componente refletida externa CRE e a componente refletida interna multiplicados pelos devidos fatores de correção para vidro, emolduramento da abertura e manutenção irá fornecer a contribuição total de iluminação natural CIN relativa a um ponto situado em um plano horizontal.

### **3.2 ELABORAÇÃO DOS DIAGRAMAS**

Para se chegar à forma final de apresentação gráfica, a primeira etapa realizada consiste na elaboração de tabelas para cálculo da distribuição de luminâncias de céu por meio de fórmulas matemáticas. O cálculo da contribuição relativa de luz é feita ao se multiplicar os valores encontrados pelos fatores de céu para cada um dos modelos de distribuição levados em consideração neste trabalho. Por meio destes diagramas se faz o cálculo da componente celeste em determinado ponto interno situado em um plano horizontal do ambiente.

A escolha de um método gráfico visa propiciar uma melhor visualização de como se dá a distribuição de luminâncias na abóboda celeste e facilitar a interação desta ferramenta com as demais ferramentas de projeto gráfico - máscaras de obstrução, diagramas solares, etc.

A seguir cada uma das etapas seguidas para a implementação dos diagramas de contribuição relativa de luz será descrita de forma detalhada.

### **3.3 GEOMETRIA DA INSOLAÇÃO**

Para que se possa fazer cálculos de iluminação natural que levem em consideração uma distribuição de céu claro, deve se saber localizar o sol na abóboda celeste e em relação

ao ponto escolhido. A posição do sol com referência no horizonte é usualmente expressa por sua altitude e seu azimute. Altitude é a distância angular acima do horizonte, como pode ser visto na figura 3.1 (OLGYAY, 1963 ). E o azimute é o ângulo entre o norte geográfico e o círculo vertical que passa pelo centro do sol.

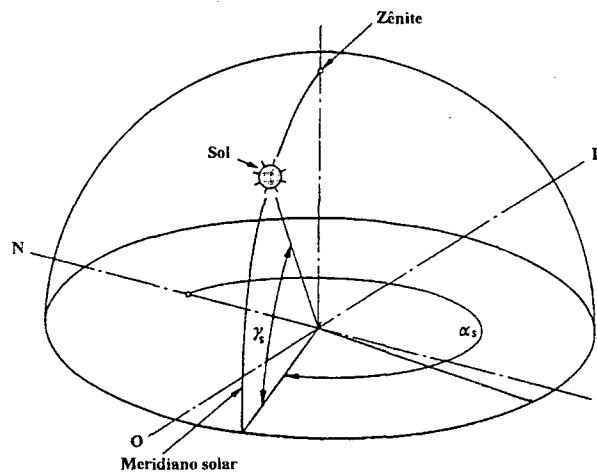


Figura 3.1 - Azimute e altitude solar<sup>1</sup>

Para a obtenção dos valores de altura e azimute solares deve se proceder ao cálculo das seguintes grandezas (Kittler apud PEREIRA, 1996 A):

- **Declinação Solar** ( $\delta_s$ ) - deve ser entendida como sendo o ângulo entre o centro do sol e o equador celeste, ou seja, a inclinação do eixo da terra em relação a elíptica da trajetória. ( $- 23,45^\circ \leq \delta_s \leq + 23,45^\circ$ ). Os valores da declinação do sol são positivos quando o sol apresenta-se ao norte do Equador e negativos quando o mesmo apresenta-se ao sul. Considerando, de maneira simplificada, a declinação solar como função exclusivamente da época do ano, obtemos este parâmetro através da seguinte expressão:

$$\delta_s = 23,45^\circ \cdot \text{sen} ( 29,7^\circ \cdot M + 0,98^\circ \cdot D - 109^\circ ) \quad [\text{Equação 3.1}]$$

onde:

$\delta_s$  = Declinação do sol, em graus;

<sup>1</sup>Fonte: PEREIRA, 1996.

M = Número do mês do ano, sendo igual a 1 para janeiro e 12 para dezembro;

D = Número do dia do mês, variando de 1 a 30 ou de 1 a 31, exceto para o mês de fevereiro

- **Altitude Solar ( $\gamma_s$ )** - é o ângulo entre o centro do sol e o horizonte, do ponto de vista do observador. É obtido em função da hora do dia, da época do ano e da latitude e longitude geográfica do local considerado. A variação da altitude é de 0 a 90°, sendo que, quando o sol encontra-se no zênite sua altitude é igual a 90°.

A altitude solar é determinada pela seguinte equação:

$$\gamma_s = \text{arc sen} [\text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta_s - \text{cos } \phi \cdot \text{cos } \delta_s \cdot \text{cos} (15^\circ \cdot h_s)] \quad \text{[Equação 3.2]}$$

onde:

$\gamma_s$  = altitude solar, em graus

$\phi$  = latitude do local, em graus (negativo ao sul do equador)

$h_s$  = hora solar verdadeira, dada por:

$$h_s = h + (\lambda_p - \lambda) + x_h \quad \text{[Equação 3.3]}$$

15

onde:

h = hora local marcada no relógio;

$\lambda$  = longitude do local, em graus, (positivo a oeste de Greenwich);

$\lambda_p$  = longitude do meridiano padrão do local, em graus e múltiplo de 15;

$x_h$  = equação horária, dada por:

$x_h = 0,170 \cdot \text{sen}[1,93 \cdot (J) - 154,4] - 0,129 \cdot \text{sen}[1,01 \cdot (J) - 8,08]$ , sendo, J, o dia Juliano, dado por  $J = i + D$ , onde i é o valor numérico mensal (que representa o número de dias decorridos no ano até o início do mês em estudo), fornecido pela Tabela 3.1 abaixo e D o dia do mês.

Obs: A equação horária é o termo de correção entre a hora solar e a hora do relógio, cuja diferença se deve às flutuações na duração do dia solar e pela órbita elíptica da terra. - 14

$\text{min } 17 \text{ s} \leq x_h \leq + 16 \text{ min } 25 \text{ s}$ . Quando estiver em vigor o horário de verão, a equação horária deverá ser diminuída de 1 hora.

Tabela 3.1: Meses e respectivos valores numéricos mensais.

Mês	i	Mês	i
Janeiro	0	Julho	181
Fevereiro	31	Agosto	212
Março	59	Setembro	243
Abril	90	Outubro	273
Maiο	120	Novembro	304
Junho	151	Dezembro	334

- **Azimute Solar ( $\alpha_s$ )** - É medido a partir do norte no sentido horário ( $0 \leq \alpha_s \leq 360^\circ$ ). Assim como a altitude solar, o azimute solar também é função da hora do dia, época do ano e coordenadas geográficas do local considerado.

O azimute do sol é fornecido através das seguintes equações:

$$\alpha_s = \arccos \frac{[\cos \phi \cdot \sin \delta_s + \sin \phi \cdot \cos \delta_s \cdot \sin 15^\circ \cdot h_s]}{\cos \gamma_s} \quad (p/ h_s \leq 12:00) \quad [\text{Equação 3.4}]$$

$$\alpha_s^{12:00 - 24:00} = 360^\circ - \alpha_s \quad (p/ h_s > 12:00) \quad [\text{Equação 3.5}]$$

Como pôde ser visto, calcular ângulos de altura e azimute solares é uma tarefa relativamente simples para cada data e horário. No projeto de uma edificação, no entanto, é importante se considerar a posição relativa do sol através do ano, e o projetista deve ser capaz de visualizar o efeito de arranjos alternativos antes de tomar uma decisão. Repetir estes cálculos um grande número de vezes iria consumir muito tempo; portanto, uma forma de representação gráfica da geometria solar se faz desejável. (SZOKOLAY, 1980).

O movimento aparente do sol pelo céu se deve à rotação da terra ao redor do sol e sobre seu próprio eixo, mas o aumento e decréscimo de luz natural em um ponto na superfície da terra é mais fácil de se obter se retornarmos à noção primitiva de uma terra estática e plana e um sol circundante. A órbita aparente do sol em qualquer dia do ano pode ser então representada em uma projeção da esfera unitária que representa a abóboda celeste (LYNES, 1968).



Existem diversos sistemas diferentes de projeção da abóboda celeste imaginária com as trajetórias solares em um plano. Algumas a projetam na superfície de um cilindro (como nos diagramas de Waldran), outras em planos paralelos ao horizonte. Em princípio, pode haver tantos sistemas quantos mapas de projeção houver (OLGYAY, 1963).

O sistema de diagramas de trajetória solar mostram a abóboda celeste projetada em um plano paralelo ao plano do horizonte. No diagrama resultante (ver figura 3.2), a linha do horizonte aparece como um círculo e as trajetórias solares como curvas cuja curvatura depende do método de projeção adotado e da latitude local. (OLGYAY, 1963).

A partir da projeção da hemisfera faz-se a construção das trajetórias solares, por meio de uma matriz data x hora, na qual qualquer hora do ano pode ser localizada. Se o ponto desejado é localizado, o ângulo azimutal pode ser lido através da determinação de uma linha radial que passe pelo ponto. O ângulo da altitude solar pode ser lido por interpolação entre os círculos concêntricos de altitude para a posição do ponto P (SZOKOLAY, 1980). As linhas curvas indicadas por dias e meses do ano representam as trajetórias solares nas datas mostradas. Linhas “radiais” a partir do Polo Norte, indicam as horas (OLGYAY, 1992).

Os gráficos de trajetória solar são montados a partir dos cálculos matemáticos mostrados anteriormente para obtenção da declinação solar, da altitude solar e do azimute solar.

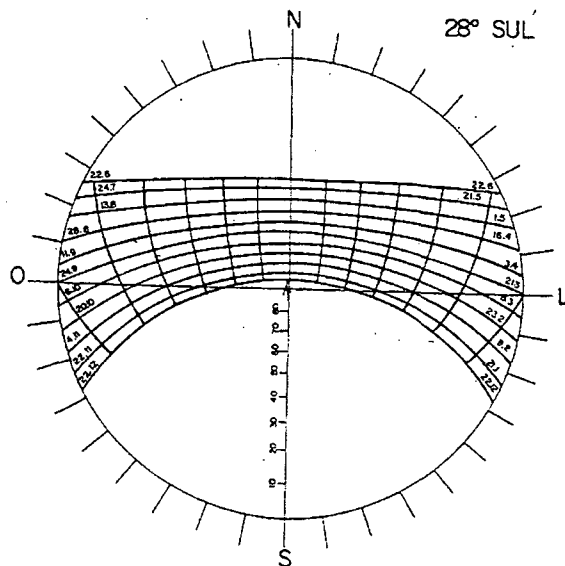


Figura 3.2 - Diagrama de trajetórias solares para Florianópolis, SC.

### 3.4 REPRESENTAÇÃO BIDIMENSIONAL DA ABÓBODA CELESTE

Segundo SOTERAS (1985), para se determinar corretamente a incidência de luz natural em um projeto, deve-se obter uma forma de representação gráfica que permita visualizar os diversos elementos que compõem o espaço, determinando sua situação em relação ao ponto de estudo.

O tipo de representação adotado para visualização dos elementos da abóboda celeste e dos elementos de projeto neste trabalho deve se basear num sistema duplo de projeção: uma projeção cônica do objeto ou porção de céu sobre a hemisfera celeste (ver figura 3.3) e uma transposição estereográfica da imagem projetada sobre a hemisfera.

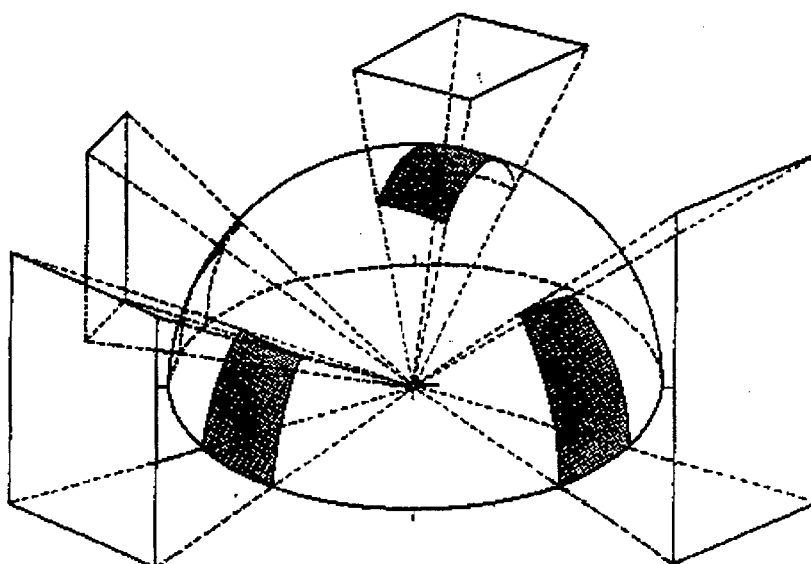


Figura 3.3 - Projeção de um objeto na esfera unitária (Fonte: SOTERAS, 1985).

Para a implementação dos diagramas de distribuição de luminâncias, o passo inicial é se fazer a projeção da abóboda celeste no plano do horizonte (MOORE, 1991; LYNES, 1968; TREGENZA, 1993).

Se adota a projeção em perspectiva estereográfica da abóboda celeste sobre o plano bidimensional pelas seguintes vantagens operativas em relação a outros métodos de projeção, levantados por SOTERAS (1985):

- representação de toda a hemisfera celeste em um único gráfico;
- qualquer seção transversal ao eixo da hemisfera se projeta como uma circunferência;

- o traçado gráfico de elementos projetados é bastante simples;
- a melhor representação gráfica de elementos próximos ao horizonte;
- rápida identificação global da imagem projetada com sua correspondente espacial, o que facilita a fácil correção de elementos construtivos do projeto;
- adequação a diagramas de trajetórias solares de fácil confecção e leitura.

### 3.4.1 PROJEÇÕES DA HEMISFERA UNITÁRIA EM PLANO BIDIMENSIONAL

Definida a esfera unitária como sendo uma esfera cujo raio é igual a um, pode se definir o conceito fator de forma calculado por meio de projeção ortográfica. O fator de forma, na projeção ortográfica pode ser calculado diretamente como sendo a área relativa da projeção - em um plano horizontal ou vertical que passe pelo centro da esfera - da divisão de céu que se deseja analisar (ver figura 3.4).

Para que se possa analisar com mais precisão as frações de céu situadas próximas ao horizonte, que se apresentam achatados quando em projeção ortográfica, transfere-se os valores calculados pela projeção ortográfica para o sistema de projeções estereográficas<sup>2</sup>, uma vez que este sistema de projeção permite uma melhor visualização destas partes de céu para as divisões que representam porções de céu equivalentes em projeção estereográfica, ou seja porções com mesmos incrementos azimutais e de altitude (LYNES, 1968).

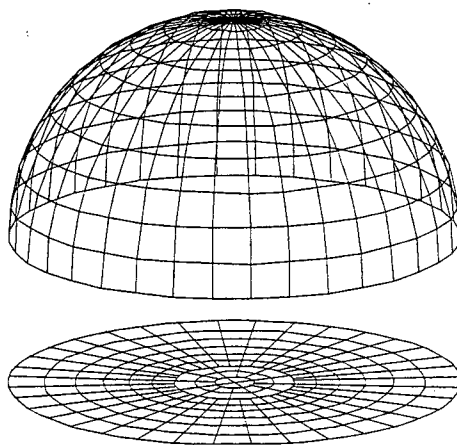


Figura 3.4 - Projeção da abóboda celeste em plano bidimensional

---

<sup>2</sup> Ver Revisão Bibliográfica

### 3.5 DIVISÃO DA ESFERA UNITÁRIA E FATORES DE FORMA DE CADA SUBDIVISÃO

Numa primeira fase, ainda utilizando os mesmos valores calculados por GIRARDIN<sup>3</sup> (1994) para a divisão de céu uniforme, se fez uma nova proposta para divisão da abóboda, em projeção estereográfica (ver figura 3.5) onde círculos concêntricos representam cortes da abóboda em bandas de 10° de variação de altitude a partir do nível do horizonte, e as retas radiais representam linhas azimutais com variação de 10° tomados a partir do centro da circunferência (36 divisões para os 360°). Este novo tipo de divisão se mostrou bastante prático e de fácil utilização tanto para a superposição das máscaras de obstrução como para avaliação, leitura e visualização dos valores obtidos para as aberturas a serem analisadas. Nas altitudes entre 60° e 80°, se reduziu para 12 divisões azimutais em cada banda de altitude, correspondentes a 30° de variação azimutal; a banda de altitude de 80° a 90°, foi dividida em 4 partes com ângulos azimutais de 90° cada. Se adotou tal procedimento simplesmente para facilitar a leitura dos valores situados nestas porções de céu. Desta forma, se tem um total de 244 subdivisões da abóboda celeste, como pode ser visto na figura 3.6.

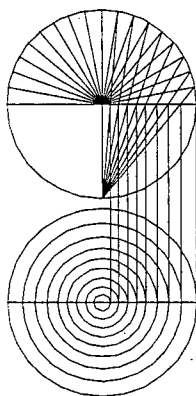


Figura 3.5 - Projeção das bandas de altitude de 10° em forma estereográfica.

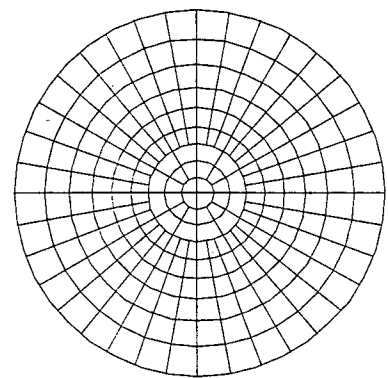


Figura 3.6- Projeção estereográfica de 10° em altitude por 10° de azimute.

Nesta etapa, o procedimento seguido foi o de se tomar os valores calculados por GIRARDIN (1994) que foram somados para cada banda de altitude e redivididas em 36 partes iguais, conforme a nova proposta.

<sup>3</sup> Ver Revisão Bibliográfica

Verificou-se, no entanto, a necessidade de se recalcular os fatores de forma para este tipo de divisão da abóboda uma vez que os círculos concêntricos diferem da forma anterior de projeção utilizada por GIRARDIN (1994) onde as linhas de altitude se estendem para o horizonte. A autora calcula os fatores de forma considerando a influência de duas superfícies paralelas que se estendem ao infinito, em oposição ao que propõe LYNES (1968) ao sugerir que se faça o cálculo direto das áreas da hemisfera celeste rebatidas ortogonalmente em plano bidimensional, usando o conceito de esfera unitária.

Recalculados os valores dos fatores de forma de acordo com a proposta de LYNES (1968), se faz a montagem de gráficos. Nestes gráficos são inseridos os valores calculados pela multiplicação da relação  $L_p/L_z$  pelo valor da contribuição relativa de cada porção de céu para o plano horizontal (fatores de forma), que representam as diversas componentes celestes, então normalizadas para cada porção de céu claro.

Cabe reforçar que os intervalos utilizados para a divisão da hemisfera celeste foram selecionados de forma a se ter incrementos iguais para todas as altitudes e para os ângulos azimutais. Tal procedimento visa facilitar o cálculo dos valores, e a visualização destes no diagrama (ver anexos).

### **Divisão proposta por tregenza**

Optou-se ainda por trabalhar com projeções estereográficas na forma de divisão de céu proposta por TREGENZA, (1993), uma vez que o tipo de subdivisão proposto pelo autor seria o que mais se adequaria a comparações da distribuição de luminâncias feitas com céus reais.

### **Observação**

Um estudo desenvolvido por CESARANO ET AL (1996) procurou verificar o comportamento da sensibilidade na variação de valores de iluminação horizontal difusa em relação ao aumento na discretização<sup>4</sup> da abóboda celeste para diversas distribuições de luminância.

Diferentes tipos de discretização em subdivisões de 6x24, 9x36, 10x40, 12x48, 15x60, 18x72, 21x84, 24x96 e 30x120 nas linhas latitudinais e longitudinais foram testadas com alturas solares variando de 5° a 85°. A razão entre a variação absoluta na iluminação

---

<sup>4</sup> Ver Glossário.

horizontal difusa e a variação nas subdivisões da abóboda foi avaliada para se achar o limite superior a partir do qual o aumento na acuidade do modelo pode ser considerada desprezível.

Seis modelos de distribuição de luminâncias foram avaliados. Para cinco deles (inclusive o modelo de Kittler (in CIE, 1996)), um incremento na discretização da abóboda obtida por 9 anéis paralelos ao horizonte, cada qual subdividido 36 vezes no sentido azimutal, leva a aumentos desprezíveis na precisão do cálculo da iluminância difusa horizontal.

### 3.5.1 CÁLCULO DOS FATORES DE FORMA PARA A ESFERA UNITÁRIA

O cálculo dos fatores de forma<sup>5</sup> para a esfera unitária foram feitos através do cálculo da área de cada um dos círculos concêntricos de projeção da abóboda celeste obtida pelo sistema de projeção ortográfica, para divisões de altitude de 10 em 10° e para divisões de 12 em 12° como mostrado nas figuras 3.7 e 3.8. Após calculada a área dos anéis se fez a subdivisão de cada uma das áreas de acordo com o número de zonas desejado. Os fatores de forma obtidos são mostrado nas tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 - Fatores de forma para incrementos azimutais e de altitude de 10°.

centro da banda (°)	5	15	25	35	45	55	65	75	85
Fator de forma	0,0026	0,0076	0,0116	0,0142	0,0152	0,0142	0,0116	0,0076	0,0026

Tabela 3.3 - Fatores de forma para incrementos de altitude e azimutais como proposto por TREGENZA.

centro da banda (°)	6	18	30	42	54	66	78	90
Fator de Forma	0,0045	0,0128	0,0236	0,0271	0,0345	0,0405	0,0443	0,0343

<sup>5</sup> Ver Glossário.

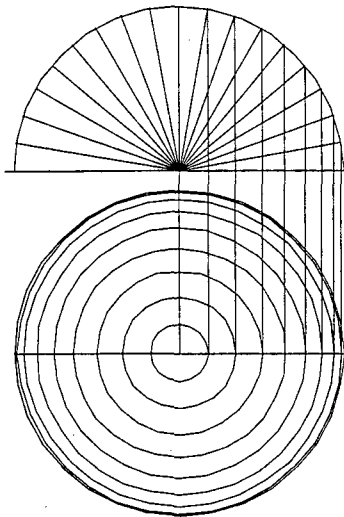


Figura 3.7 - Projeção ortográfica da abóboda celeste com incremento de altitude de  $10^{\circ}$ .

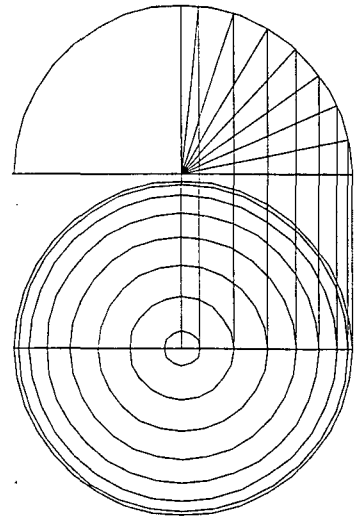


Figura 3.8 - Projeção ortográfica da abóboda celeste com incremento de altitude de  $12^{\circ}$ .

Optou-se por desenvolver os cálculos para dois dos sistemas apresentados acima: o de divisão em ângulos uniformes e o da divisão proposta por TREGENZA (1993). Tal se deve ao fato de se ter verificado que, para se fazer os cálculos manualmente, o primeiro método se mostrou de mais fácil utilização e visualização; o segundo método se mostrou melhor para comparação e implementação a partir de valores medidos.

### 3.6 DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS

A abóbada celeste pode ser considerada como um hemisfério de raio "infinito", tendo no centro, o ponto de estudo considerado. A iluminância devido a esta abóbada, pode ser determinada a partir do conhecimento e da distribuição de luminâncias do céu. Para se determinar esta distribuição, a abóbada celeste deve ser subdividida em zonas, assumindo-se um valor de luminância único para cada zona, como foi mostrado na seção anterior.

#### 3.6.1 DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS PARA CÉU UNIFORME

A distribuição de luminâncias para céu uniforme considera que não há qualquer variação na luminância do céu, a iluminância em qualquer porção do céu é igual para qualquer orientação e altitude solares. Esta condição de céu, que se caracteriza pela uniformidade da luminância em todos os pontos da abóbada celeste, não existe em

condições reais e portanto não será considerada para o cálculo da componente celeste (CC) no presente estudo.

### 3.6.2 DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS PARA CÉU ENCOBERTO

A distribuição de luminâncias para céu encoberto pode ser expressa como a taxa de luminância de um elemento de céu  $L_{E\gamma}$  em relação à luminância do zênite,  $L_{Ez}$  (CIE, 1996; LYNES, 1968):

$$L_{E\gamma}/L_{Ez} = (1 + 2 \cdot \text{sen } \gamma)/3 \quad [\text{Equação 3.6}]$$

onde  $\gamma$  é o ângulo de elevação do elemento de céu acima do horizonte.

Na prática, o padrão de luminância de céu para um dia encoberto é afetado pelo fator de reflexão do solo que pode variar de estação para estação. A equação acima apresenta boas relações quando o chão é escuro (LYNES, 1968). A luminância no zênite ( $\gamma = 90^\circ$ ) é três vezes a luminância no horizonte ( $\gamma = 0^\circ$ ).

Em 1995, a CIE adotou a fórmula para distribuição de luminâncias de céu de Moon e Spencer para o céu encoberto. De acordo com a fórmula de Moon e Spencer a luminância de céu é assumida como simétrica em torno do zênite e muda com a elevação a partir do nível do horizonte. Mais tarde esta fórmula foi generalizada ao se levar em conta características de reflexão do solo. A necessidade desta generalização foi mostrada teoricamente por Fritz e experimentalmente por Peterbridge. Em um estudo, ENARUM e LITTLEFAIR (1995) compararam esta e 6 outras fórmulas para distribuição de luminâncias no BRE (Building Research Establishment). Neste estudo se mediu a iluminância e irradiância globais; iluminância e irradiância difusa horizontal; iluminâncias e irradiâncias verticais (totais) em planos orientados para norte, leste, sul e oeste; iluminância e irradiância direta normal (do sol apenas); iluminância do zênite (usando um *scanner* de luminância de céu); temperatura de bulbo úmido e umidade relativa.

Segundo ENARUM e LITTLEFAIR (1995), dos modelos testados, o céu encoberto da CIE foi o que forneceu os melhores resultados quando comparado contra os dados medidos para céus encobertos. Este modelo superou outras formulações mais novas e mais complexas, em alguns casos, substancialmente.



Cabe ressaltar que os resultados obtidos no estudo de ENARUM e LITTLEFAIR (1995) se limitam ao sul da Inglaterra, que céus encobertos individuais podem variar substancialmente do modelo e que o bom desempenho relativo do céu padrão CIE depende dos critérios utilizados para selecionar a base de dados - neste estudo foram utilizados céus completamente encobertos, onde o disco solar não fosse discernível. A partir desse estudo pôde-se concluir que o modelo de céu da CIE representa talvez um céu extremo e não uma grande variação de céus encobertos encontrados na prática. No entanto, ele parece modelar céus completamente encobertos melhor que outros modelos mais complicados, sendo portanto, este o modelo adotado no presente estudo.

### 3.6.3 DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS PARA CÉU CLARO

Os valores da relação de luminância entre o ponto e o zênite para céu claro, segundo as relações propostas por KITTLER (apud CIE, 1996), irão possibilitar a montagem de gráficos (no caso, projeções estereográficas) que mostrem a distribuição relativa das luminâncias deste modelo de céu, para determinada altura solar escolhida. Isto se obtém pelo valor da componente celeste para céu uniforme (correspondente ao fator de forma) da porção de céu considerada para determinada subdivisão de céu, multiplicado pelo valor obtido de  $L_p/L_z$  para o ponto situado no centro da parcela correspondente da abóboda. Os pontos escolhidos para o cálculo da relação  $L_p/L_z$  são tomados de forma a que se tenha um ponto localizado no centro de cada subdivisão de céu considerada.

Lembra-se que neste tipo de distribuição, uma vez que a iluminação direta do sol em um dia de céu claro excede em muito a iluminação do resto do céu, o sol é ignorado (LYNES, 1968).

#### 3.6.3.1 Relação de Luminâncias Entre Um Ponto e o Zênite

A metodologia de cálculo adotada neste trabalho se baseia no uso de relações de geometria solar para a determinação do ângulo entre o sol e um determinado ponto P, localizado a certa altura e azimute na abóboda celeste; a partir do qual se faz a determinação do fator de luminância deste ponto (razão entre a luminância do zênite e determinado ponto P localizado na abóboda celeste), levando-se em conta um fator de turvamento para cidades

onde há presença de poluição. São gerados dados de pontos para uma hemisfera, tomada a partir do azimute do sol, que fornecerá a distribuição de luminâncias para pontos em intervalos tomados a cada  $10^\circ$  (ou  $12^\circ$ ) de diferença azimutal e  $10^\circ$  (ou  $12^\circ$ ) de diferença de altitude. O ponto é tomado no centro de cada banda considerada. Por exemplo, na banda que vai de  $0^\circ < \alpha < 10^\circ$  e  $0^\circ < \gamma < 10^\circ$ , o ponto considerado para o cálculo da relação  $L_p/L_z$  se localiza a  $\alpha = 5^\circ$  e  $\gamma = 5^\circ$ ; em uma banda que vá de  $0^\circ < \alpha < 12^\circ$  e  $0^\circ < \gamma < 12^\circ$ , o ponto considerado para o cálculo da relação  $L_p/L_z$  se localiza a  $\alpha = 6^\circ$  e  $\gamma = 6^\circ$ .

### 3.6.3.2 Céu Claro Padrão CIE

Os padrões produzidos pela CIE (1996) são documentos concisos sobre aspectos da luz e da iluminação que requerem uma definição única. Eles são uma fonte primária de dados internacionalmente aceitos que podem ser levados, praticamente sem alteração, a sistemas de padronização internacional. As definições apresentadas a seguir representam as condições recomendadas padronizadas de iluminação externa, que podem ser usadas em cálculos, em modelagens e para o projeto e avaliação de iluminação natural interior.

O céu claro padrão CIE (1996) representa condições sem nuvens. A luminância do céu depende tanto do ângulo de elevação quanto da posição do sol e é simétrico em torno do meridiano solar. A luminância de um céu sem nuvens é afetada pela poluição e por outras fontes de partículas atmosféricas. Neste trabalho se utiliza um fator de Turvamento Linke de aproximadamente 5,5, como proposto por GUSEV (CIE, 1996).

As luminâncias e iluminâncias internas produzidas por um céu sem nuvens podem ser calculadas quando a luminância zenital absoluta e a iluminância solar direta são conhecidas. Em um céu sem nuvens, as condições de iluminação podem ser estáveis, a distribuição da luz variando apenas com a posição do sol. Os valores internos permitem se acessar efeitos psicológicos do ambiente iluminado naturalmente. Também permitem se fazer estimativas de ofuscamento e economia de energia (CIE, 1996).

Serão mostradas então as formulações matemáticas que descrevem as relações citadas acima.

### 3.6.3.3 Ângulo entre o Sol e o Centro do Elemento de Céu

Para uma compreensão adequada das equações da luminância do céu, precisa-se conhecer os ângulos de posição do sol e de posição do ponto P (centro da zona), definidos pelos ângulos de altitude da zona ( $\gamma_p$ ) e diferença azimutal ( $\alpha_s - \alpha_p$ ) entre o sol e o ponto P (PEREIRA, 1996).

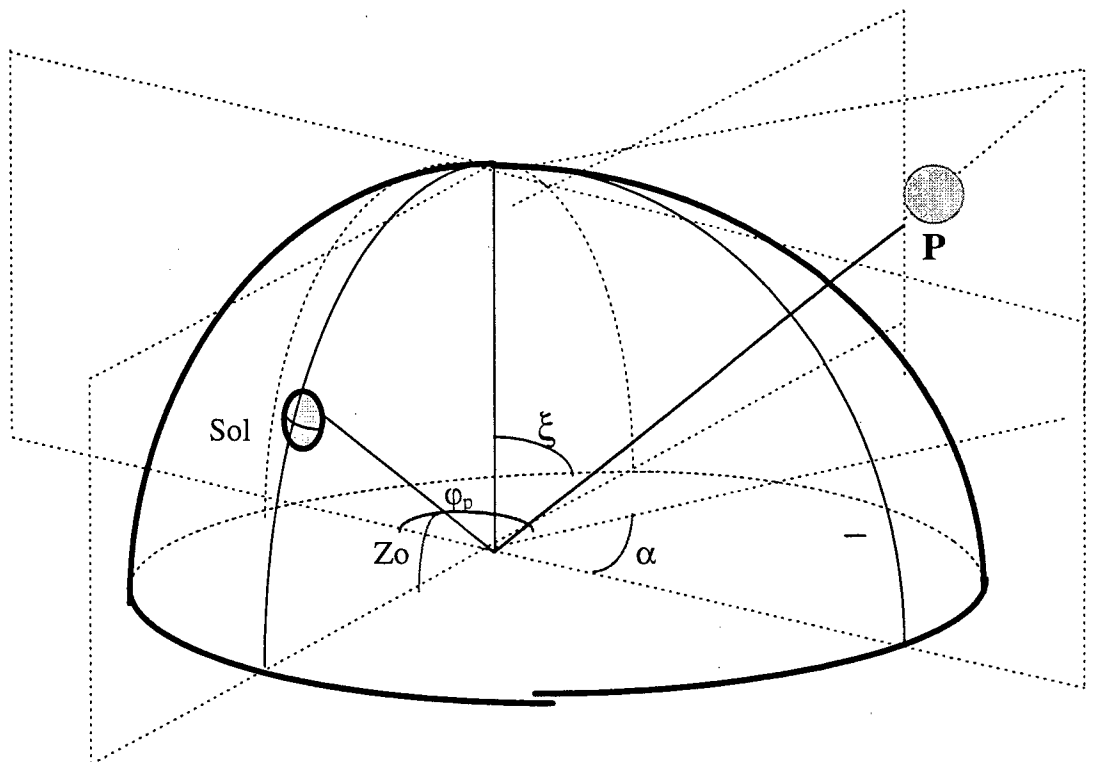


Figura 3.9 - Desenho esquemático dos ângulos utilizados para determinação do ângulo formado entre o sol e determinado ponto situado na abóbada celeste.

Segundo Kittler et al o ângulo entre o sol e determinado ponto localizado na abóbada celeste,  $\varphi_p$ , se dá por:

$$\varphi_p = \text{ArcCos} [\text{Cos } \gamma_s \cdot \text{Cos } \xi + \text{Cos } \gamma_s \cdot \text{Sen } \xi \cdot \text{Cos } \alpha] \quad [\text{Equação 3.7}]$$

onde:

$\gamma_s$   $\Rightarrow$  altitude solar - de  $5^\circ$  até  $90^\circ$  (com variação a cada  $10^\circ$ );

$\xi$   $\Rightarrow$  ângulo zenital do ponto "P";

$\alpha$   $\Rightarrow$  ângulo de azimute do ponto "P" contado do eixo de referência Norte;

$\varphi_p$   $\Rightarrow$  ângulo compreendido entre o sol e o ponto "P", na posição do ponto em " $\alpha$ " (rotação em sentido horário) e com altitude solar de " $Z_0$ ".

### 3.6.3.4 Determinação do Fator de Luminâncias

Cálculo da relação de luminância para determinada porção de céu representada por um ponto “P”, e o zênite ( $L_p/L_z$ ) de acordo com recomendações da CIE (CIE, 1996) para céu em centros urbanos:

$$\frac{L_p}{L_z} = \frac{[1 - \exp\{-0,32/\cos \xi\}] * \{0,856 + 16 \cdot \exp(-3 \cdot \varphi_p / rad) + 0,3 \cdot \cos^2 \varphi_p\}}{0,27385 * [0,856 + 16 \cdot \exp\{-3 \cdot (\pi/2 - \gamma_s / rad)\} + 0,3 \cdot \cos^2 (\pi/2 - \gamma_s / rad)]}$$

[Equação 3.8]

onde:

$\xi \Rightarrow$  ângulo zenital do ponto “P” [ rad. ]

$\varphi_p \Rightarrow$  ângulo compreendido entre o sol e o ponto “P” [ rad. ]

A equação acima foi adotada pela CIE desde 1968 (LYNES, 1968) como uma assumida definição de uma distribuição padrão de céu claro na qual podem se basear técnicas de predição de iluminação.

Optou-se por considerar um fator de turvamento de  $T_{il} = 5,5$  para atmosfera poluída proposto por GUSEV (apud CIE, 1996) em função da relativa difusão, para áreas localizadas dentro da cidade, influenciando diretamente a claridade do tipo de céu, conforme recomendação feita pela CIE (1996). No caso de um ar completamente puro o fator de turvamento seria igual a 1 (TREGENZA, 1993).

### 3.6.4 CONSTRUÇÃO DE MÁSCARAS DE OBSTRUÇÃO

Usando o formato de projeção plana, é possível construir um diagrama que define que porção do céu é mascarada pelas obstruções externas circundantes bem como que porção pode ser “vista” de determinado ponto interno da edificação. Pela máscara de sombra podemos saber que parte da abóboda celeste está obstruída, em função das várias barreiras existentes e a partir de um ponto dado (OLGYAY, 1963; MOORE, 1991; BITTENCOURT, 1988, FROTA, 1995).

Para a construção da máscara de um determinado ponto, devemos obter os ângulos verticais e horizontais de obstrução. Imagine uma série de barras horizontais paralelas vistas de um ponto de referência no solo. Se estas barras fossem projetadas como linhas no hemisfério celeste, elas iriam formar um padrão como as linhas dos gomos de uma laranja, convergindo para um ponto no horizonte na direção das barras. Se projetarmos esse padrão em um plano, teríamos linhas curvas convergentes, exceto pela linha central que seria uma reta (MOORE, 1991).

O diagrama apresentado na figura 3.10 representa um gráfico que pode ser usado para construir uma máscara de sombras. No exemplo abaixo mostramos exemplos de máscaras construídas para mostrar o sombreamento causado pela combinação de uma placa vertical com duas placas verticais (figura 3.11). Mais detalhes sobre a construção de máscaras de obstrução podem ser encontrados na literatura (MOORE, 1991; BITTENCOURT, 1988).

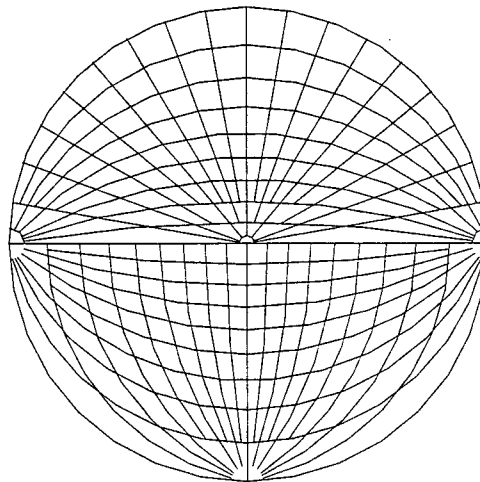


Figura 3.10 - Diagrama usado para construção de máscaras de obstrução

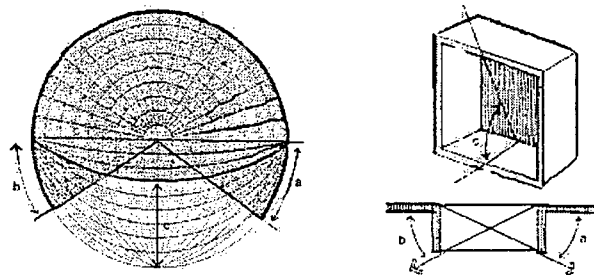


Figura 3.11 - Máscara de obstrução para combinação de placas horizontais e verticais externas a uma janela (Fonte: MOORE, 1991).

### 3.7 CÁLCULO DA COMPONENTE CELESTE - CC

Através da relação de luminâncias apresentada acima, faz-se o cálculo dos valores relativos aos centros das porções de céu nas quais se divide a abóboda celeste. A tabela 3.4 a seguir apresenta, os valores de distribuição de luminâncias calculados para metade da hemisfera (nao é necessário o cálculo para 360° uma vez que os valores são simétricos em relação ao azimute do sol), para a altitude solar de 30°, como exemplo.

Tabela 3.4 Valores da relação  $L_p/L_z$  - distribuição de luminâncias para a altitude solar de 30° e turvamento de 5,5 (divisão de 10° x 10°).

		$\xi$								
		85	75	65	55	45	35	25	15	5
$L_p/L_z$	5	11,68	13,05	14,85	12,04	6,75	3,91	2,41	1,60	1,15
	15	10,18	10,58	10,45	8,66	5,75	3,60	2,31	1,57	1,14
	25	8,13	7,82	7,16	6,04	4,50	3,12	2,14	1,51	1,13
	35	6,27	5,68	4,99	4,28	3,44	2,61	1,93	1,44	1,12
	45	4,83	4,19	3,59	3,11	2,63	2,15	1,71	1,36	1,10
	55	3,80	3,18	2,68	2,34	2,05	1,78	1,51	1,27	1,08
	65	3,10	2,52	2,09	1,83	1,64	1,48	1,33	1,19	1,06
	75	2,63	2,09	1,70	1,49	1,36	1,26	1,18	1,11	1,03
	85	2,34	1,81	1,45	1,26	1,16	1,10	1,06	1,03	1,01
	95	2,17	1,64	1,29	1,11	1,02	0,97	0,96	0,97	0,99
	105	2,08	1,55	1,20	1,02	0,92	0,89	0,89	0,92	0,97
	115	2,06	1,51	1,15	0,96	0,86	0,82	0,83	0,87	0,95
	125	2,09	1,50	1,13	0,92	0,82	0,78	0,79	0,84	0,93
	135	2,14	1,52	1,13	0,91	0,80	0,75	0,75	0,81	0,92
	145	2,20	1,55	1,13	0,91	0,78	0,73	0,73	0,79	0,91
	155	2,26	1,59	1,15	0,91	0,78	0,72	0,71	0,77	0,90
	165	2,31	1,61	1,16	0,91	0,77	0,71	0,70	0,76	0,89
175	2,33	1,63	1,17	0,91	0,77	0,71	0,70	0,76	0,89	

Após calculados, os valores da relação  $L_p/L_z$ , estes são multiplicados pelos fatores de forma apresentados anteriormente, de acordo com a divisão da abóboda celeste que se queira adotar. Estes valores são multiplicados por um fator multiplicativo de forma que as tabelas geradas possuam um valor total igual a 5.000 lux e são relativos à metade da hemisfera celeste, como pode ser visto na tabela 3.5 a seguir:

Tabela 3.5 - Valores da contribuição relativa de luz para cada porção de céu considerada para altitude solar de 30° (divisão em 10° x 10°).

		$\xi$									
		$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz x Fator de Forma	5		44	141	247	245	146	80	40	17	4
	15		38	115	173	176	125	73	38	17	4
	25		31	85	119	123	98	63	36	16	4
	35		24	62	83	87	74	53	32	16	4
	45		18	45	60	63	57	44	28	15	4
	55		14	34	45	48	44	36	25	14	4
	65		12	27	35	37	36	30	22	13	4
	75		10	23	28	30	29	26	20	12	4
	85		9	20	24	26	25	22	18	11	4
	95		8	18	21	23	22	20	16	11	4
	105		8	17	20	21	20	18	15	10	4
	115		8	16	19	19	19	17	14	9	4
	125		8	16	19	19	18	16	13	9	4
	135		8	17	19	19	17	15	13	9	3
	145		8	17	19	18	17	15	12	9	3
	155		9	17	19	18	17	15	12	8	3
165		9	17	19	19	17	14	12	8	3	
175		9	18	19	19	17	14	12	8	3	
										soma =	5000

Os valores gerados pela tabela acima são transpostos para diagramas de contribuição relativa de luz (DCRL) como pode ser visto na figura 3.12. A somatória dos valores do diagrama é sempre 10.000. Cada 100 unidades representam 1% da iluminação total obtida sobre um plano horizontal desobstruído.

Estes diagramas são utilizados para o cálculo da componente celeste CC através da superposição de máscaras de obstrução, construídas para o ponto interno em plano horizontal que se deseja analisar.

Para a obtenção de CC em lux, faz-se a multiplicação do valor obtido pelo valor a iluminância horizontal externa  $E_p$ , obtida por medições ou pelo uso de modelos preditivos.

$$CC_{lux} = CC \cdot E_p$$

[Equação 3.9]

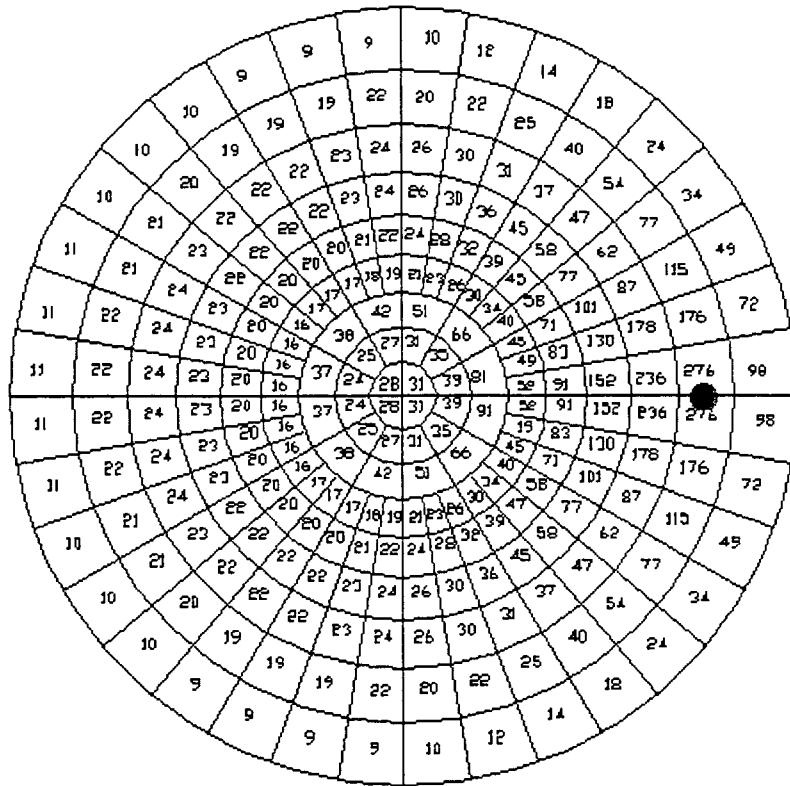


Figura 3.12 - DCRL para céu claro para altitude solar de 15°.

### 3.8 COMPARAÇÃO COM *PEPPER POT*

De forma a se fazer uma verificação de como se dá a distribuição de luminâncias obtida em cada um dos métodos em relação à posição do sol realizou-se uma comparação do método de distribuição de luminâncias para céu claro proposto com o método *Pepper Pot* de MOORE (1991). Para esta comparação, tomou-se a porcentagem de luminâncias regiões de céu de 45° de azimute a partir da posição do sol, de 0° a 180° (ou seja, dividindo-se o semicírculo em 4 fatias iguais), uma vez que a distribuição é simétrica em relação ao sol. Se fez a somatória dos valores de cada porção de céu considerada de 0° a 90° de altitude solar por cada um dos métodos.

A seguir se apresentam as tabelas 3.6 e 3.7 com os valores obtidos para cada um dos métodos nas altitudes solares de 15° a 90°.



Tabela 3.6 - Somatório das luminâncias relativas de quadrantes de 45° de área tomados a partir do sol para o método DCRL.

Altitude Solar	Azimute a partir do Sol			
	0°-45°	45°-90°	90°-135°	135°-180°
15°	28,0	9,6	6,2	6,2
30°	29,0	9,9	5,8	5,3
45°	27,8	10,8	6,2	5,2
60°	24,4	12,3	7,4	6,0
75°	19,0	13,3	9,6	8,1
90°	12,5	12,5	12,5	12,5

Tabela 3.7 - Somatório das luminâncias percentuais de quadrantes de 45° de área tomados a partir do sol para o método Pepper Pot.

Altitude Solar	Azimute a partir do Sol			
	0°-45°	45°-90°	90°-135°	135°-180°
15°	23,5	10,8	7,0	8,7
30°	24,4	11,4	7,2	7,0
45°	25,0	12,0	7,0	6,0
60°	22,2	13,0	7,7	7,1
75°	18,0	13,3	10,4	8,3
90°	12,5	12,5	12,5	12,5

A partir das tabelas mostradas acima foram gerados gráficos apresentados nos gráficos 3.1 e 3.2 para melhor visualizar o efeito da distribuição de luminâncias em cada um dos métodos.

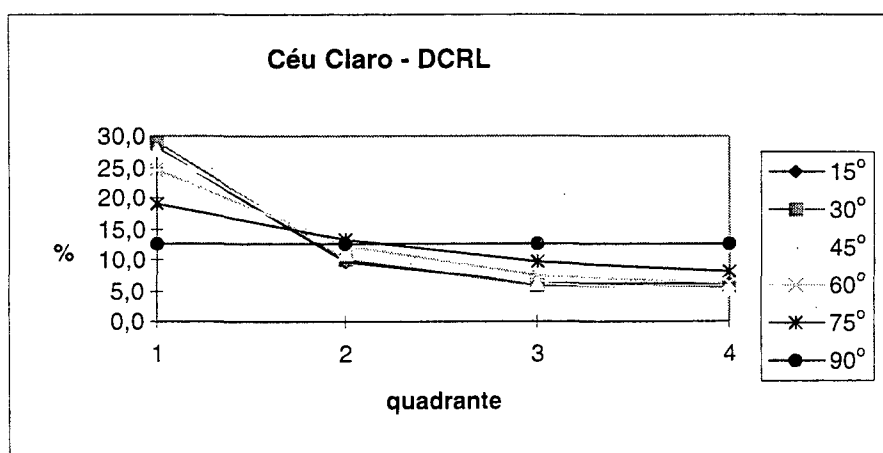


Gráfico 3.1 - Distribuição relativa de luminâncias para céu claro por octantes de céu, de acordo com o método proposto.

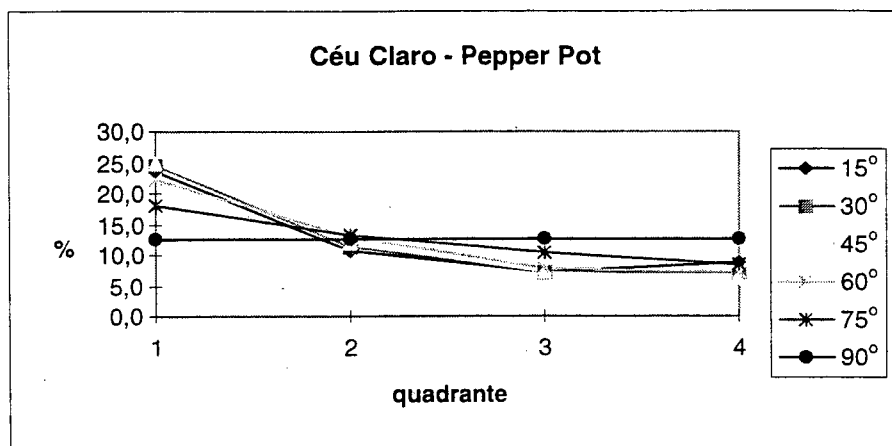


Gráfico 3.2 - Distribuição de luminâncias para céu claro por octantes de céu, de acordo com o método *Pepper Pot*.

Procedendo-se à análise dos valores obtidos acima verifica-se que o método DCRL apresenta maiores luminâncias nos quadrantes próximos ao sol em comparação aos obtido pelo método *Pepper Pot*. Isto faz com que o método DCRL possua uma distribuição relativa de luminâncias com gradientes mais diferenciados do que os apresentados pelo método *Pepper Pot*. Tal fato pode se dever à utilização de diferentes fatores de turvamento de um método para o outro.

Observando-se os gráficos apresentados nos gráficos 3.1 e 3.2, pode-se notar também que, em relação aos métodos que levam em conta céu encoberto ou uniforme, os métodos de cálculo de luminâncias para céu claro permitem visualizar uma nítida diferenciação nos níveis de luminância de cada porção de céu, o que se caracteriza como de extrema importância quando da avaliação da orientação das aberturas em projetos.

### 3.9 CÁLCULO DA COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA CRE

#### 3.9.1 CÉU ENCOBERTO

Para céu encoberto, caso as luminâncias das obstruções vistas do ponto em estudo tenham a mesma luminância que o céu, se pode fazer sua projeção estereográfica e colocá-la sobre a tabela correspondente, lendo assim seu valor. Mas a luminância das obstruções é geralmente menor que a do céu por vir somente da luz refletida, portanto se cria um

coeficiente  $n$ , pelo qual se multiplica o valor encontrado.  $n$  é, em geral, tido como 0,10 para uma obstrução cuja refletância considera-se de 0,2 e que enxerga 50% da hemisfera celeste. ( $n = \text{luminância da obstrução} / \text{luminância do céu}$ ) ( $n = 0,2 * 0,5 = 0,1$ ).

### 3.9.2 CÉU CLARO

Para o cálculo da componente refletida externa, em presença de céu claro, serão adotados dois procedimentos; o primeiro para superfícies externas não iluminadas diretamente pelo sol e o segundo para superfícies que recebam iluminação solar direta.

#### 3.9.2.1 Obstrução não Iluminada pelo Sol

Quando uma parcela do céu é obstruída por uma edificação não iluminada diretamente pelo sol, considera-se que a porção de céu obstruída pela superfície externa possuirá uma luminosidade menor que a porção de céu equivalente que seria vista da imagem  $P_i$  do ponto  $P$ . A porção de céu vista por reflexão pelo ponto  $P$  de acordo com o procedimento proposto por SORTERAS (1985), é então considerada como sendo a que se veria a sua imagem  $P_i$  através da superfície refletora  $S$ , como mostrado na figura 3.13.

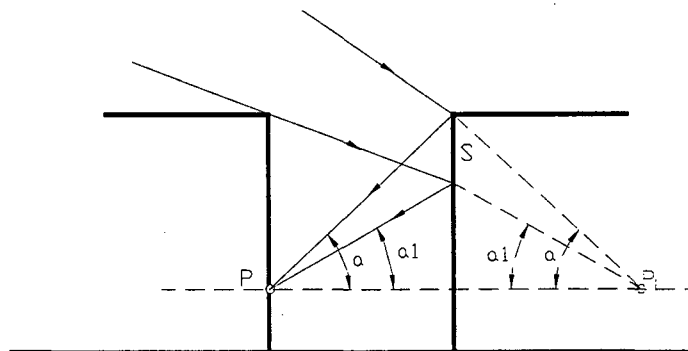


Figura 3.13 - Porção de céu "vista" através de uma superfície refletora.

Para simplificação do modelo, neste caso se fará a multiplicação dos valores da parcela obstruída pelo coeficiente de reflexão da superfície obstrutiva.

$$CRE = CC_{\text{vista por reflexão}} * \rho \quad [\text{Equação 3.10}]$$

onde:

$\rho$  - coeficiente de reflexão da superfície vista da abertura

### 3.9.2.2 Obstrução Iluminada pelo Sol

Neste ítem será feita uma proposta para o cálculo da CRE para inclusão na metodologia. Cabe salientar que esta contribuição não é calculada em valor percentual e sim em valor absoluto em iluminância, uma vez que seu cálculo depende da iluminância produzida pelo sol e não apenas da abóboda celeste. Seu valor deve ser somado ao valor final calculado da contribuição de iluminação relativa.

Quando a superfície oposta à abertura iluminante for iluminada diretamente pelo sol, se considera que a porção de céu obstruída estará mais clara que a porção de céu que ela obstrui. Aqui portanto, introduz-se o cálculo da iluminação direta do sol no plano vertical da obstrução. A metodologia proposta é de se rebater a obstrução na hemisfera celeste de forma a se trabalhar com os fatores de forma já calculados da componente celeste.

Segundo TREGENZA (1993), a iluminância solar em uma superfície é derivada da iluminância extraterrestre, calculando-se a atenuação na atmosfera e o ângulo de incidência. Quando o sol brilha na fachada da janela  $\cos\beta > 0$  - sendo  $\beta$ , o ângulo de incidência - e a iluminância em um plano vertical pode ser determinada pela seguinte equação:

$$E_{sv} = E_{sn} * \cos\beta \quad \text{[Equação 3.11]}$$

onde:

$E_{sv}$  - iluminância devido ao sol em um plano vertical, em klx

$$E_{sn} = 127.500 \exp[-0,21/\text{sen } \gamma_s] \text{ [lux]} \quad \text{[Equação 3.12]}$$

$E_{sn}$  - iluminância devido ao sol, perpendicular ao plano de incidência, em klx.

$\beta$  - ângulo de incidência, distância angular entre a normal à elevação e o raio do sol, dado por:

$$\beta = \text{arc cos} [\cos\gamma_s \cdot \cos\alpha_z] \quad \text{[Equação 3.13]}$$

onde:

$\alpha_z$  = ângulo azimutal entre o sol e a normal à elevação

$$\alpha_z = \alpha_s - \alpha_e \quad \text{[Equação 3.14]}$$

onde:

$\alpha_e$  = azimute da elevação (fachada)

Quando  $\beta < 0$ , fachadas opostas paralelas à janela, desobstruídas em relação ao sol irão fornecer uma iluminância  $E_{vs}'$ , de:

$$E_{sv} = - E_{sn} \cdot \cos\beta \quad [\text{Equação 3.15}]$$

Como o método gráfico proposto introduz o conceito de fator de forma projetado em uma esfera unitária para o cálculo da área da superfície iluminada, sugere-se que o cálculo da CRE seja feita seguindo o mesmo procedimento. O cálculo da área de contribuição de cada superfície externa é achado fazendo-se a sua projeção estereográfica na hemisfera unitária (figura 3.14) em relação ao ponto a ser estudado. A partir da máscara criada se faz o cálculo dos fatores de forma relativos da superfície externa.

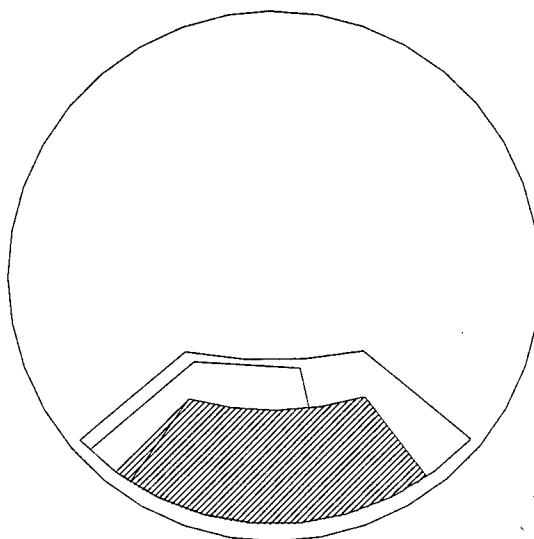


Figura 3.14 - Projeção de obstrução externa na hemisfera unitária vista através de uma abertura (Fonte: SOTERAS, 1985)

O cálculo do fator de forma correspondente à área projetada das obstruções externa é feita pela superposição da máscara encontrada sobre o diagrama de fatores de forma para a abóboda celeste que pode ser visto na figura 3.15. Neste diagrama cada 100 unidades correspondem a 1% da área total da hemisfera celeste.

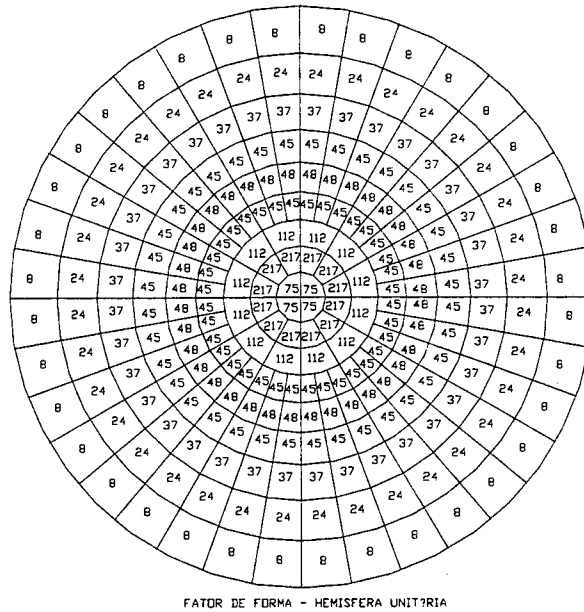


Figura 3.15 - Diagrama com fatores de forma para a hemisfera unitária.  
 (Cada 100 unidades representam 1% da área da hemisfera unitária)

Calculado o valor da iluminância na superfície oposta à abertura, o cálculo da CRE se faz pela multiplicação desta pelo fator de forma correspondente à superfície da abóboda obstruída pela edificação,  $A_{pe}$ , e pelo coeficiente de reflexão,  $\rho$ , da superfície externa para que se obtenha a contribuição relativa dessa luminância na contribuição total da iluminação natural no ponto.

$$CRE_{abs} = \frac{E_{sv} \cdot A_{pe} \cdot \rho}{\pi} \quad \text{[Equação 3.16]}$$

onde:

$CRE_{abs}$  - valor absoluto da componente refletida externa em lumen/m<sup>2</sup>

$A_{pe}$  - área projetada na abóboda de uma superfície externa a partir do ponto de observação calculada pelo uso do diagram de fatores de forma.

$\rho$  - coeficiente de reflexão da superfície externa

### 3.10 CÁLCULO DA COMPONENTE REFLETIDA INTERNA - CRI

A componente refletida interna irá contribuir para a iluminância total que chega ao ponto interno e seus valores dependem da quantidade de luz que entra no ambiente através da abertura (a qual por sua vez depende do céu e das obstruções externas)' (GIRARDIN, 1993).

Devido á sua origem, a CRI não apresenta gradientes espaciais tão importantes quanto a CRE ou a CC, embora também vá diminuindo à medida em que se distancia da abertura iluminante.

Sugere-se aqui que o cálculo da CRI seja feito seguindo o mesmo procedimento adotado para o cálculo da CRE. O cálculo da área de contribuição de cada superfície leva em conta o fator de forma de cada uma das superfícies internas em relação ao ponto P. O fator de forma é calculado pela superposição da superfície projetada sobre o diagrama de fatores de forma apresentado na figura 3.15. A figura 3.16 mostra a projeção das superfícies internas de um ambiente sobre a hemisfera unitária.

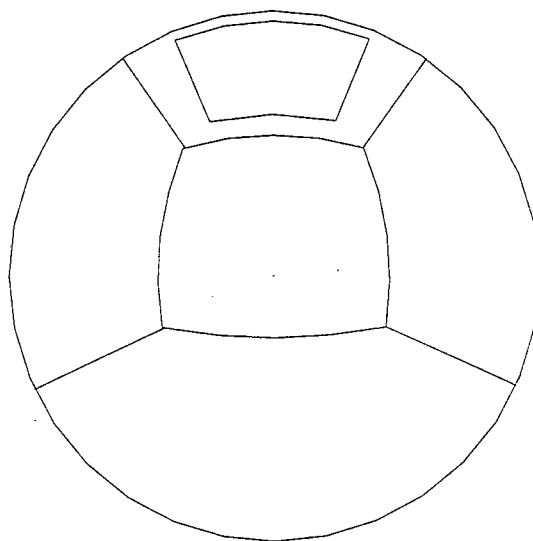


Figura 3.16 - Projeção estereográfica das superfícies internas de um ambiente.

(Neste caso, em relação ao ponto P3, do ambiente de estudo<sup>6</sup>).

<sup>6</sup> Ver Capítulo 4 - Estudo de caso - figura 4.5

O valor encontrado da área projetada,  $A_p$ , de cada uma das superfícies é multiplicado pela refletância média desta superfície,  $\rho_m$ , obtendo-se assim o valor percentual da contribuição da CRI em relação à localização do ponto. Assume-se aqui, para fins de simplificação do modelo, que toda a luz que penetra através da abertura (CC) é uniformemente distribuída (e refletida) pelas superfícies internas, acima do plano em que se localiza o ponto em estudo. Tem-se então que a CRI pode ser calculada por:

$$CRI = \sum_{n=i}^{n=l} A_{pi} \cdot \rho_{mi} \cdot CC \quad [\text{Equação 3.17}]$$

onde:

$n$  - número de superfícies

$A_{pi}$  - área projetada de cada superfície

$\rho_{mi}$  - refletância média de cada superfície interna

Tem-se que a medida que se afasta da superfície que contém a abertura de iluminação essa componente tende a aumentar em valores percentuais. No entanto, como a iluminância total depende do valor de luz que chega ao ponto, seu valor absoluto será menor quanto mais afastado estiver o ponto.

### 3.11 CÁLCULO DA CONTRIBUIÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL - CIN

Para a obtenção da contribuição total de iluminação natural em determinado ponto, se faz a soma dos valores calculados acima, multiplicados pelo fator de correção,  $m$ . O valor de correção é obtido pela multiplicação dos valores de correção para manutenção ( $M$ ), fator do vidro ( $G$ ) e fator de emoldramento ( $B$ ), obtidos em tabelas como as fornecidas pela BRE (SZOKOLAY, 1980).

$$m = M \cdot G \cdot B \quad [\text{Equação 2.18}]$$

$$CIN = (CC + CRE + CRI) \cdot m \quad [\text{Equação 3.19}]$$



## **4. ESTUDO DE CASO**

Neste capítulo se desenvolve um modelo de ambiente para a avaliação do método proposto no capítulo anterior. Este modelo é utilizado para a obtenção de valores teóricos e experimentais.

O capítulo então apresenta-se dividido em quatro etapas: na primeira se faz a descrição do ambiente utilizado como estudo de caso; na segunda se desenvolve a parte teórica onde a forma de aplicação do método é detalhada e se obtém valores calculados para o ambiente em estudo. Na terceira etapa se faz a apresentação da parte experimental desta pesquisa onde se utiliza um modelo em escala reduzida para verificação de níveis internos de iluminação obtidos nos pontos determinados no modelo. E finalmente, na quarta etapa os valores obtidos na fase teórica e na fase experimental são comparados afim de se verificar a aplicabilidade do modelo proposto.

### **4.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO**

Se propõe para efeito de análise, um ambiente com janela em apenas um dos lados da peça dividido em três áreas de iluminação das quais se avaliará a iluminância [ $\text{lux}/\text{m}^2$ ] no nível do plano de trabalho. Os pontos foram escolhidos de forma a estabelecer variações da entrada da luz de céu no ambiente à medida que se afasta da abertura de iluminação.

Na figura 4.1 pode-se visualizar a sala tipo que serve de base para a obtenção de valores medidos com respectivos ângulos de sombreamento calculados para cada um dos pontos de medição.

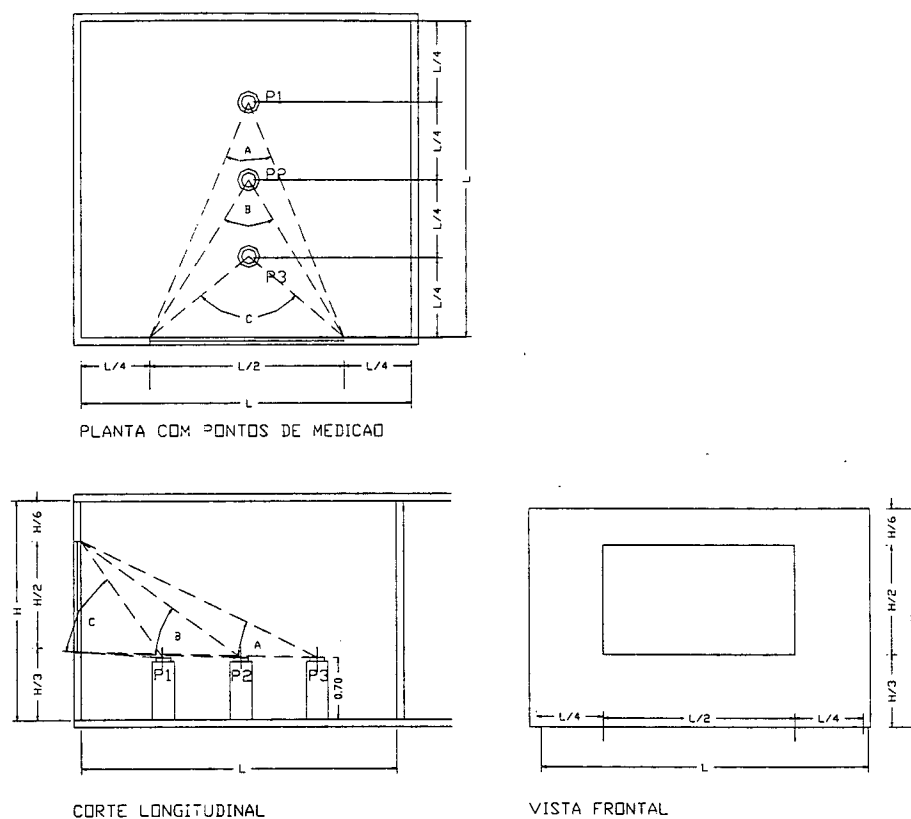


Figura 4.1 - Planta esquemática do ambiente mostrando a disposição dos três pontos de medição internos com respectivos ângulos de visão da abertura (desenho sem escala).

O modelo possui uma abertura com uma janela central de tamanho médio de aproximadamente  $1/3$  da área da parede onde se localiza. Os três pontos de medição foram definidos para verificar como se dá a entrada de luz em profundidade no ambiente. O estudo de caso é proposto para um ambiente totalmente negro - onde a CRI, componente refletida interna seria nula - e para um ambiente branco - onde a CRI seria máxima - de forma a permitir a avaliação do efeito da reflexão das superfícies no nível final de iluminação geral do ambiente, especialmente nos pontos mais afastados da abertura de iluminação. Considera-se a abertura livre de obstruções externas e com reflexão vinda do solo nula.

Como o objetivo deste capítulo é obter dados teóricos que se possa comparar com os dados experimentais, se tomam as medidas encontradas no modelo em escala (ver item 4.3 - avaliação experimental) para a execução das máscaras de sombreamento e projeção das superfícies na hemisfera unitária. As medidas encontradas são apresentadas a seguir na figura 4.2.

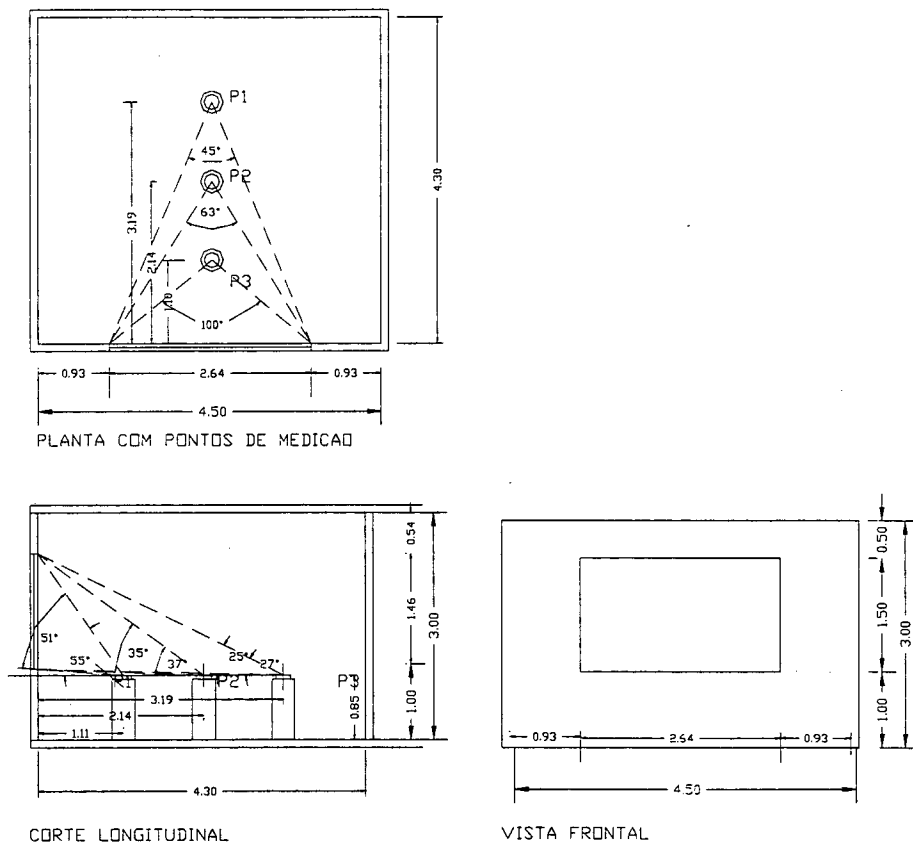


Figura 4.2 - Planta do ambiente com as medidas obtidas no modelo em escala (desenho sem escala).

## 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Para se fazer a determinação da quantidade de luz incidente em um ambiente através de uma abertura, usa-se uma carta de trajetórias solares aparentes, um diagrama de obstrução e as tabelas de distribuição de luminâncias, que devem estar em mesma escala, utilizando o mesmo sistema de projeção.

### 4.2.1 CÁLCULO DA COMPONENTE CELESTE - CC

A seguir se apresentam os passos a serem seguidos para o cálculo da CC a partir do uso dos DCRL a ser seguido tanto para céu encoberto (não levar em conta os itens relativos à orientação) quanto para céu claro:

- Determina-se um ponto no interior do ambiente que se queira estudar;
- verifica-se a orientação para a qual está voltada a janela a ser estudada;

☞ determina-se a máscara de obstrução:

- determina-se os ângulos formados entre a abertura e o ponto interior através de plantas baixas e seções longitudinais do ambiente em estudo. Os ângulos obtidos são transpostos para a máscara de obstrução. As obstruções externas devem ser marcadas seguindo o mesmo procedimento para levantamento dos ângulos de obstrução obtendo-se desta forma a fração visível da abóboda celeste;

☞ escolhe-se o dia (ou época) do ano e horários a se estudar;

☞ determina-se o azimute e altitude solar com o auxílio da carta de trajetórias solares;

☞ de posse da altitude solar, seleciona-se o DCRL mais adequado ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ou  $90^\circ$ );

- para altitudes inferiores a  $15^\circ$  é assumido este valor, já que os valores intermediários de  $0^\circ$  a  $15^\circ$  tornam-se muito próximos ou insignificantes;
- no caso de altitudes intermediárias, acima de  $15^\circ$ , quando a variação for superior a  $7,5^\circ$ , toma-se a altitude de maior valor, caso seja menor ou igual a  $7,5^\circ$ , utiliza-se o diagrama de menor valor;

☞ no DCRL marca-se o Norte a partir do azimute encontrado em sentido anti-horário como mostra a figura 4.3. Deve-se observar aqui que um azimute positivo é marcado em sentido anti-horário no diagrama, uma vez que este fornece, não o Norte, mas a posição do sol;

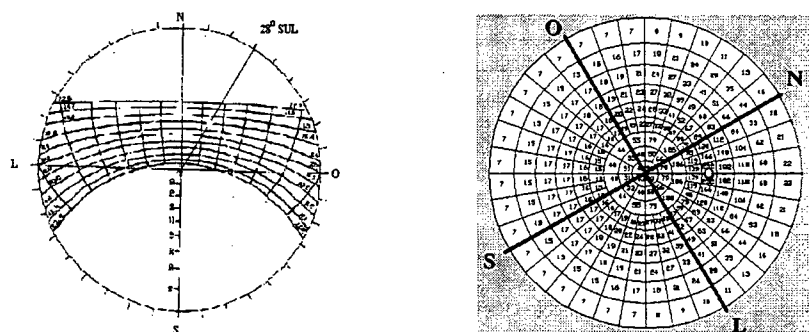


Figura 4.3 - Localização do azimute do sol no DCRL.

☞ sobrepõe-se a máscara construída sobre o DCRL de forma que a abertura fique orientada adequadamente a partir do Norte já marcado como mostra a figura 4.4;

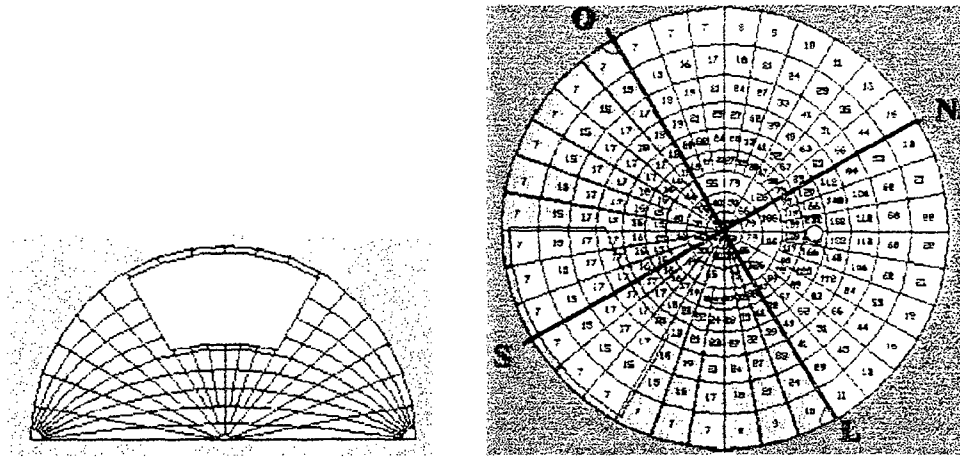
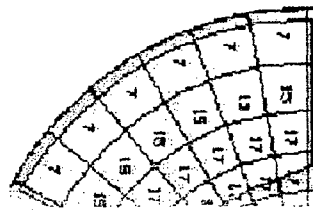


Figura 4.4 - Superposição da máscara de obstrução sobre o DCRL.

- ☉ procede-se à soma dos valores internos à máscara de obstrução - as subdivisões do diagrama que forem cortadas pelas linhas das máscaras serão consideradas proporcionalmente à divisão como pode ser visto na figura 4.5.



Na figura 4.6 podem se visualizar as máscaras de sombreamento construídas para cada um dos pontos de acordo com os ângulos obtidos na figura 4.2. Cabe ressaltar que a figura 4.2 é baseada em valores medidos depois de situadas as fotocélulas no modelo em escala reduzida. Tais máscaras em projeção estereográfica foram elaboradas segundo o procedimento descrito por MOORE (1991).

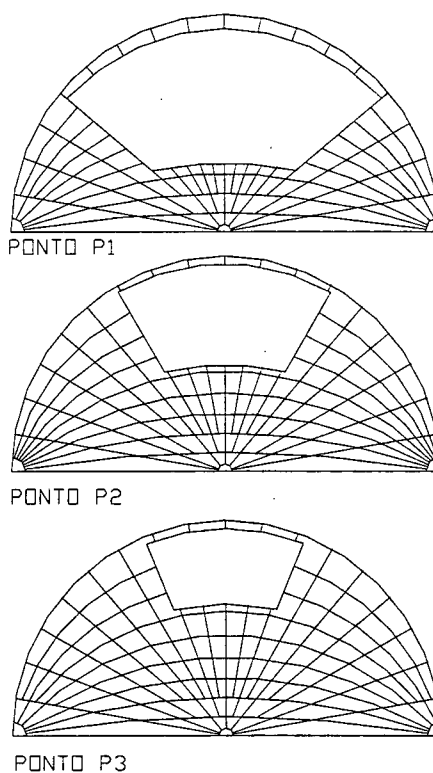


Figura 4.6 - Máscaras de obstrução para os pontos de medição.

Nas tabela 4.1 a seguir apresenta-se os valores calculados para os três pontos definidos P1, P2 e P3, caso a sala fosse orientada para Leste, Norte, Oeste e Sul, respectivamente. O dia escolhido para esta avaliação foi 30 de abril às 9:15 (tal horário foi escolhido por apresentar altitude solar exata de  $30^\circ$ ) para a latitude de Florianópolis/SC. Considera-se que apenas a luz do céu atinge a sala, sem reflexões em superfícies externas e excluída a luz do sol.

Os cálculos foram feitos seguindo-se o roteiro apresentado no item anterior.

Tabela 4.1 Valores calculados para os pontos do modelo em estudo para o dia 30 de abril às 9:15 para a latitude de Florianópolis/SC.

	Leste	Norte	Oeste	Sul
Ponto P1	3835	2781	731	734
Ponto P2	1528	934	334	342
Ponto P3	662	410	165	167

Como se pode ver no gráfico 4.1 abaixo, há uma variação considerável entre valores obtidos para cada uma das orientações a que se submeteu a janela do estudo. Verifica-se que, como o horário escolhido foi matinal e neste horário o sol está Leste, os maiores valores obtidos se deram neste quadrante. Os gradientes entre as orientações são mais pronunciados no ponto P1 e são semelhantes para as orientações oeste e sul para este horário.

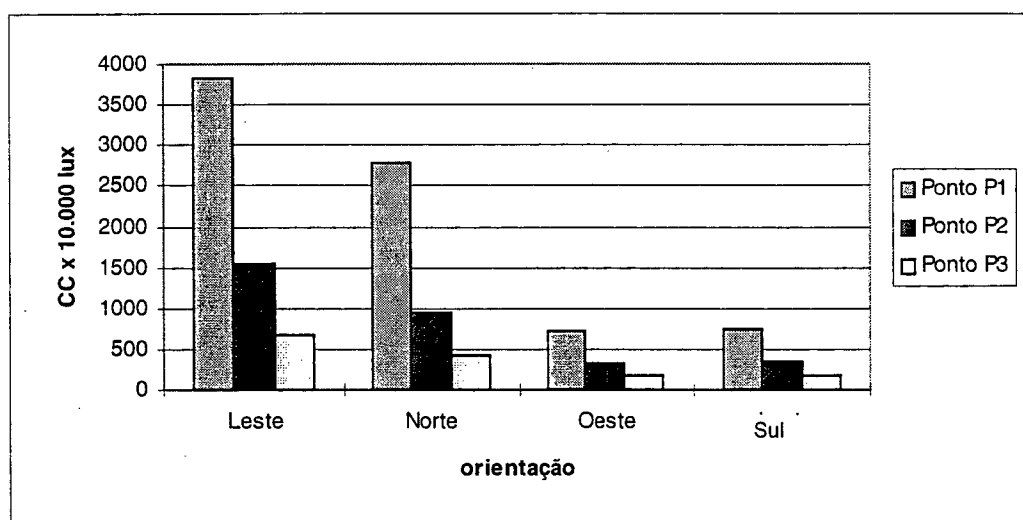


Gráfico 4.1 - Variação percentual apresentada pelos valores da CC para as orientações L, N, O e S, nos pontos P1, P2 e P3

#### 4.2.2 CÁLCULO DA COMPONENTE REFLETIDA INTERNA - CRI

O cálculo da componente refletida externa é feita seguindo os passos descritos no capítulo 3 de metodologia.

Para o cálculo da componente refletida interna se faz a projeção estereográfica das superfícies internas do ambiente em relação aos pontos de medição como pode ser visto na figura 4.7. Superpondo-se estas projeções ao diagrama com os fatores de forma, se obtém o valor da área projetada das superfícies internas do ambiente.

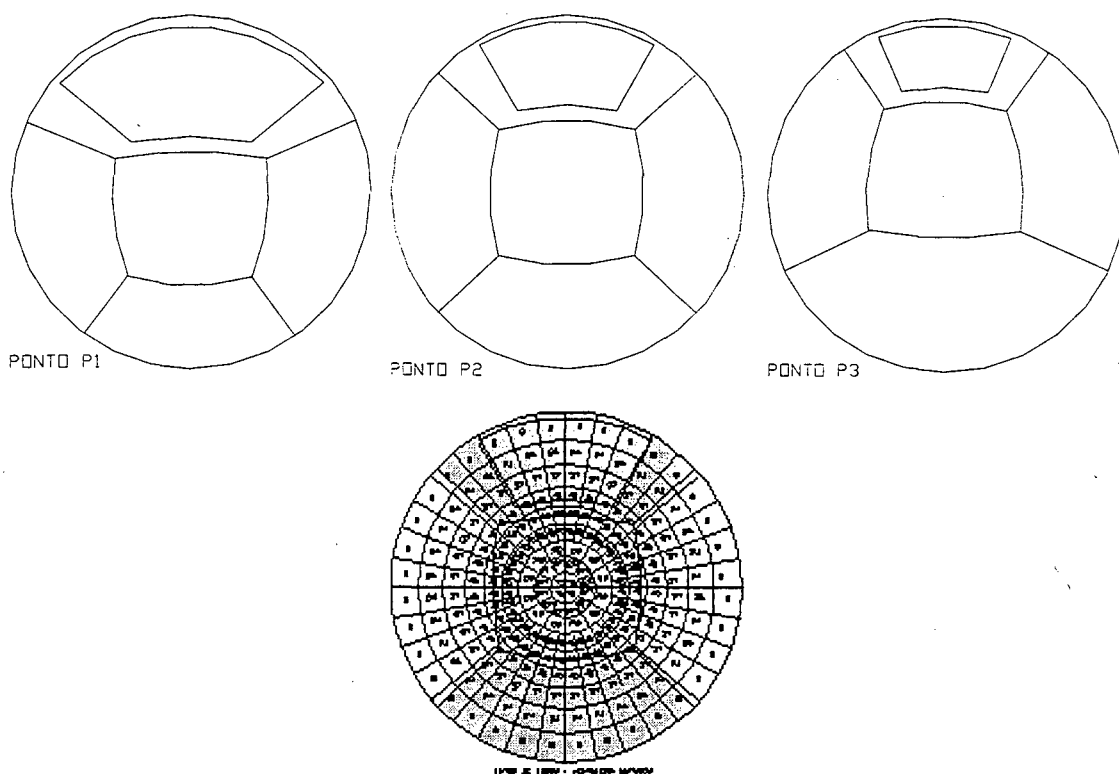


Figura 4.7 - Projeção das superfícies internas do ambiente em relação aos pontos de medição com exemplo de superposição sobre o diagrama de fatores de forma.

A tabela 4.2 a seguir apresenta as área projetadas das superfícies internas (excluída a abertura) calculadas para os pontos internos P1, P2 E P3 do modelo. Como neste estudo se considera que todas as superfícies possuam o mesmo coeficiente de reflexão, é fornecida a somatória total de sua projeção.

Tabela 4.2 - Área projetada das superfícies internas do ambiente em estudo em relação aos pontos P1, P2 e P3 em relação ao total da área das superfícies.

Pontos de Medição	PONTO P1	PONTO P2	PONTO P3
Área Projetada - $A_p$	83,25%	95,05%	97,47%

Os valores aqui obtidos são multiplicados pelo coeficiente de reflexão médio das superfícies do ambiente. Se considerarmos por exemplo, uma sala pintada de branco com  $\rho_m = 0,80$ , obteríamos os valores mostrados na tabela 4.3. Tais valores multiplicados pelas CC encontradas no item anterior fornecem a CRI para cada um dos pontos.



Tabela 4.3 - Área projetada e relação de área projetada x reflexão média calculadas para cada um dos pontos da sala de superfícies brancas com  $\rho_m = 0,8$

Pontos de Medição	PONTO P1	PONTO P2	PONTO P3
Área Projetada - $A_p$	83,25%	95,05%	97,47%
$A_p \times \rho_m$	66,6	76,0	78,0

**Observação:** como neste estudo não se considera a presença de obstruções externa o cálculo da componente refletida externa não será aqui desenvolvido.

### **4.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL**

Foram realizadas medições em modelo em escala, variando-se a localização dos pontos de medição para verificação de como se dá a variação da entrada de luz em profundidade em um ambiente. Foi feita também a verificação da influência da componente refletida interna (CRI) no total de Contribuição de Iluminação Natural (CIN) em um ambiente.

#### **4.3.1 MEDIÇÃO DA QUANTIDADE DE LUZ**

A quantidade de luz necessária para qualquer espaço depende, primeiramente, da atividade a ser desenvolvida (ABNT NB 57). Os iluminamentos recomendados dependem das características das tarefas visuais e dos requerimentos para sua execução (PEREIRA, 1994 - A).

Infelizmente, não podemos confiar no olho humano para saber a quantidade de luz existente; seu mecanismo de ajuste automático e suas reações a cor e contrastes, combinam-se para dar uma resposta bastante abrangente com relação ao valor correto. O olho nos permite dizer se a iluminação está aumentando ou diminuindo, mas não de quanto (PEREIRA, 1994 - A).

#### **4.3.2 FOTOMETRIA**

A fotometria é tida como a área da ciência que lida com a medida de radiação em referência ao efeito produzido no olho humano. As medições são feitas por comparação visual, ou por algum método fotométrico equivalente. Unidades, padrões e sistemas de

medição têm sido desenvolvidos para corresponder ao efeito como o observado pelo olho.

Embora as características do olho humano variem de pessoa a pessoa, os coeficientes padrão de luminosidade foram definidos pela CIE em 1931. Uma estimativa de “sensibilidade” absoluta estabelecida para o olho padrão relaciona unidades fotométricas e unidades de potência radiante. A 5.550 angstroms (550 nm) o comprimento de onda da máxima sensibilidade do olho, de um watt de potência radiante, corresponde a 680 lumens (LI-COR, 1990).

A sensibilidade do olho fora dos limites de comprimento de onda definidos pela CIE é bastante baixa mas não realmente nula. Estudos com fontes intensas infravermelhas mostraram que o olho é sensível a radiações de comprimento de até 10.500 angstroms. A sensibilidade do olho às radiações ultravioletas se estende de 3.125 a 3.023 angstroms. Abaixo deste nível, a absorção da radiação pelas proteínas das lentes do olho aparentemente limita uma maior extensão da visão no ultravioleta. As radiações que têm um comprimento de onda de 3.023 angstroms são detectadas por seu efeito fluorescente na parte anterior do olho.

### 4.3.3 O MODELO EM ESCALA REDUZIDA

A proposta de se estudar a luz natural em um modelo tridimensional permite a visualização clara da eficácia do projeto, através de procedimentos simples de baixo custo.

As medições foram feitas em salas de um modelo em escala reduzida (1:15), para medir os níveis de iluminância internos obtidos, variando-se orientação e dimensões das aberturas, tomando-se medições para diferenciados “tipos” de céu (ver figura 4.8).

Para o estudo de caso, se estabelece o roteiro a seguir para a observação quantitativa do ambiente luminoso simulado no modelo:

⇒ maquete:

- ↳ forração das paredes pretas com papel camurça preto fosco para diminuir a componente refletida interna ao máximo;
- ↳ pintura das paredes brancas com tinta látex branca;
- ↳ vedação completa de possíveis vazamentos de luz.

⇒ determinação de 03 (três) pontos de medição distribuídos de forma uniforme em todo o ambiente de forma a se avaliar o comportamento da luz ao entrar no ambiente por determinada abertura. Optou-se pela colocação de pontos situados na frente, meio e fundo do ambiente, em relação à abertura para entrada de luz.

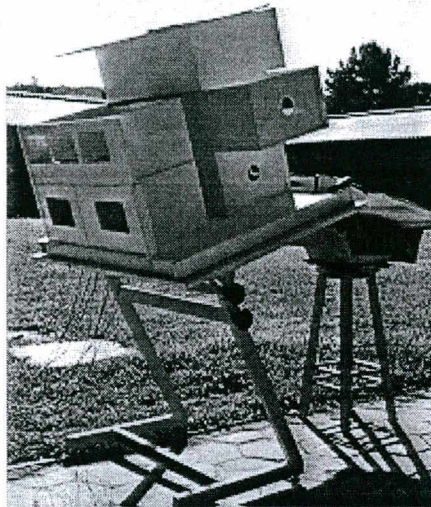


Figura 4.8 - Modelo em escala reduzida posicionado sobre prancheta inclinável (o que permite simular diversas épocas do ano<sup>1</sup>).

#### 4.3.3.1 Localização do modelo

Uma vez que a iluminação recebida em um ponto situado em determinado entorno dependerá fundamentalmente da conjunção de dois parâmetros: do entorno observado a partir do ponto e das propriedades luminosas deste entorno (SOTERAS, 1985), o posicionamento do modelo do modelo em uma área desobstruída é de grande importância, uma vez que se pretende avaliar basicamente o comportamento da distribuição de luz na abóboda celeste, reduzindo ao máximo a influência de outras possíveis componentes de reflexão externa.

Optou-se pela colocação do modelo em escala sobre a cobertura do prédio de Engenharia Mecânica B do Campus Universitário da UFSC em espaço cedido pelo Laboratório de Energia Solar desta unidade (ver figuras 4.9, 4.10 e 4.11).

---

<sup>1</sup> Por limitações de tempo tal procedimento não foi utilizado na presente pesquisa.

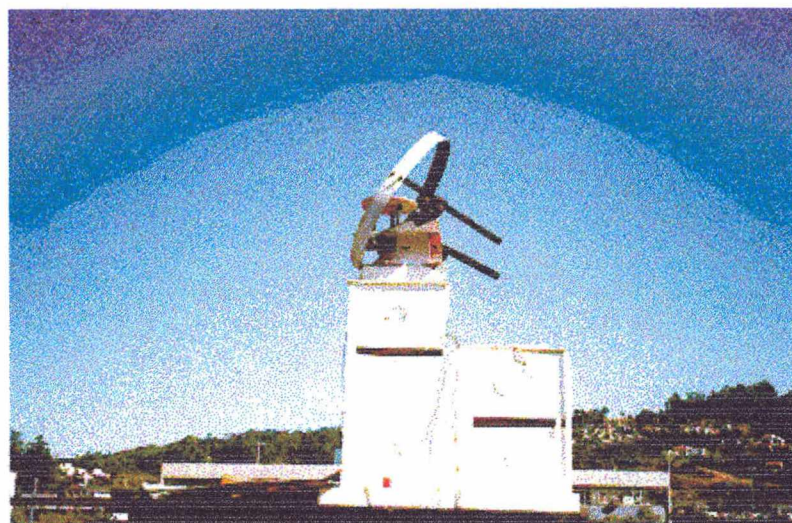


Figura 4.9 Orientação do modelo em escala reduzida - vista fachada sul

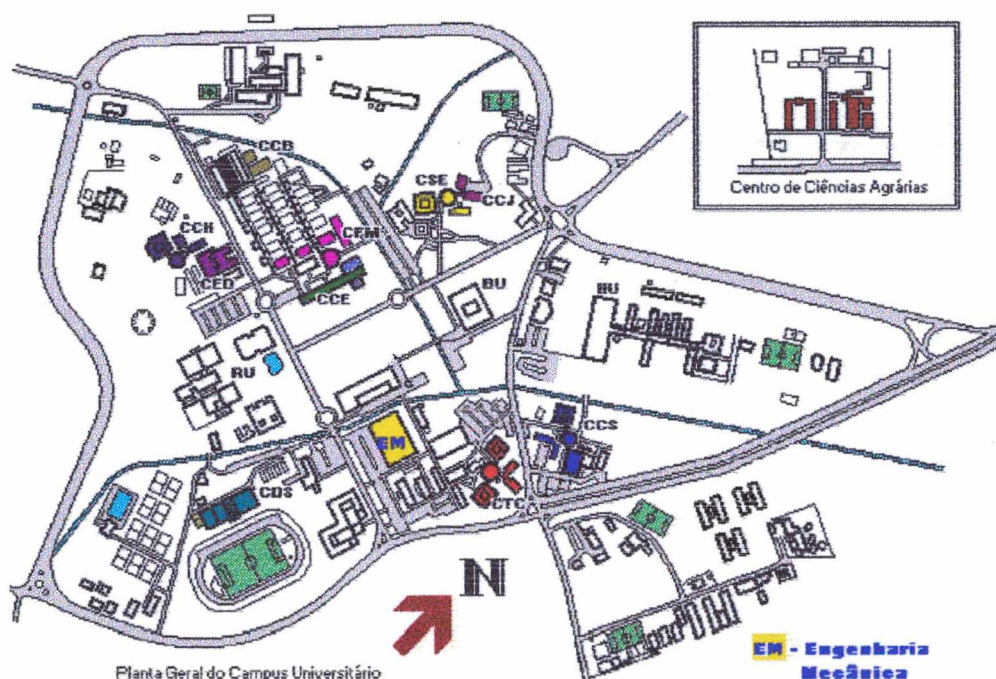


Figura 4.10 - Localização do prédio da Engenharia Mecânica B no Campus da UFSC.

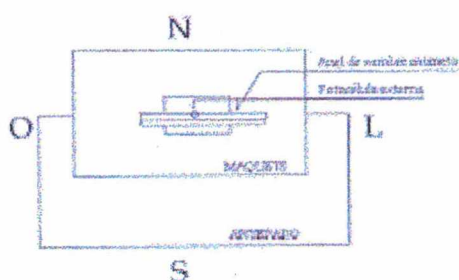


Figura 4.11 - Localização do modelo em escala reduzida no prédio da Engenharia Mecânica B.

Para verificar a presença de obstruções deve-se determinar com a máxima precisão possível a visão que se tem a partir do ponto de referência. Para tal se fez um estudo fotográfico com a utilização de uma lente em que se refletem as obstruções ainda presentes e cujos ângulos de obstrução podem ser lidos através de um diagrama de projeções eqüidistantes, como pode ser visto na figura 4.12.

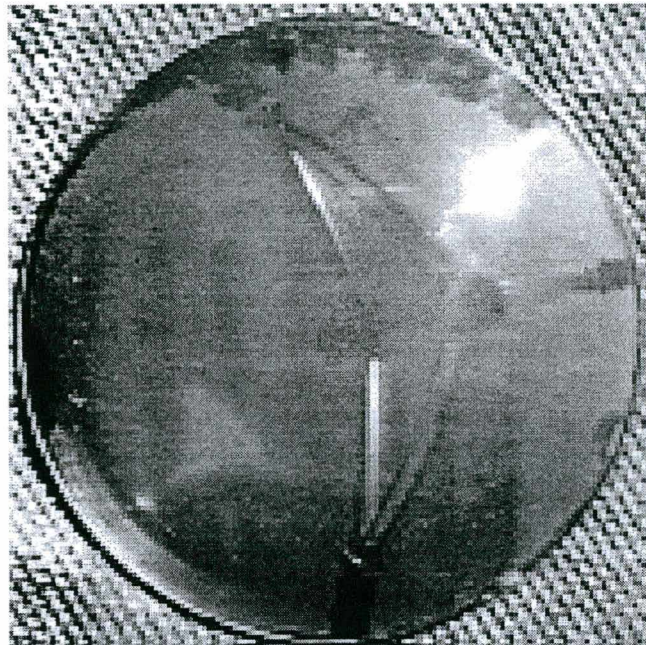


Figura 4.12 - Projeção do entorno da maquete em uma lente de projeção eqüidistante.

#### 4.3.3.2 Orientação das janelas

Optou-se por analisar janelas orientadas para sul, uma vez que nesta orientação o ambiente não apresenta entrada de luz solar direta e se pode obter uma maior gama de valores com medições feitas durante todo o período de estudo. Também esta orientação apresenta menor grau de obstrução em relação às demais orientações como pode ser visto na figura anterior. Esta simplificação se deve ao limite de tempo para medição e análise de dados, em função do prazo determinado para término deste estudo.

Obtida a visualização das obstruções do entorno através da lente de projeção eqüidistante, considerou-se que as obstruções vistas da fachada sul da maquete são desprezíveis, com ângulos de obstrução inferiores a  $5^\circ$ . As obstruções presentes na orientação norte são mais relevantes, porém seu valor seria levado em conta somente em relação à iluminância total no plano horizontal, e sendo este um estudo simplificado,

considera-se seu efeito como sendo desprezível, visando facilitar o tratamento posterior dos dados de medição.

A figura 4.13 a seguir mostra a vista obtida das aberturas do modelo com uma projeção da linha de obstrução vista a partir das aberturas. Considera-se esta influência bem pequena e afetando apenas a fotocélula localizada no ponto de medição P1, uma vez que ao se afastar da abertura, os pontos P2 e P3 “enxergam” porções mais altas de céu.



Figura 4.13 Vista da porção sul a que o modelo em escala reduzida está sujeito<sup>2</sup>

#### 4.3.3.3 Salas do modelo

Os ambientes usados para medição em modelo em escala se apresentam descritos na primeira parte deste capítulo.

Os testes foram feitos em ambientes completamente recobertos de camurça fosca preta (de forma a se eliminar a CRI - componente refletida interna) e em ambientes pintados tinta látex fosca branca (onde a CRI seria máxima) para avaliar o efeito da reflexão das superfícies no nível final de iluminação geral do ambiente, especialmente nos pontos mais afastados da abertura de iluminação. No entanto após a obtenção dos primeiros valores medidos verificou-se que mesmo a sala recoberta de preto apresentava

<sup>2</sup> Como as fotocélulas se localizam abaixo do nível da janela, e como pode ser visto na imagem obtida pela lente de projeção equidistante, considera-se que a influência da paisagem vista seja desprezível para o cálculo da CRE.

uma componente refletida interna, de forma que se procedeu ao cálculo da refletância de suas superfícies.

Para minimizar as reflexões vindas do solo, se utilizou um anteparo também coberto de papel camurça preto na parte inferior externa do modelo. Na figura 4.14 podem ser vistas as salas branca e preta onde foram realizadas as medições, bem como a colocação do anteparo.

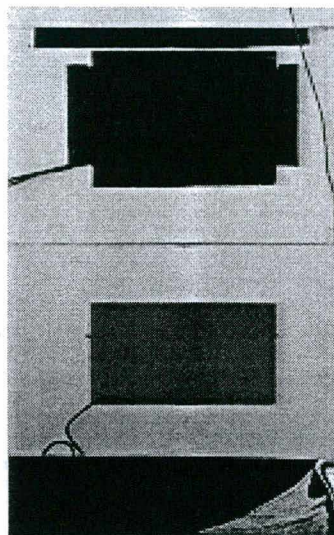


Figura 4.14 Vista das aberturas das salas em estudo com anteparo revestido de camurça fosca preta na parte inferior do modelo para minimizar as reflexões do solo.

#### 4.3.4 MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINAÇÃO

Para a medição dos níveis de iluminação utilizou-se um sistema de equipamentos composto por fotosensores, um circuito de amplificação e dispositivos para a armazenagem dos dados medidos, de forma a se obter leitura médias de valores a cada intervalo de tempo considerado. Se coletaram dados para o expediente de trabalho diurno normal, de 8:00 às 12:00 e de 14:00 às 18:00, em forma de médias tomadas a cada 30 minutos de intervalo.

Para a aquisição dos valores se fez uso de dois *dataloggers* aos quais foram acoplados fotosensores para medir iluminâncias internas e externas. Os fotosensores LICOR (que fornecem valores em lux) foram ligados diretamente ao *datalogger* por meio de conectores tipo BNC e os sensores Megatron (que fornecem valores em milivolts) foram conectados a um circuito de amplificação (mostrado a seguir) cuja saída era ligada por meio de um adaptador ao *datalogger*. O *software* que acompanha o

*datalogger* foi utilizado para transposição dos dados medidos para o computador, para posterior tratamento em um programa de planilhas eletrônicas.

#### 4.3.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

##### 4.3.5.1 Fotosensores

O sensor utilizado para se tomar medições de iluminação é chamado fotocélula ou fotosensor (elemento sensível à luz). Mesmo medições bem planejadas apresentam um provável erro de  $\pm 10\%$ . Estes erros podem ser classificados em dois grupos: no primeiro, aqueles que fornecem um igual desvio em todo o período (por exemplo, um erro no nivelamento do sensor); no segundo grupo, estão aqueles que afetam a fotocélula diferentemente em períodos diversos (por exemplo, o efeito da temperatura). O primeiro grupo é geralmente responsável pela maior parcela no erro total (PEREIRA, 1994a).

A resposta da fotocélula deve ser proporcional à iluminação incidente. Sua resposta à radiação de um determinado comprimento de onda,  $\lambda$ , deve, portanto, ser proporcional à eficácia luminosa relativa  $V(\lambda)$  daquele comprimento de onda. Sua resposta também deve ser proporcional ao fluxo incidente total em relação à gama total de condições na qual ela será usada. A fotocélula deve ser exposta à luz de 2 a 3 minutos antes de se realizar as leituras. Cuidados especiais também devem ser tomados quanto ao posicionamento e nivelamento da fotocélula - pequenas variações podem gerar grandes erros especialmente em regiões onde o nível de iluminação varia bruscamente e/ou a luz chega obliquamente ao sensor (PEREIRA, 1994 - A).

##### **Sensores Megatron**

Alguns dos sensores internos utilizados são fotosensores Megatron de cosseno corrigido tipo M com 11,5 mm de diâmetro de recebimento, com uma sensibilidade espectral bem próxima à do observador padrão CIE sem necessidade do uso de qualquer filtro (PEREIRA 1992). Estes sensores foram calibrados antes do início das medições no próprio Laboratório de Conforto (LabCon) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC.

Os fotosensores foram encaixados em suportes cilíndricos de madeira para facilitar seu manuseio e para correto posicionamento e altura no plano de trabalho (70



cm do piso), na qual deviam ser feitas as medições. Os suportes podem como ser vistos na figura 4.15.

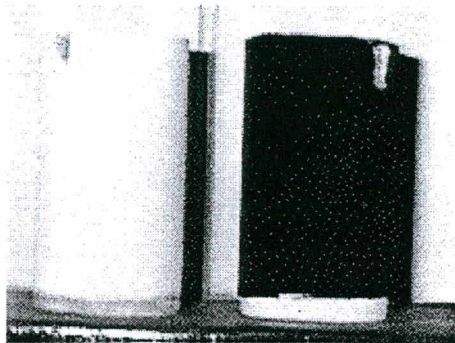
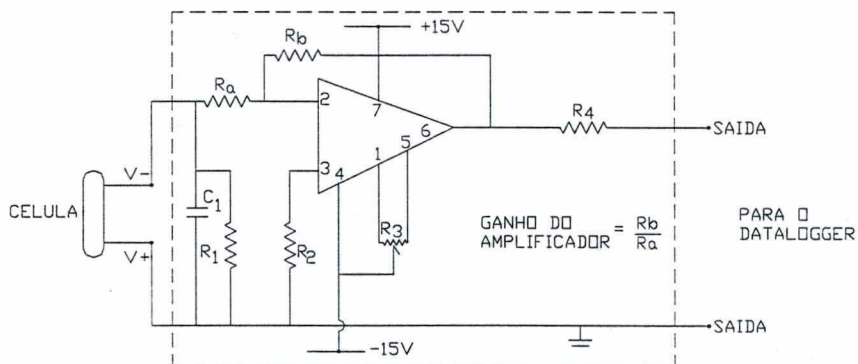


Figura 4.15 Suportes cilíndricos para encaixe dos fotosensores.

Os fotosensores internos foram conectados a um circuito de amplificação e linearização, cuja saída era lida pelo *datalogger* LI-1000, o dispositivo de aquisição de dados. Cada uma das nove fotocélulas foi configurada de acordo com a saída fornecida pelo circuito mostrado na figura 4.16. A caixa do circuito é mostrada na figura 4.17.



CÉLULA = fotocélula Megatron Tipo M de Ø11,5mm

$$C_1 = 0,1 \mu\text{F}$$

$$R_a = 100 \Omega$$

$$R_b = 22 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \Omega$$

$$R_3 = 220 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 2,2 \text{ k}\Omega$$

Figura 4.16 - Diagrama do circuito de amplificação (in PEREIRA, 1992).

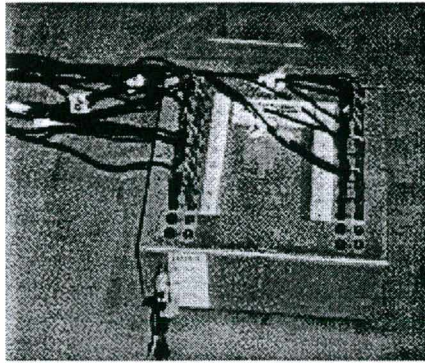


Figura 4.17 - Caixa do circuito de amplificação.

O ganho do circuito foi fixado e o zero estabelecido para cada fotocélula pôde ser alterado individualmente. Para se melhorar a linearidade das fotocélulas, o amplificador possui uma baixa impedância de entrada ( $100 \Omega$ ) (PEREIRA 1992).

As fotocélulas foram calibradas em uma bancada de 2m de comprimento usando como fonte uma lâmpada OSRAM tipo 41870 WFL de 12V e 50 W, com ângulo de abertura EXN de  $38^\circ$ . A lâmpada e o fotosensor foram montados em suportes móveis e envolvidos em tubos negros de papel fosco para evitar reflexões externas e direcionar o foco de luz como mostra a figura 4.18.

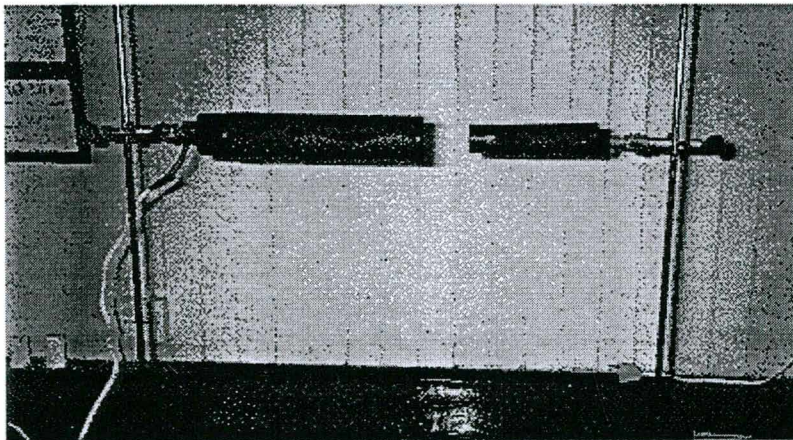


Figura 4.18 Dispositivo de calibração das fotocélulas Megatron

Após a calibração foram introduzidas as seguintes constantes de calibração para as nove fotocélulas na variável "MULT =" do datalogger LI-1000:

Fotocélula 1 - MULT = 0,9639

Fotocélula 2 - MULT = 2,7035

Fotocélula 3 - MULT = 2,6777

Fotocélula 4 - MULT = 0,6356

Fotocélula 5 - MULT = 3,4500

Fotocélula 6 - MULT = 1,0268

Fotocélula 7 - MULT = 0,8141

Fotocélula 8 - MULT = 0,9769

Fotocélula 9 - MULT = 4,2051

Os gráficos de calibração de cada um dos 9 sensores são apresentados no Anexo 4. A fotocélula 9 apresentou menor sensibilidade a baixos valores de iluminação, sendo disposta próxima à janelas do modelo, para medir maiores níveis de iluminâncias.

Ao longo do uso dos sensores, no entanto, se verificou que as fotocélulas apresentavam discrepâncias nos valores medidos sendo descartadas por não apresentarem a confiabilidade necessária. Foram usados apenas 3 destes sensores para medição final dos valores de iluminação.

### **Sensores LI-COR**

São 5 fotosensores do tipo SA (LI-COR), caracterizados por possuir cabo coaxial acabado com conector BNC. Estes sensores vêm calibrados de fábrica e devem ser recalibrados a cada 2 anos. Para se usar os sensores tipo SA com o LI-1000, a constante de calibração dada no certificado de calibração do sensor, deve ser entrada no aquisitor de dados na forma de um multiplicador (*a1* na polinomial  $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4 + a_5X^5$  na versão 2.02 do software do LI-1000).

O sensor fotométrico LI-210SA é calibrado com o uso de uma lâmpada padrão. A incerteza de calibração é de  $\pm 5\%$ . Todos os sensores fotométricos da LI-COR têm sido calibrados usando-se 683 lumens/Watt como o valor da eficácia espectral luminosa em um comprimento de onda de 555 nm e não mais pelo anteriormente valor padrão aceito de 680 lumens/Watt. Tal mudança se fez para se conformar as recomendações do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), adotado em setembro de 1977. O novo valor é considerado como sendo um dos que melhor relaciona as unidades fotométricas e radiométricas atualmente usadas nos grandes laboratórios.

Estes fotosensores foram utilizados tanto para medições internas quanto para medição externa e como suas respostas apresentaram maior confiabilidade durante o processo de medição, foram os sensores escolhidos para se medir os ambientes internos negros, onde se procurou diminuir ao máximo a influência da CRI.

Todos os sensores de cosseno corrigido do tipo terrestre da LI-COR são projetados para terem as mesmas características de resposta de cosseno. O erro é

tipicamente menor que  $\pm 5\%$  para ângulos menores que  $80^\circ$  em relação ao eixo normal do sensor. A  $90^\circ$ , um coletor com resposta de cosseno perfeita deveria ser zero e neste ângulo qualquer erro é infinito (LICOR, 1991).

**Observação:** Os sensores da LI-COR, sendo sensores de alta precisão, com calibração de fábrica (tendo sido adquiridos para a realização deste experimento), foram utilizados para aferir a calibração feita nos sensores Megatron.

#### 4.3.5.2 DataLogger LI-1000

O LI-1000 (ver figura 4.19) possui 10 canais para entrada de sensores e funciona tanto como um aparelho de aquisição de dados quanto como um medidor multicanal. Possui dois canais de entrada de corrente localizados em conectores BNC, seis canais analógicos adicionais (de entrada de corrente ou de voltagem) e dois canais de contagem de pulsos.

Os dados podem ser armazenados manualmente para medições instantâneas ou armazenados automaticamente (modo LOG). A memória interna é de 32K bytes. O teclado é usado para entrada dos multiplicadores de calibração do sensor, para definir a configuração dos canais, tempos de integração, limites de precisão, unidades e para armazenar leituras. A saída de dados é lida por um software com capacidade de armazenar e/ou mostrar leituras instantâneas, integradas, médias, leituras máximas ou mínimas. As funções matemáticas também permitem divisões, multiplicação, adição ou subtração de dois canais.

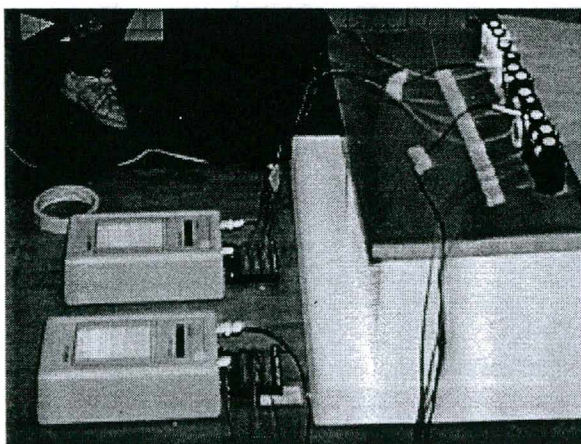


Figura 4.19 Teste dos fotosensores Megatron encaixados em suportes cilíndricos de madeira revestidos de preto ou branco, ligados aos datalogger LI-1000.

O modo de configuração do aparelho é usado para configurar cada canal para mostrar ou armazenar os dados de saída do sensor. Cada canal analógico possui 3 configurações, que incluem configuração para sensores de luz, termopares ou uma configuração geral para outros tipos de canal. Para este experimento todos os canais foram configurados como sensores de luz - no modo LIGHT.

Os canais de 1 a 8 são canais analógicos que podem ser configurados tanto como canais de entrada de corrente quanto de voltagem.

Na presente pesquisa foram utilizados os canais para medida de voltagem, no modo LOG, programados para fazer médias a cada 30 minutos de medição dos valores lidos. Se considera que não são necessários intervalos menores de medição, uma vez que o que se quer verificar é a variação percentual da iluminação exterior pela interior de acordo com a variação da altura e azimute solar, não se necessitando de valores instantâneos ou pontuais para tal.

#### 4.3.6 FONTES DE ERRO NAS MEDIÇÕES

As principais fontes de erro detectadas no presente experimento são citadas a seguir:

- ☒ Calibração do sensor: a fonte de luz utilizada para calibração do sensor deve ser adequadamente calibrada para que forneça uma saída conhecida e constante. No caso deste experimento utilizou-se uma fonte de tensão estabilizada para evitar as variações na corrente fornecida pela companhia elétrica.
- ☒ Saída do sensor: após longos períodos de exposição, as células tendem a se tornar menos sensíveis e se recomenda que a calibração seja checada em períodos regulares. Quanto mais quente estiver o ambiente, menor será a precisão do sensor. Em presença de luminâncias muito altas, a maioria das fotocélulas tende a dar valores menores do que deveria; este efeito pode ser incluído no processo de calibração. No presente experimento não foi utilizado tal procedimento.
- ☒ Resposta do cosseno: medidas que precisem se aproximar da radiação que atinge uma superfície plana de todos os ângulos de uma hemisfera são obtidos mais precisamente por meio de um sensor de cosseno corrigido. Um sensor com resposta de cosseno, permite que se faça medidas das densidades de fluxo por unidade de área ( $m^2$ ) através de uma superfície plana. Um sensor sem uma correção de cosseno precisa, pode fornecer um grave erro sob condições de radiação difusa dentro de uma maquete, a

baixos ângulos de elevação do sol, sob luz fluorescente, etc. Ambos os tipos de sensor utilizados neste experimento possuem resposta de cosseno corrigida.

- ☒ Tamanho: uma vez que a fotocélula possui tamanho finito a saída pode ser levemente diferente em um modelo do que no espaço em escala real.
- ☒ Disposição e nivelamento do sensor: a má colocação do sensor pode causar grandes erros e por isso o posicionamento do sensor deve ser cuidadoso.
- ☒ Resposta espectral: os sensores modernos são calibrados para medir a faixa visível de radiação incidente.

#### 4.3.7 TRATAMENTO DE DADOS

Os dados obtidos com as medições foram tratados de forma a se excluir valores espúrios e obter valores representativos da situação estudada. Para cada um dos casos estudados, os valores encontrados foram normalizados para um céu “padrão” de 10.000 lux, de forma que se possa analisá-los comparativamente.

##### 4.3.7.1 Correção dos valores de iluminação difusa externa

As medições do nível de iluminação externa foram tomadas usando um anel de sombreamento para evitar a incidência da luz solar direta sobre o sensor, que leu então apenas a componente difusa proveniente do céu. Como o anel intercepta também parte da luz proveniente da abóboda celeste, Littlefair (1984) (in PEREIRA, 1992) apresentou um procedimento de correção dos valores lidos que considera características de céu anisotrópico. Ele utiliza um fator de correção  $g$  para obter a iluminação difusa horizontal a partir dos valores medidos:

$$E_{dH} = g \cdot E_{dH\text{medido}} \quad [\text{Equação 4.1}]$$

onde:

$E_{dH}$  - iluminação difusa horizontal

$E_{dH\text{medido}}$  - iluminação difusa horizontal medida

$g$  - fator de correção para o anel de sombreamento; varia de acordo com a distribuição de luminâncias de céu:

$$g_e = 1,07 + 0,16\delta \quad [\text{Equação 4.2}]$$

$$g_c = 1,126 + 0,105\delta - 0,192\delta^2 + 0,218\gamma_0 - 0,070\gamma_0\delta - 0,333\gamma_0\delta^2 - 0,165\gamma_0^2 - 0,13\gamma_0^2\delta + 0,842\gamma_0^2\delta^2 \quad [\text{Equação 4.3}]$$

onde:

$g_e$  - fator de correção para céu encoberto;

$g_c$  - fator de correção para céu claro;

$\delta$  - declinação solar em radianos<sup>3</sup>;

$\gamma_0$  - altitude solar em radianos<sup>4</sup>.

#### 4.3.7.2 Verificação da refletividade das superfícies do modelo

Uma vez iniciadas as medições se verificou que mesmo a sala revestida de superfícies pretas, apresentava valores mais altos de iluminância do que o esperado, o que indicava que mesmo neste ambiente haveria a presença de uma componente refletida interna da luz.

Para se verificar o valor desta componente refletida interna, se fez primeiramente a verificação do valor da refletância do papel camurça preto e da tinta látex fosca branca utilizados para forrar e pintar respectivamente as superfícies das salas preta e branca em estudo.

O método utilizado para medição da refletividade destas superfícies foi o mesmo recomendado por PHILIPPI et al (1988) para medição de refletividade solar de superfícies planas. Naquele caso usou-se um piranômetro, e aqui se utiliza uma fotocélula, uma vez que se quer medir a quantidade de luz e não de radiação solar refletida.

O procedimento recomendado consiste na colocação da amostra na parte inferior de uma caixa de superfícies internas negras, com a amostra voltada para a superfície superior. Sobre a caixa é então colocado um dispositivo para fixação de uma fotocélula de forma a possibilitar a montagem deste voltado para a superfície e voltado contra a superfície. O mecanismo de fixação da caixa deve permitir a alteração do ângulo de incidência conforme a necessidade do ensaio.

<sup>3</sup> Ver Capítulo 3 - Metodologia - equação 3.1.

<sup>4</sup> Ver Capítulo 3 - Metodologia - equação 3.2.

A fotocélula deve ser montada de modo que seu sensor seja paralelo ao plano da amostra. Duas medidas devem ser tomadas: uma da luz refletida com a fotocélula com a fotocélula voltada para a amostra e outra com a fotocélula voltada contra a amostra como mostra a figura 4.20. A razão entre a iluminação refletida pelo papel (medida com o fotosensor virado para baixo) e a iluminação do céu (com o fotosensor virado para cima) é a refletividade.

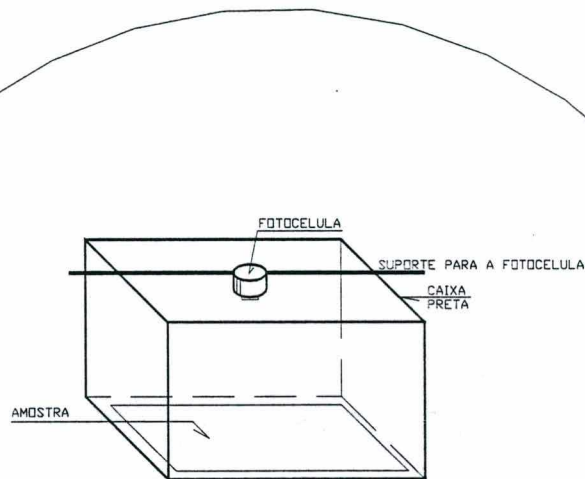


Figura 4.20 - Esquema com o processo de medição da refletância de superfícies.

Foram feitas medições sob céu encoberto e com várias orientações do sensor para se obter condições de céu mais homogêneas e diminuir os erros devidos à variação do ângulo de incidência da luz sobre as superfícies que se desejava medir.

Os valores obtidos foram os seguintes:

- papel camurça preto:  $\rho \cong 0,10$  (desvio padrão = 0,03)
- tinta látex branca fosca  $\rho \cong 0,80$  (desvio padrão = 0,12)

Com relação às exigências de precisão, comenta-se que conforme a norma ASTM E424 (in PHILIPPI et al, 1988), este método tem sido usado, mas que a experiência existente com esta técnica é insuficiente para uma padronização e que o procedimento padrão com as correções necessárias não estão estabelecidos.

Algumas das fontes de possíveis erros nas medições podem ser a própria fotocélula colocada sobre a superfície que interfere, causando sombreamento sobre a mesma (quanto mais afastada estiver, menos interferência irá causar), e o campo de



visão da fotocélula que deve ser totalmente tomado pela superfície que modo que a radiação externa não consiga atingir o elemento sensor.

#### 4.3.7.3 Cálculo da CRI para as superfícies internas do modelo

Obtidos os valores das refletâncias para as superfícies dos dois ambientes em estudo, se procedeu ao cálculo da componente refletida interna pelos passos já descritos no item 4.2 deste capítulo.

Fez-se a projeção estereográfica das superfícies internas do modelo em escala em relação a cada um dos pontos de medição. Estas máscaras de projeção foram superpostas ao diagrama de fatores de forma para o cálculo da área projetada  $A_p$ . O valor obtido é multiplicado pela refletividade das superfícies encontradas no item interior. A seguir se apresentam os valores obtidos para os pontos P1, P2 e P3 nos dois ambientes de medição.

Tabela 4.4 - Área projetada e relação de área projetada x reflexão média calculadas para cada um dos pontos da sala de superfícies brancas com  $\rho_b = 0,8$  e relação de área projetada x reflexão média calculadas para cada um dos pontos da sala de superfícies pretas com  $\rho_p = 0,10$

Pontos de Medição	PONTO P1	PONTO P2	PONTO P3
Área Projetada - $A_p$	83,25%	95,05%	97,47%
$A_p \times \rho_b$	66,6	76,0	78,0
$A_p \times \rho_p$	8,3	9,5	9,7

#### 4.3.8 MEDIÇÕES

Foram realizadas medições do dia 19 de abril ao dia 10 de maio, nos horários de 8:00 às 12:00 e de 14:00 às 17:30 tomadas como valores médios de períodos de meia hora (desprezou-se os valores obtidos depois deste horário, pois nesta época do ano o sol se põe antes do final do horário de medição de 17:30 às 18:00)

Foram selecionados os dias de céu totalmente encoberto ou dias de céu claro sem nuvens para a realização das comparações aqui apresentadas: um dia de céu encoberto e dois dias de céu claro - o primeiro possuindo maior taxa de turvamento e conseqüentemente maiores níveis de iluminância devido ao céu, e o segundo com menor taxa de turvamento e céu de menor luminosidade.

Após realizadas as medições, os valores para a iluminância externa  $E_p$ , foram corrigidos em relação ao sombreamento causado pelo anel e os valores internos foram reduzidos da CRI.

Para cada um dos dias em que foram realizadas medições se calculou a correção devido ao anel de sombreamento e as alturas solares médias em relação a cada intervalo de medição (por exemplo, tomou-se a altitude solar no horário de 8:45 para o intervalo de medição de 8:30 às 9:00) como pode ser visto na tabela 4.5 para o dia 24 de abril.

Tabela 4.5 Valores de altitude e azimute solar, correção da hora  $X_h$ , e do anel de sombreamento para o dia 24 de abril.

hora	hora decimal	hora solar corrig.	altitude solar	azimute solar	g céu encob. 1,1060 g - céu claro
8:15	8,25	8,06	20	63	1,1861
8:45	8,75	8,56	26	58	1,1926
9:15	9,25	9,06	31	53	1,1959
9:45	9,75	9,56	36	46	1,1965
10:15	10,25	10,06	41	39	1,1950
10:45	10,75	10,56	45	30	1,1923
11:15	11,25	11,06	48	21	1,1894
11:45	11,75	11,56	49	10	1,1872
14:15	14,25	14,06	40	-41	1,1955
14:45	14,75	14,56	35	-48	1,1966
15:15	15,25	15,06	30	-54	1,1954
15:45	15,75	15,56	24	-59	1,1914
16:15	16,25	16,06	19	-64	1,1841
16:45	16,75	16,56	13	-68	1,1732
17:15	17,25	17,06	6	-72	1,1583

(valores para o dia 24 de abril com declinação solar  $\delta_s = 12,881426$  e  $X_h = 0,0315$ )

O levantamento de dados de medição permite verificar o desempenho dos diagramas de distribuição de luminâncias (DCRL) em relação a valores reais, analisando as situações que apresentam níveis de iluminação inferiores ou superiores aos obtidos pela aplicação do método proposto.

Dentre os dias medidos foram selecionados os que apresentaram valores de variação mais uniformes durante todo o período de medição. Foram selecionados três dias com as seguintes características: um dia com de céu encoberto e dois dias de céu claro - o primeiro em que não se notasse a presença de turvamento com cor azul profunda e o segundo onde fosse notável uma coloração mais clara da abóboda, resultado de níveis de turvamento mais elevados.

A seguir apresenta-se os valores obtidos para os dias 3 de maio, 24 de abril e 7 de maio que representam os valores para céu encoberto, céu claro com baixo turvamento e céu claro com alto turvamento, respectivamente.

### Dia 3 de maio

Dia com distribuição de luminâncias típica de céu encoberto.

Nas tabelas 4.6 e 4.7 e nos gráficos 4.2 e 4.3 se mostram os valores de E (iluminância total externa no plano horizontal desobstruído) e os valores das iluminâncias internas nos pontos P1, P2 e P3 para cada um dos horários de medição para o ambiente revestido de preto e para o ambiente pintado de branco. Neste dia se obtiveram medições apenas até às 15:30, uma vez que após este horário o tempo fechou e o experimento teve que ser coberto - no entanto este se apresentou como o dia mais regular entre os dias de céu encoberto medidos e portanto foi tomado para análise e comparação. Se ressalta que os valores de iluminância externa, E, apresentados a seguir estão corrigidos pelo fator de sombreamento g.

Tabela 4.6 - Valores de iluminâncias externas (corrigidas pelo fator de sombreamento) e internas medidas para o dia 3 de maio medidas em lux para a sala revestida de preto.

	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	14:30	15:00	15:30
$E_{ext}$	19688	26629	27186	32011	32111	31666	37181	37905	20189	23900	13003
P1	2.694	3.167	2.964	3.318	2.938	2.755	3533	2426	3.034	3.667	1.975
P2	798	882	905	1.012	867	856	996	712	697	933	505
P3	401	454	489	543	488	491	504	438	271	382	193

Tabela 4.7 - Valores de iluminâncias internas medidos para o dia 3 de maio medidas em lux para a sala pintada de branco.

	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	14:30	15:00	15:30
P1	3420	3941	3774	4170	3740	3617	4391	3351	3493	4272	2305
P2	2035	2300	2312	2516	2250	2241	2539	2133	1730	2209	1159
P3	1483	1689	1707	1828	1669	1660	1836	1663	1194	1514	782

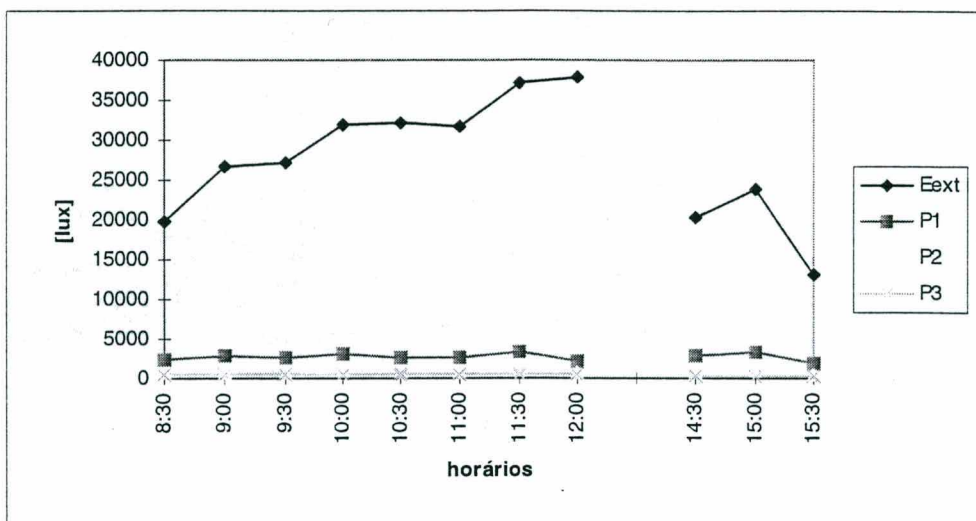


Gráfico 4.2 - Dia 3 de maio. Iluminâncias externas e internas medidas para a sala revestida de preto.

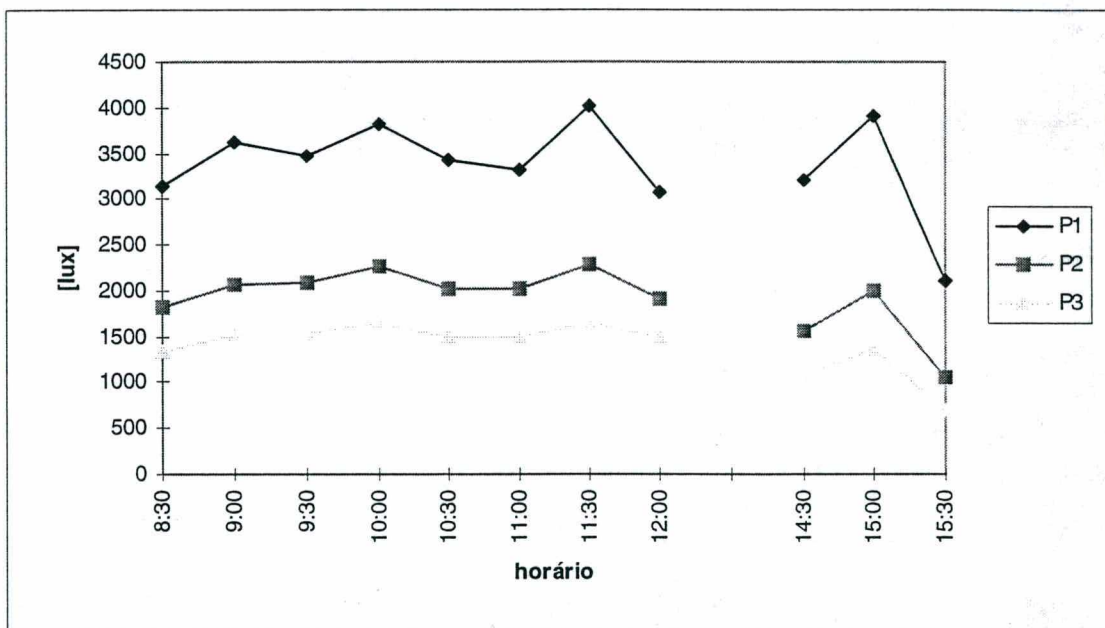


Gráfico 4.3 - Dia 3 de maio. Valores de iluminância interna para a sala revestida de preto em detalhe.

Os valores de iluminância externa para o dia 3 de maio variam de 15.000 a 30.000 lux - bem mais elevados do que os valores encontrados para dias de céu claro. As iluminâncias internas na sala revestida de preto, no ponto P1 variam aproximadamente de 2.000 a 3.500 lux, no ponto P2 de 700 a 1.000 lux e o ponto P3 de 270 a 540 lux. As variações apresentadas nos valores de cada intervalo podem se dever a mudanças no grau de cobertura da abóboda celeste. No entanto notou-se que os

percentuais entre os valores externos e internos são bastante semelhantes para cada horário, como será mostrado no item de avaliação dos resultados.

Para a sala branca, obteve-se valores de iluminância mais elevados, comprovando a influência da componente refletida interna nos níveis internos de iluminação. Para o ponto P1 os valores da componente celeste variaram de 3.000 a 4.000 lux, para o ponto P2 de 1.800 a 2.500 lux e para o ponto P3 de 1.400 a 1.800 lux. Nota-se também em primeira análise que a influência da CRI se faz sentir mais fortemente à medida em que se afasta da abertura de iluminação natural.

A figura 4.21 abaixo mostra um dia típico de céu encoberto para esta época de ano na cidade de Florianópolis, onde foram realizadas as medições.

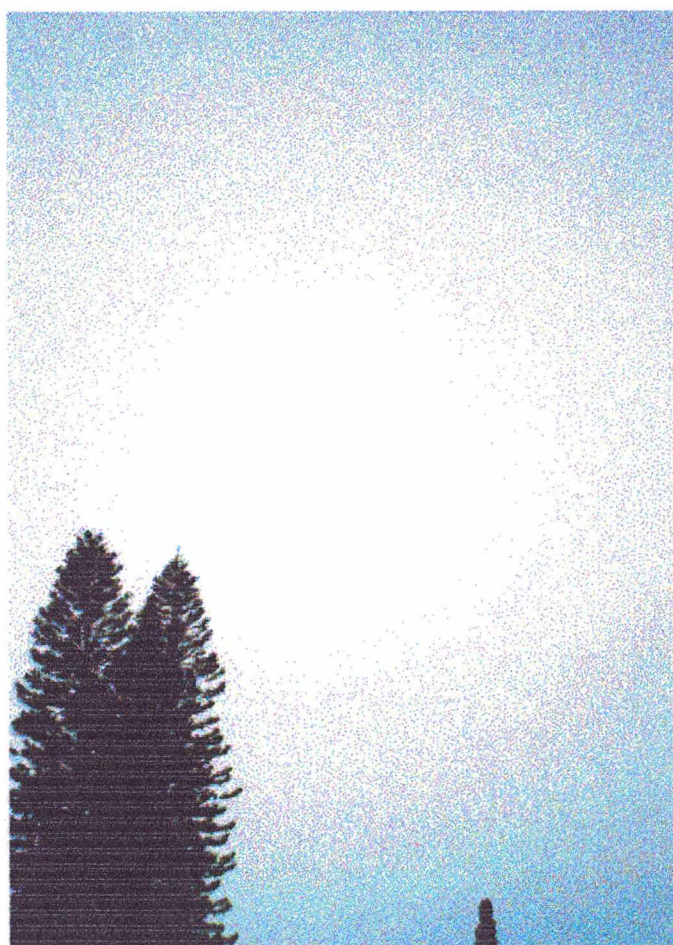


Figura 4.21 - Céu encoberto com distribuição de luminâncias de céu encoberto típico da cidade de Florianópolis - SC.

**Dia 24 de abril**

Os valores obtidos para este dia mostram a entrada de luz em um ambiente em presença de céu claro com baixo turvamento.

Nas tabelas 4.8 e 4.9 e nos gráficos 4.4 e 4.5 se mostram os valores da E externa em plano horizontal e das iluminâncias internas nos pontos P1, P2 e P3 para cada um dos ambientes em estudo. Os valores de iluminância externa, E, se apresentam corrigidos pelo fator de sombreamento g.

Tabela 4.8 - Valores de iluminâncias externas (corrigidas pelo fator de sombreamento) e internas medidas (em lux) para o dia 24 de abril para a sala revestida de preto.

	8:15	8:45	9:15	9:45	10:15	10:45	11:15	11:45	14:15	14:45	15:15	15:45	16:15	16:45	17:15
E	8376	8898	9371	9811	10277	10611	10824	10922	10074	9594	9381	8995	7926	6536	4113
P1	925	951	953	940	923	917	909	889	948	965	971	968	916	806	543
P2	402	413	416	414	408	407	405	395	412	416	416	412	389	341	231
P3	202	211	215	216	215	217	217	212	216	216	214	209	196	170	113

Tabela 4.9 - Valores de iluminâncias internas medidos para o dia 24 de abril medidas em lux para a sala pintada de branco.

	8:15	8:45	9:15	9:45	10:15	10:45	11:15	11:45	14:15	14:45	15:15	15:45	16:15	16:45	17:15
P1	2.016	2.101	2.139	2.155	2.141	2.135	2138	2139	2334	2364	2362	2312	2183	1864	1175
P2	1.231	1.298	1.354	1.377	1.378	1.393	1398	1379	1498	1505	1483	1438	1322	1085	591
P3	1055	1131	1193	1227	1239	1252	1265	1258	1372	1392	1361	1304	1190	960	500

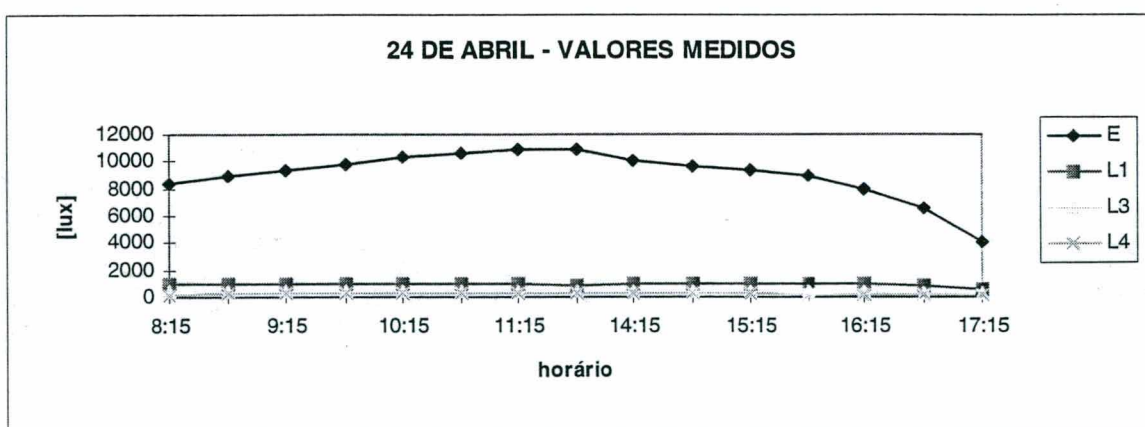


Gráfico 4.4 - Dia 24 de abril. Iluminâncias externas e internas medidas para a sala revestida de preto.

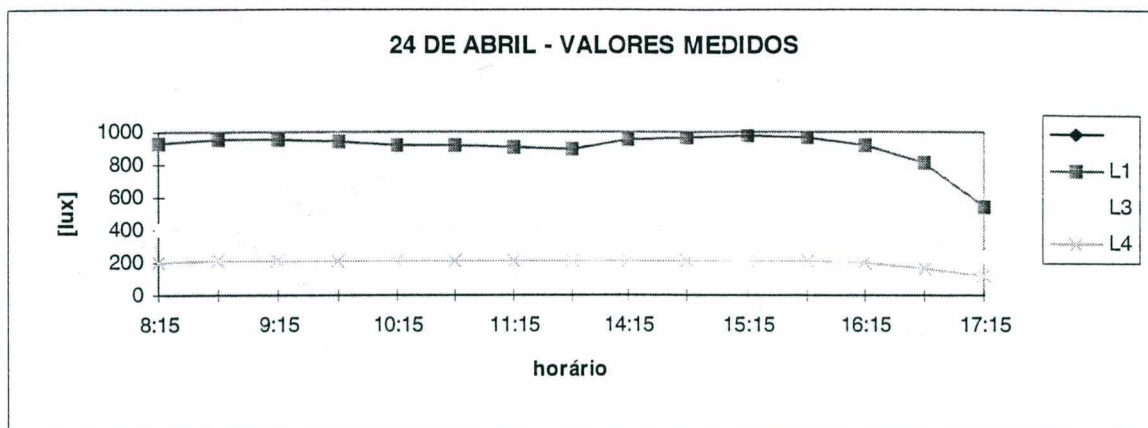


Gráfico 4.5 - Dia 24 de abril. Valores de iluminâncias internas em detalhe.

Os valores obtidos para o dia 24 de abril de 1997 se caracterizam por apresentar baixos valores de iluminância externa em plano horizontal com valores variando de 6.500 a 11.000 lux. Correspondentemente os valores de iluminância interna também são bastante mais baixos que os obtidos em dia de céu nublado, com valores da componente celeste variando de 850 a 950 lux no ponto P1, mais próximo à janela; de 340 a 410 no ponto médio do ambiente e de 170 a 220 no ponto de medição mais distante da abertura.

Pode-se ver que as variações das iluminâncias internas e externas ao longo do dia apresentam gradientes bastante suaves, caracterizando um dia de céu claro bastante homogêneo.

Os valores mais baixos de iluminância se devem ao fato da “ausência” de turvamento, o que faz com que o céu tenha uma coloração azul profunda. A figura 4.13 apresentada anteriormente neste capítulo mostra um céu deste tipo.

### Dia 7 de maio

Os valores obtidos para este dia para mostram a entrada de luz em um ambiente em presença de céu claro com baixo turvamento.

Nas tabelas 4.10 e 4.11 e nos gráficos 4.6 e 4.7 se mostram os valores de E (iluminância total externa no plano horizontal desobstruído) e os valores das iluminâncias internas nos pontos P1, P2 e P3 para cada um dos ambientes em estudo. Os valores de iluminância externa, E, apresentados a seguir já se apresentam corrigidos pelo fator de sombreamento g.

Tabela 4.10 - Valores de iluminâncias externas corrigidas e internas medidas (em lux) para o dia 7 de maio para a sala revestida de preto.

	8:15	8:45	9:15	9:45	10:15	10:45	11:15	11:45	14:15	14:45	15:15	15:45	16:15	16:45	17:15
E	16.74 6	19.73 3	19.26 1	17.68 6	16.86 9	16.03 7	13.06 0	12.87 5	13.67 9	12.65 2	11.64 6	10.50 2	8.894	6.452	2.689
P1	1.185	1.266	1.184	1.118	1.192	1.111	1.026	1.017	1.262	1.098	1.081	1.043	955	756	354
P2	474	502	479	465	449	456	442	439	509	457	446	429	391	308	144
P3	261	270	266	266	251	266	262	262	272	257	253	241	217	167	76

Tabela 4.11 - Valores de iluminâncias internas medidos para o dia 7 de maio medidas (em lux) para a sala pintada de branco.

	8:15	8:45	9:15	9:45	10:15	10:45	11:15	11:45	14:15	14:45	15:15	15:45	16:15	16:45	17:15
F1	2.253	3.022	2.958	2.957	2.842	3.128	2978	2978	3.215	2.860	2.757	2.574	2.259	1.630	640
F2	1.576	2.245	2.235	2.282	2.067	2.433	2367	2329	2.422	2.202	2.117	1.966	1.708	1.207	480
L5	1.322	1.765	1.822	1.914	1.677	2.098	2060	2028	2.039	1.857	1.775	1.628	1.389	942	357

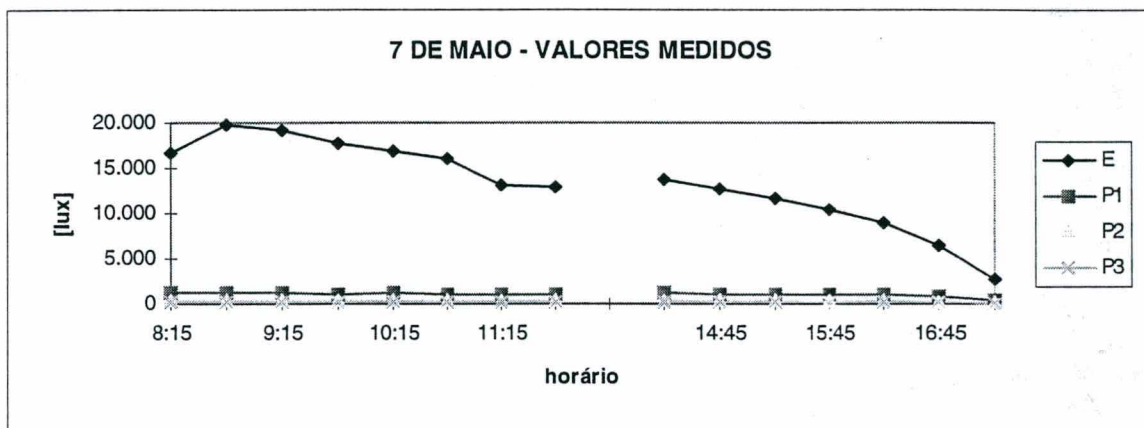


Gráfico 4.6 - Dia 7 de maio. Iluminâncias externa (corrigida do fator de sombreamento) e internas medidas para a sala revestida de preto.

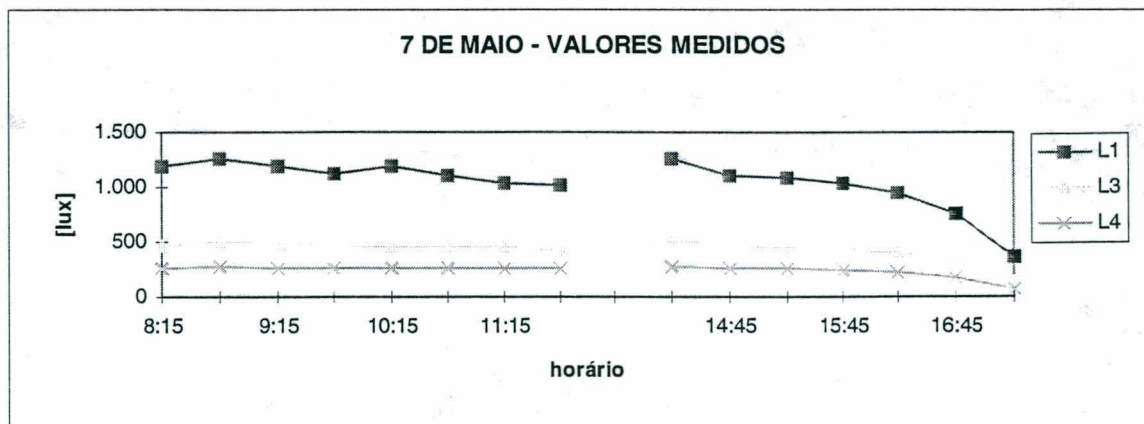


Gráfico 4.7 - Dia 7 de maio. Valores de iluminância interna em detalhe.



Pela visualização do gráfico 4.6, nota-se que neste dia foram obtidos maiores valores de iluminância horizontal externa no plano desobstruído na parte da manhã. Tal pode se dever ao fato de que neste período o céu ter apresentado maior turvamento. Os valores de iluminâncias externas em plano horizontal para este dia variaram de 9.000 a 17.000 lux aproximadamente 50% maiores do que os obtidos para o dia 24 de abril. Os valores de componente celeste obtidos em P1 apresentaram variação de 950 a 1.200 lux, em P2 de 390 a 500 lux e em P3 de 160 a 270 lux. Nota-se que os valores internos não sofreram variação tão significativa em relação ao dia 24 de abril quanto os valores de iluminâncias externos, no entanto, estes valores se apresentam aproximadamente 20% maiores que os medidos naquele dia. O efeito deste fenômeno será analisado no item a seguir.



Figura 4.22 - Dia de céu claro apresentando turvamento.

## 4.4 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item realiza-se uma comparação dos dados medidos selecionados com os valores obtidos pelo método do cálculo de contribuição de iluminação natural. Também se faz paralelamente um confronto com os resultados obtidos pela aplicação do método *Pepper Pot* afim de se verificar o grau de precisão dos diagramas DCRL.

### 4.4.1 SALA DE SUPERFÍCIES PRETAS

Para cada um dos horários de medição efetuou-se a divisão entre o valor medido pelas fotocélulas internas e o valor medido pela fotocélula externa, ambos já corrigidos, para achar o valor da CC medida em termos percentuais.

Foram usados para comparação os dados relativos aos horários mais próximos às altitudes solares de 15, 30 e 45°, uma vez que nos dias em estudo não se obtiveram alturas solares superiores a 50°, o que resulta na utilização dos diagramas de distribuição de luminâncias (DCRL) até 45°.

A seguir apresentam-se os dados medidos relativos aos horários de medição selecionados e os respectivos valores de CC calculados para cada um dos dias em análise. Salienta-se que os valores internos apresentados para a sala de superfícies pretas representam a CC, já diminuídos da CRI.

Tabela 4.12 - Valores obtidos para os pontos de medição externo  $E_p$ , pontos internos P1, P2 e P3, com os respectivos valores da CC calculada para cada um dos pontos.  
Dia 03 de maio. Céu encoberto.

Horário	8:15	9:15	11:15	15:15
E	19.688	27.186	37.181	13.003
P1 medido	2.470	2.718	3.240	1.811
P2 medido	718	815	896	455
P3 medido	361	440	454	174
P1 calculado	1475	1411	2516	1431
P2 calculado	429	423	696	359
P3 calculado	216	228	352	137

Tabela 4.13 - Valores obtidos para os pontos de medição externo  $E_p$ , pontos internos P1, P2 e P3, com os respectivos valores da CC calculada para cada um dos pontos.  
Dia 24 de abril. Céu claro - baixo turvamento<sup>5</sup>.

	8:15	9:15	10:45	15:15	16:15
E	8.376	9.371	10.731	9.381	7.926
P1 medido	848	874	841	890	840
P2 medido	362	374	366	374	350
P3 medido	182	194	195	193	176
P1 calculado	1012	933	792	949	1060
P2 calculado	432	400	345	399	442
P3 calculado	217	206	184	205	223

Tabela 4.14 - Valores obtidos para os pontos de medição externo  $E_p$ , pontos internos P1, P2 e P3, com os respectivos valores da CC calculada para cada um dos pontos.  
Dia 07 de maio. Céu claro - alto turvamento.

horário	8:15	9:15	11:45	14:45	16:15
E	16.746	19.261	12.875	12.652	8.894
P1 medido	1.087	1.086	933	1.007	876
P2 medido	427	452	431	419	404
P3 medido	235	243	239	239	226
P1 calculado	649	564	724	796	985
P2 calculado	255	235	335	331	454
P3 calculado	140	126	186	189	254

#### 4.4.1.1 Comparação entre Valores Medidos e Valores Calculados pelos Métodos

##### DCRL e *Pepper Pot*

Com o auxílio das máscaras das aberturas em projeção estereográfica apresentadas na figura 4.8, e com os diagramas apropriados a cada altura solar encontrada, efetuou-se o cálculo da CC pelo método proposto para cada um dos horários e dias selecionados. Foram traçadas máscaras das aberturas em projeção equidistante (uma vez que o método utiliza este sistema de projeção) para cálculo dos valores de CC pelo método *Pepper Pot*.

Nas tabelas 4.15 a 4.17 apresentam-se os valores obtidos para a componente celeste CC calculados com uso dos DCRL para os dias e horários selecionados. Estes valores representam a iluminância em lux obtida para um céu de iluminância total em plano horizontal de 10.000 lux.

<sup>5</sup> Verificação feita visualmente.

Tabela 4.15 - Valores de CC calculados pelo uso dos DCRLs para o dia 3 de maio, nos horários selecionados.

horário	8:15	9:15	11:45	15:45
CC - P1	1484	1484	1484	1484
CC - P2	436	436	436	436
CC - P3	178	178	178	178

Tabela 4.16 - Valores de CC calculados pelos DCRLs para o dia 24 de abril, nos horários selecionados.

horário	8:15	9:15	11:45	14:45	16:15
CC - P1	951	835	730	831	980
CC - P2	408	351	313	337	402
CC - P3	190	164	146	164	189

Tabela 4.17 - Valores de CC calculados pelos DCRLs para o dia 7 de maio, nos horários selecionados.

horário	8:15	9:15	11:45	14:45	16:15
PP1	958	822	712	807	972
PP2	406	350	312	340	400
PP3	191	164	146	165	188

Nas tabelas de 4.18 a 4.20 apresentam-se os valores obtidos para a componente celeste CC calculados pelo método *Pepper Pot* para os dias e horários selecionados. Valores multiplicados por 100 para expressar a luminância interna que se teria em sob um céu que fornecesse iluminância em plano horizontal de 10.000 lux.

Tabela 4.18 - Valores de CC calculados pelo método *Pepper Pot* para o dia 3 de maio, nos horários selecionados.

Horário	8:15	9:15	11:45	15:45
PP1	1540	1540	1540	1540
PP2	530	530	530	530
PP3	190	190	190	190

Tabela 4.19 - Valores de CC calculados pelo método *Pepper Pot* para o dia 24 de abril, nos horários selecionados.

horário	8:15	9:15	11:45	14:45	16:15
PP1	1170	1020	850	990	1160
PP2	420	360	310	340	440
PP3	200	150	160	150	200

Tabela 4.20 - Valores de CC calculados pelo método *Pepper Pot* para o dia 7 de maio, nos horários selecionados.

horário	8:15	9:15	11:45	14:45	16:15
PP1	1110	1040	1220	1010	1150
PP2	400	390	510	370	420
PP3	160	170	230	160	190

A seguir apresentamos os gráficos em que se compara os valores obtidos a partir das medições feitas com os valores calculados pelo método proposto, (pelo uso dos diagramas DCRL) e com os valores calculados pelo método *Pepper Pot*.

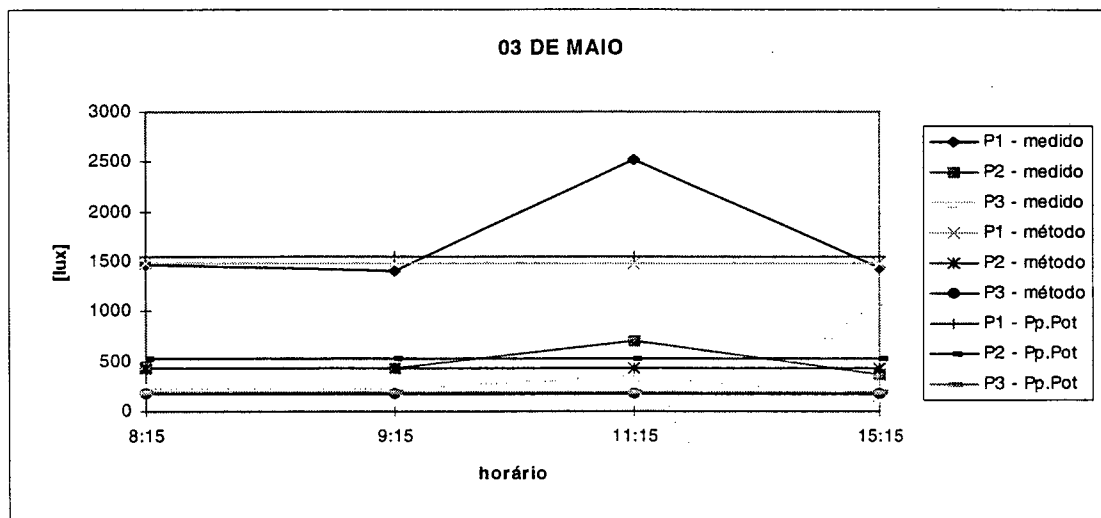


Gráfico 4.8 - Comparação entre valores calculados e medidos. Dia 03 de maio.

Na comparação obtida para o dia encoberto (dia 03 de maio), os valores calculados e os valores medidos apresentaram boa relação, com diferenças inferiores a 10% para os pontos P1 e P2 e desvios no máximo de 25% para o ponto P3, com exceção do horário de 10:30 às 11:00. O desvio ocorrido neste horário pode se dever ao eventual aparecimento do sol por trás da cobertura de nuvens. Os valores calculados pelo uso do DCRL apresentaram-se bastante semelhantes às obtidas pelo método *Pepper Pot* para os

pontos P1 e P3 com diferenças percentuais inferiores a 10% entre os valores, o DCRL com melhor comportamento em relação ao ponto P1 e o *Pepper Pot* com melhores valores para o ponto P3. Para o ponto P2, o método DCRL apresentou resultados significativamente melhores que o *Pepper Pot*, que apresentou desvio médio de 25% em relação aos valores medidos.

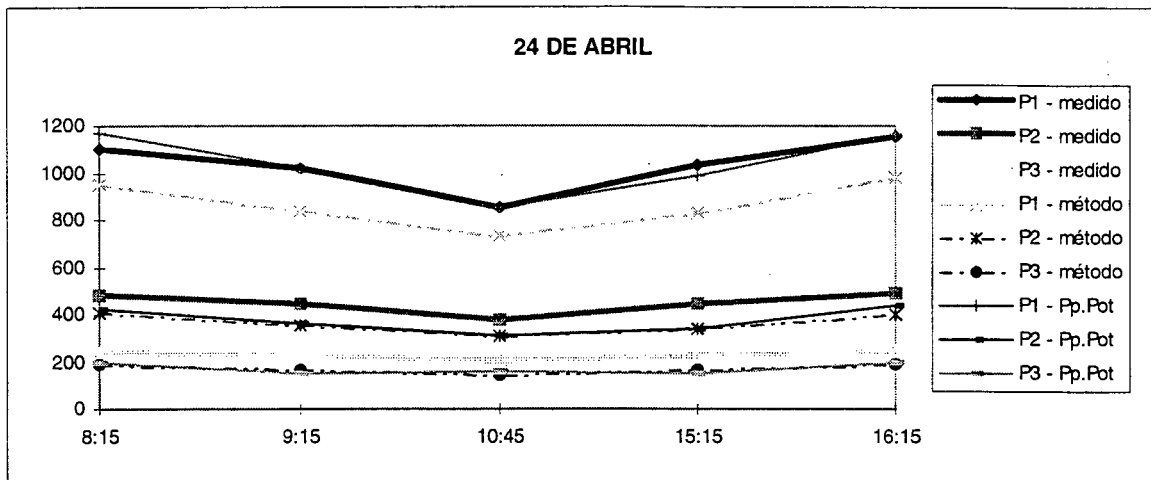


Gráfico 4.9 - Comparação entre valores calculados e medidos. Dia 24 de abril.

Na comparação obtida para o dia de céu claro com baixas taxas de turvamento (dia 24 de abril), os valores calculados e os valores medidos apresentaram diferenças médias inferiores a 10% para os pontos mais afastados da abertura de iluminação (P2 e P3). As diferenças entre os valores medidos e calculados para o ponto P1 foram da ordem de 18%.

Observou-se que o método *Pepper Pot* apresentou melhor relação com os valores medidos que o método DCRL para o ponto mais próximo à janela, mas quando se afasta da abertura, esta relação é melhor caracterizada pelo método DCRL.

Quando se compara os dados obtidos para o dia 7 de maio, com alta taxa de turvamento, tem-se que o método DCRL apresenta diferenças altas em relação aos dois primeiros horários para todos os pontos de medição (superestimando o comportamento real). No entanto para os demais horários em análise o método apresenta correlações bastante boas entre os valores medidos e calculados para o ponto P1 e P2 (com diferenças sempre inferiores a 12%). O interessante é mostrar que neste caso (com alta taxa de turvamento de céu) o método *Pepper Pot* tende a apresentar desvios ainda maiores em relação aos valores medidos.

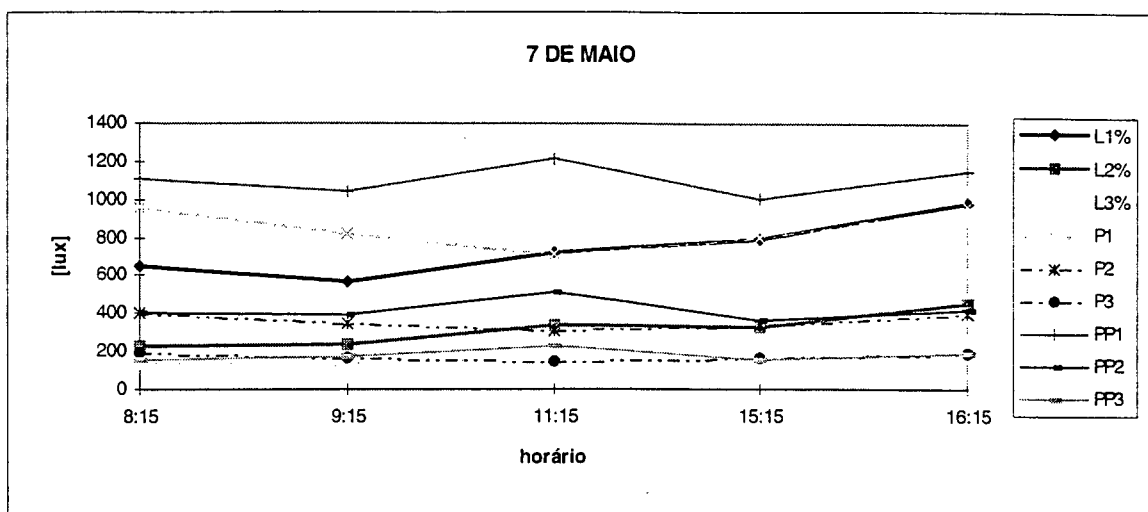


Gráfico 4.10 - Comparação entre valores calculados e medidos. Dia 07 de maio.

Ao se fazer uma análise geral dos dias mostrados acima, nota-se que o método DCRL tende a subestimar a iluminância em pontos próximos à abertura para iluminação onde se obtém os maiores valores e em que se enxerga as porções mais altas do céu. À medida em que afasta da abertura no entretanto o método tende a fornecer valores bastante próximos à realidade. Estima-se ainda que parte da diferença encontrada se deva a simplificações no cálculo da CRI, que é diminuída dos valores de medição.

#### 4.4.2 SALA DE SUPERFÍCIES BRANCAS

O objetivo de se analisar um ambiente em que todas as superfícies fossem claras, foi o de se comparar, por contraste com os valores do ambiente revestido de superfícies pretas, os valores obtidos para a componente refletida interna CRI, teórica e experimentalmente. Tal avaliação permite ainda verificar o comportamento da entrada de luz no ambiente devido à presença de superfícies com cores de maior coeficiente de reflexão.

A sala branca deste estudo possui superfícies com  $\rho_m = 0,80$ , e são consideradas como perfeitamente difusoras.

O procedimento para análise dos valores coletados foi o de se calcular um valor de CRI média para todos os horários (uma vez que estes valores apresentaram baixo desvio padrão). Para tal se toma o valor da CC medida para a sala de superfícies pretas (já corrigido em relação ao valor da CRI) como referência a partir do qual se calcula a CRI para os pontos correspondentes na sala preta.

Os valores obtidos para os dias 3 de maio, 24 de abril e 7 de maio são apresentados a seguir nas tabelas de 4.21 a 4.23.

Tabela 4.21 Valores de CRI encontrados a partir dos valores medidos para todos os horários de medição ( $CRI_{\text{médio}}$ ), com os respectivos desvios padrão, CRI calculado pelo método proposto e diferença percentual entre os valores obtidos por medição e calculados. Dia 3 de maio - céu encoberto.

	$CRI_{\text{médio}}$	Desvio Padrão	$CRI_{\text{calculado}} (A_p \times \rho)$	Diferença %
P1	0,26	0,04	0,66	<b>40</b>
P2	0,64	0,02	0,76	<b>85</b>
P3	0,75	0,02	0,78	<b>97</b>

Verifica-se que para os valores obtidos próximos à janela no dia encoberto o método tende a superestimar o valor da CRI. No entanto esta diferença cai bastante à medida em que se afasta da abertura de iluminação, apresentando diferenças de apenas 15% para o ponto P2 e de 3% para o ponto P3. Acredita-se que os valores medidos para o ponto P1 possam ter apresentado algum desvio durante as medições uma vez que para outros dias de medição (não apresentados neste trabalho) se obteve valores bastante melhores, apresentando diferenças percentuais da ordem de 84% em relação ao ponto P1.

Tabela 4.22 Valores de CRI encontrados a partir dos valores medidos para todos os horários de medição ( $CRI_{\text{médio}}$ ), com os respectivos desvios padrão, CRI calculado pelo método proposto e diferença percentual entre os valores obtidos por medição e calculados. Dia 24 de abril - céu claro.

	$CRI_{\text{médio}}$	Desvio Padrão	$CRI_{\text{calculado}} (A_p \times \rho)$	Diferença %
P1	0,61	0,02	0,67	<b>91</b>
P2	0,73	0,03	0,76	<b>96</b>
P3	0,84	0,02	0,78	<b>108</b>

Tabela 4.23 Valores de CRI encontrados a partir dos valores medidos para todos os horários de medição ( $CRI_{\text{médio}}$ ), com os respectivos desvios padrão, CRI calculado pelo método proposto e diferença percentual entre os valores obtidos por medição e calculados. Dia 7 de maio - céu claro com turvamento.

	$CRI_{\text{médio}}$	Desvio Padrão	$CRI_{\text{calculado}} (A_p \times \rho)$	Diferença %
P1	0,63	0,06	0,67	<b>95</b>
P2	0,80	0,03	0,76	<b>106</b>
P3	0,87	0,02	0,78	<b>111</b>



Verifica-se que o método tende a subestimar a CRI nos pontos próximos à abertura de iluminação e a superestimar os valores mais afastados desta. Pela avaliação dos valores encontrados para os dias de céu claro, nota-se que a diferença percentual máxima entre os valores medidos e os valores calculados para os pontos P1 e P2 é de 11%. Tal pode se dever à simplificação adotada na metodologia de cálculo que considera que toda a luz que entra no ambiente é uniformemente distribuída pelas superfícies internas acima do ponto de medição.

#### **4.5 CONSIDERAÇÕES**

Por meio deste método e da breve análise comparativa realizada, pôde-se observar a importância do tipo de céu escolhido para a análise da entrada de luz natural em ambientes internos por meio de aberturas em sua correspondência com os valores obtidos pelo método que utiliza as relações de distribuição de luminâncias padrão recomendadas pela CIE (1996).

Ressalta-se que até agora a avaliação de iluminâncias no plano de trabalho de superfícies internas tem sido feita geralmente se utilizando as distribuições de luminâncias padrão adotadas pela CIE para céus encobertos e céus claros. Entretanto estes modelos nem sempre são próximos o suficiente das condições reais de céu que podem ocorrer em diversas zonas climáticas através do mundo. Um esforço internacional vem sendo feito no sentido de se estabelecer outras distribuições de luminâncias típicas com diferentes modelos e como função de dados climáticos (CESARANO, 1996).

Segundo KITTNER (1997) - autor da fórmula de distribuição de luminâncias para céu claro utilizada neste trabalho (CIE, 1996) - a padronização adotada pela CIE adota a simplicidade e o menor número de variáveis como sua primeira prioridade. Para o autor é claro que o céu real é influenciado por inúmeras circunstâncias como mudanças na posição solar, turvamento e quantidade de poluição na atmosfera, tipo de nuvem e cobertura, bem como a distribuição das nuvens na abóboda celeste que causam várias interações entre a luz do sol e a luz do céu. Desta maneira a distribuição de luminâncias e seus níveis gerais, resultam de características da condição de céu, e das

propriedades de reflexão das partículas atmosféricas e nuvens que afetam a redistribuição do fluxo extraterrestre que chega à camada externa da atmosfera.

A classificação de céu deve não só determinar apenas os tipos de céu, mas também a faixa e a frequência de ocorrência dos níveis de iluminância em determinado local. Os céus podem ser primeiramente caracterizados em duas categorias distintas (KITTLER ET AL, 1997):

- ☞ **céus homogêneos:** claros ou turvos, enevoados ou encobertos, estes tipo de céu apresentam a mesma densidade atmosférica e transparência em todas as direções. Portanto, estes tipos de céu possuem um padrão típico de céu de distribuição espacial uniforme;
- ☞ **céus não-homogêneos:** céus parcialmente encobertos, ou com nuvens esparsas, que são caracterizados por irregularidades e distribuições desiguais, bem como diferenças aleatórias na luminâncias medida.

De acordo com KITTLER ET AL (1997), na categoria de céus homogêneos os seguintes tipos de céu foram identificados:

- > *céu encoberto escuro:* com um padrão bastante regular, concêntrico e simétrico, onde qualquer brilho do céu é excluído e a luminância de céu é bastante baixa, a gradação de luminâncias decaindo do zênite para o horizonte, na faixa de 1:0,2 a 1:0,5;
- > *céu encoberto uniforme:* possui uma distribuição de luminâncias quase constante. este tipo de ocorrência é bastante provável na presença de solos cobertos de neve;
- > *céu encoberto brilhante:* com luz solar excluída e possuindo um padrão regular concêntrico causando maiores níveis de iluminância de céu;
- > *céu encoberto brilhante com efeito da coroa solar:* possui um padrão simétrico ao meridiano solar. Isto ocorre sob camadas dispersas de nuvens ou nevoeiro, quando o sol está completamente sombreado e é relacionado a altos níveis de iluminação difusa, de acordo com a transparência da camada e a altura solar;
- > *céu altamente turvo com brilho do sol filtrado:* é caracterizado por níveis bastante altos de luz solar e de luz do céu e equivalente ou quase iguais. Este tipo de céu ocorre geralmente em regiões industriais poluídas ou sob nebulosidade uniformemente dispersa.

> *céu claro sem nuvens*: com pequena taxa de poluição. Sob este tipo de céu iluminâncias devido à luz do sol distintamente maiores são presentes enquanto os níveis de luz de céu são relativamente baixas.

Tais distinções entre as categorias e tipos de céu podem explicar as divergências encontrados nas medições realizadas neste estudo. Pôde-se verificar claramente que o tipo de céu encoberto medido se encontra perto do modelo de céu encoberto uniforme ou brilhante, com níveis de luminância mais igualmente distribuídos por toda a abóboda celeste e não segue exatamente a distribuição proposta pela CIE para céu encoberto onde as porções próximas ao zênite seriam 3 vezes mais claras que aquelas próximas ao horizonte. Os tipos de céu claro turvo e céu claro sem nuvens também foram identificados no presente estudo, apresentando resultados distintos quanto aos níveis de iluminação encontrados para  $E_c$  (iluminação de céu em plano horizontal) e quanto à distribuição das luminâncias na abóboda celeste. Tem-se que na presença de um mais alto grau de turvamento, o horizonte apresenta níveis de iluminação mais altos do que sob céu claro sem nuvens, o que faz com que as iluminâncias medidas no interior dos ambientes sejam maiores no fundo dos ambientes (quando os níveis de turvamento são maiores).

Considera-se que, pelos resultados obtidos na comparação do método DCRL com valores medidos, a precisão do método é bastante boa uma vez que este se propõe a ser um método simplificado de cálculo para utilização na fase de anteprojeto de estudo de iluminação e em dispositivos legais que tratem da entrada de luz natural em ambientes. As discrepâncias apresentadas entre os valores medidos e calculados podem ser explicadas pelas considerações feitas acima.

A vantagem em relação ao método *Pepper Pot* está na maior precisão obtida nos cálculos e pela possibilidade de integração do método em sistemas computacionais que utilizem programas gráficos. Verificou-se que o método proposto apresenta resultados semelhantes aos fornecidos pelo método *Pepper Pot* em dias de céu encoberto. Em dias de céu claro, o método proposto apresenta melhores resultados quando se tem céus com maiores taxas de turvamento, enquanto o método *Pepper Pot* apresenta melhores relações com os valores medidos em dias de céu mais claro, com menores valores de luminância de céu. Tal fato pode se dever ao alto valor de turvamento utilizado para a implementação da relação de luminâncias no método proposto com valor de 5,5 usado para localidades em regiões poluídas.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho visou criar um método gráfico que combina técnicas numéricas e gráficas para o cálculo da quantidade de iluminação em pontos de ambientes internos. O procedimento de cálculo é baseado em análises gráficas. Este método fornece resultados de forma ágil, rápida e com relativa precisão, para a utilização de projetistas na tomada de decisões iniciais de projeto.

Este método se baseou na distribuição de luminâncias de céus encobertos e claros obtida pela relação entre a luminância do zênite e a luminância de um ponto situado na abóboda celeste. Através do cálculo dos fatores de forma de uma hemisfera unitária projetada em plano horizontal, pelos quais se multiplicava esta relação de luminâncias, se obteve a relação entre a luminância de porções de céu definidas. Ao diagrama criado com estes valores relativos se denominou DCRL - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz, com o qual é possível se calcular a componente celeste, CC, em determinado ponto interno.

Foram feitas propostas para o cálculo das componentes refletidas interna (CRI) e externa (CRE), utilizando-se o mesmo procedimento de rebatimento das superfícies na hemisfera celeste proposto para o cálculo da CC. Tais procedimentos simplificados visam a obtenção de valores que forneçam uma idéia de sua influência (em relação à magnitude da CC) na Contribuição de Iluminação Natural, CIN, obtida no ponto.

Com a simulação de ambientes luminosos em fase de projeto é possível identificar situações críticas de iluminação nos planos de trabalho durante o ano, sob certas condições de céu, bem como avaliar a conformidade dos níveis encontrados às normas técnicas.

Por sua simplicidade, o método proposto é uma ferramenta bastante útil quando da proposição de normas para regulamentação de avaliações relativas à iluminação natural, devendo sua aplicabilidade ser estudada de acordo com o tipo de norma ou lei a se estruturar.

Os resultados obtidos no estudo de caso, indicam que em situação de céu encoberto o cálculo da CC as diferenças encontradas entre os valores medidos e valores calculados pelo DCRL para pontos próximos à abertura são de no máximo 10% e para pontos mais afastados são maiores, chegando a 30%. Para dias de céu claro, as diferenças médias entre valores medidos e calculados para os pontos internos do modelo em estudo foram de aproximadamente 12% (tirando-se valores extremos), as diferenças variando em relação ao tipo de céu analisado. Em relação aos céus claros, as maiores diferenças entre valores medidos e valores percentuais foram encontrados para o ponto mais afastado da abertura, de aproximadamente 20%. Tal pode se dever às simplificações adotadas no cálculo da CRI.

Para o céu mais claro sem turvamento aparente a nível visual, as foram encontradas para os dois pontos mais próximos à abertura foram de 10% em média e para o céu que apresentava turvamento aparente, se deram diferenças médias da ordem de 5% para os horários de 10:45 às 16:15 e de até 50% para os horários de 8:15 e 9:15 em relação aos pontos mais próximos à abertura. As diferenças encontrada nos primeiros dois horários de medição podem se dever à passagem eventual de nuvens que afetam fortemente os níveis de iluminação externa mas têm pouca influência sobre os níveis medidos internamente.

No cálculo de CRI, para dias encobertos se encontraram desvios maiores que no cálculo da CC, talvez devido à própria simplificação em seu cálculo imposta no método. Se encontraram diferenças de até 40% entre os valores para pontos próximos à abertura de iluminação. Para céus claros no entanto a taxa de desvio entre a CRI prevista e a medida foram de no máximo 11% em relação à média dos valores.

Ressalta-se aqui que uma parcela dos desvios encontrados pode ser devida à própria incerteza de medição, às simplificações adotadas pelo método ou à passagem de nuvens esparsas nos horários de medição (verificada especialmente quando se tem um ou mais valores que divergem dos demais).

Considera-se, pelas observações aqui feitas e pela própria diversidade dos tipos de céu, não levadas em conta neste procedimento simplificado, que a precisão do

método é boa, fornecendo resultados bastante úteis quando da comparação de diferentes sistemas de aberturas para iluminação e em relação à orientação destas aberturas.

Embora a proposta de CESARANO ET AL (1996)<sup>1</sup> seja a de se estabelecer modelos de maior precisão para a determinação da distribuição de luminâncias do que os adotados pela CIE, o próprio autor sugere que estes novos modelos devam ser utilizados em programas computacionais, juntamente com os modelos estabelecidos, o que viria a aumentar o número de céus em análise que poderiam ser usados para se levar em conta as mudanças na distribuição de intensidade da luz como função de todas as condições de insolação.

Tem-se ainda que, para a utilização de modelos computacionais mais precisos, é necessária a obtenção de dados sobre as condições de céu predominantes bem como de um conjunto de dados específicos de luminâncias medidos em determinada localidade. Infelizmente no Brasil ainda se está distante da obtenção de tais dados básicos para a implementação de ferramentas mais sofisticadas para o cálculo da distribuição de luminâncias.

A presente proposta no entanto, é a de se criar uma ferramenta de projeto simples e, por isso, com o menor número de variáveis possível. Nesse sentido acredita-se que a redução da realidade aqui imposta pela utilização dos modelos de distribuição de luminâncias da CIE (1996) seja válida e pertinente.

Ressalta-se mais uma vez que uma das vantagens da utilização deste método gráfico é a possibilidade que se cria da visualização da contribuição relativa de valores dispostos em forma de diagramas, o que traz ao projetista a vantagem de ter uma noção da quantidade relativa de luz que entra por determinada abertura sem ter que, para isto, fazer todos os cálculos.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos futuros sugere-se:

- ☞ analisar de forma mais aprofundada o método de cálculo da componente refletida interna CRI, de forma a se levar em consideração os gradientes de luminâncias que ocorrem nas superfícies à medida que se afasta da abertura de iluminação;

---

<sup>1</sup> Ver Capítulo de Estudo de Caso

- ☞ analisar de forma mais aprofundada o método de cálculo da componente refletida externa CRE, de forma a se levar em consideração de maneira mais consistente a reflexão em superfícies opostas à abertura para iluminação;
- ☞ se fazer estudos paramétricos para verificar o desempenho do método proposto em situações diversas;
- ☞ incorporar o método em forma de dispositivo da legislação construtiva concernente ao uso da iluminação natural;
- ☞ implementar os DCRL em sistema computacional de forma que o cálculo das componentes celestes seja feito automaticamente a partir de máscaras de projeção
- ☞ desenvolver um mecanismo especial para avaliação da iluminância em planos verticais em modelos que considerem condições de céu variáveis.

## 6. GLOSSÁRIO

FLUXO RADIANTE [W] - é a potência da radiação eletromagnética emitida ou recebida por um corpo. O fluxo radiante pode conter frações visíveis e não visíveis (PEREIRA, 1994 -A).

FLUXO LUMINOSO  $\Phi$  [lm] - componente de qualquer fluxo radiante que gera uma resposta visual. Sua unidade é *lumen*, definida como o fluxo emitido por uma fonte uniforme de 1 cd com 1 sr (esteradiano ou ângulo sólido). O fluxo total emitido por uma fonte de 1cd é  $4\pi$  lumens (SZOKOLAY, 1980).

EFICIÊNCIA LUMINOSA [lm/W] - habilidade da fonte em converter potência em luz. Uma fonte de luz ideal seria aquela que converteria toda sua potência (W) de entrada em luz (lm). No entanto, qualquer fonte de luz converte parte da potência em radiação infravermelha ou ultra-violeta (PEREIRA, 1994 - A).

$$\eta = \frac{\phi}{\text{potência}} \quad \text{[Equação S.1]}$$

INTENSIDADE LUMINOSA I [cd] - uma fonte de luz emite um fluxo luminoso em várias direções. A quantidade emitida em cada direção pode variar. A intensidade luminosa é a luz que se propaga numa dada direção, dentro de um ângulo sólido. Sua unidade é a candela [cd], ou lúmen/esteradiano, definida como a intensidade de um corpo negro de  $1/60 \text{ cm}^2$  de área, quando aquecido até a temperatura do ponto de fusão da platina (MOORE, 1991; SZOKOLAY, 1980). O ângulo sólido  $\omega$ , expresso em esteradianos, é uma medida do espaço tridimensional, assim como o radiano  $\theta$  é para o espaço bidimensional (PEREIRA, 1994 -A).



$$I = \frac{\phi}{\omega} \quad \text{[Equação S.2]}$$

**ILUMINÂNCIA E** [lux] -(o símbolo E vem de *éclairage*) Quando o fluxo luminoso atinge uma superfície, esta superfície é dita iluminada. Iluminância é, portanto, a densidade de fluxo luminoso recebido por uma superfície: caracteriza o efeito de iluminação produzido pela luz incidente numa só ou numa infinidade de direções. É a medida da quantidade de luz incidente numa superfície por unidade de área cuja unidade é lux = lumen/m<sup>2</sup> (iluminação é o processo; iluminância é o produto) (MOORE, 1991; SZOKOLAY, 1980).

$$E = \frac{\phi}{A} [\text{lux}] \quad \text{[Equação S.3]}$$

Como em toda radiação, a direção do fluxo luminoso é divergente em relação à fonte de luz. Uma vez que sua direção não é paralela, sua área de abrangência é maior quanto maior for a distância da fonte (ou seja, o fluxo contido em um ângulo sólido, se mantém constante com a distância). Por isso, a iluminância é uma função inversa ao quadrado da distância (MOORE, 1991; SZOKOLAY, 1980).

$$E = \frac{I}{d^2} \quad \text{[Equação S.4]}$$

**LEI DO COSSENO** - se não se considerar um elemento normal ao feixe de radiação, tem-se que a iluminação varia com o cosseno do ângulo normal à superfície e o raio de luz. Ela é máxima quando o raio é normal á superfície, ou seja, quando o ângulo de incidência  $\beta = 0^\circ$ . Em qualquer outro caso o raio de luz cobrirá uma área maior, com uma consequente redução do nível de iluminação (PEREIRA, 1994-A).

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \beta \quad \text{[Equação S.5]}$$

**LUMINÂNCIA L [cd/m<sup>2</sup>]** - quando parte da luz incidente numa superfície é refletida, esta superfície é observada como uma fonte de luz (PEREIRA, 1994 - A). Portanto, luminância é a medida do brilho de uma superfície; é a intensidade luminosa de um elemento de qualquer superfície, numa dada direção, por unidade de área perpendicular a esta direção: depende, em geral, da direção segundo a qual é observado o elemento, e varia também, geralmente, de um elemento para outro da mesma superfície. O olho humano detecta luminâncias da ordem de 1 milionésimo de cd/m<sup>2</sup> até um limite de 1 milhão de cd/m<sup>2</sup> (PRADO, 1961; SZOKOLAY, 1980).

$$L = \frac{I_{\beta}}{A'} \quad \text{[Equação S.6]}$$

Onde  $A' = A \cos \beta$ ,  $A$  é a área total da superfície,  $\beta$  é o ângulo de incidência à normal da superfície e à direção de observação, e  $I_{\beta}$  é a intensidade luminosa na direção considerada (PEREIRA, 1994 - A).

Luminância de uma superfície, seja fonte primária ou secundária de luz, é, portanto, a intensidade de luz por área aparente da superfície, a partir do ponto em que é observada. A partir da luminância do céu, pode-se quantificar o quanto de fluxo luminoso incide sobre a área de uma superfície, obtendo-se, assim, seu nível de iluminação natural (HOPKINSON, 1986).

A luminância devido a uma superfície difusa pode ser calculada por:

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi} \quad \text{[Equação S.7]}$$

onde  $\rho$  é o fator de reflexão da superfície.

**ILUMINAÇÃO ESPACIAL** - a descrição usual das condições de iluminação em termos de iluminância num dado plano, pode não descrever totalmente as condições de iluminação. Existem ambientes onde o objeto da tarefa visual é essencialmente tridimensional, nestes casos deve-se recorrer à iluminação espacial (PEREIRA, 1994 - A).

ILUMINÂNCIA ESCALAR  $E_s$  [lux]- (ou iluminância esférica média) é a iluminância média recebida de todas as direções por uma pequena esfera, ou seja, é o fluxo total incidente na esfera dividido pela área de sua superfície, medida em lux. É, então, a medida da quantidade total de luz, não importando sua direção (SZOKOLAY, 1980).

MODELOS DE CÉU - formas de representação matemática e/ou gráfica da distribuição das luminâncias de céu. Podem ser modelos para céu uniforme, encoberto, claro e parcialmente encoberto.

DISTRIBUIÇÃO DA LUMINÂNCIA NO CÉU - A iluminância decorrente da luz do céu, pode ser determinada a partir da distribuição da luminância celeste. Uma única distribuição da luminância celeste é usada para representar cada uma das condições básicas de céu. A luminância do céu é função:

- Da distribuição da relação entre a luminância de cada um dos pontos da hemisfera celeste e a luminância do zênite;
- de valores absolutos para a luminância do zênite(SCARAZZATO, 1995).

FATOR DE LUZ DIURNA (*daylight factor*) - uma vez que a iluminância no interior da edificação muda em função das condições de céu, valores de iluminância não são indicativos diretos do real desempenho da edificação. O fator de luz diurna (*DF*) é a razão da iluminância exterior pela interior sob um céu encoberto e desobstruído (medido em um plano horizontal em ambos os locais e expresso como uma percentagem), e é constante mesmo sob mudanças da luminância absoluta do céu. Tal se deve ao fato de que a distribuição em um céu uniforme é constante e não varia com o tempo. A constância do *DF* para uma edificação se aplica apenas para condição de céu encoberto; sob condição de céu claro, o *DF* pode variar de acordo com as mudanças de distribuição de luminância do céu e com a posição do sol (MOORE, 1991).

ILUMINAÇÃO PLANAR - as condições de iluminação são geralmente descritas, medidas ou especificadas em termos de iluminâncias em um dado plano, comumente o plano de trabalho horizontal; em outras palavras, nós geralmente tratamos da iluminação planar (SZOKOLAY, 1980).

OFUSCAMENTO - perturbação, desconforto ou mesmo perda de visibilidade devido a uma variação muito grande da iluminação e/ou uma velocidade muito grande. O efeito de saturação ocorre a partir de 25.000 cd/m<sup>2</sup>. O efeito de contraste ocorre caso a proporção entre as luminâncias do campo visual seja superior a 10:1.

VETOR ILUMINAÇÃO  $\Delta E_{\text{máx}}$  [lux] - é uma medida composta, possuindo uma magnitude e uma direção. Sua magnitude é a diferença máxima em iluminância entre dois pontos diametralmente opostos na superfície de uma pequena esfera. Sua direção é dada pelo diâmetro que liga os dois pontos que apresentam a diferença máxima (SZOKOLAY, 1980).

FATOR DE FORMA - é a fração da radiação deixando um elemento de superfície finita  $\delta S_1$  que chega a uma outra superfície  $S_2$  de área.

$$FF_{\delta S_1 - S_2} = \frac{\text{fluxo recebido por } S_2 \text{ vindo de } S_2}{\text{fluxo total emitido por } \delta S_2} \quad [\text{Equação S.8}]$$

Quando os elementos possuem áreas diferentes  $A_1$  e  $A_2$ , pela relação de reciprocidade se tem:  $FF_{\delta S_1 - S_2} \cdot A_1 = FF_{\delta S_1 - S_2} \cdot A_2$  finita (TREGENZA, 1993, INCROPERA, 1990).

DISCRETIZAÇÃO DA ABÓBODA CELESTE - é a subdivisão da abóboda celeste em porções definidas por ângulos horizontais e verticais. Uma discretização em porções de 6 x 24 por exemplo significa que se subdividiu a abóboda passando-se seis linhas paralelas ao plano do horizonte (com 15° de altitude cada uma) e em 24 linhas longitudinais que cortam a abóboda do zênite para o horizonte (em “fatias” de 15° de varredura azimutal).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVARES, Ana Cristina Alves, **Procedimentos para análise e avaliação da iluminação em ambientes escolares**. In Anais do ENTAC 95 - Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Volume 2, pp 587-92, Rio de Janeiro, 1995.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5413 - Iluminância de interiores**. ABNT, maio, 1991.
3. BITTENCOURT, Leonardo, **Uso das cartas solares, diretrizes para arquitetos**. Departamento de Arquitetura da UFAL, Maceió, 1988.
4. BRE. **Estimating daylight in buildings: part 1: an aid to energy efficiency**, Building Research Establishment Digest, Garston/Watford, England, May 1986.
5. CESARANO, A.; BELLIA, L.; MINICHIELLO, F.; SIBILIO, S. **Sky luminance models: sensitivity to sky-dome subdivision**. Lighting Research and Technology, Great Britain, 28 (3), pp 131-140, 1996.
6. CIE. **Spatial distribution of daylight - luminance distributions for various reference skies**. Commission Internationale de L'Eclairage, Publication CIE 110, 1994.
7. CIE STANDARD, **Spatial distribution of daylight - CIE standard overcast sky and clear sky**. Commission Internationale de L'Eclairage, Publication CIE S 003.3/E-1996, Vienna, Austria, 1996.
8. CHICHIERCHIO, Luiz Carlos, **Manual técnico de iluminação natural**, Colorplast, São Paulo, 1978.
9. COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **Daylighting in architecture - a European reference book**. Commission of the European Communities, Directorate-general XII for Science, research and development. James & James Ltd., London, 1993.

10. DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, **Normais climatológicas (1961 - 1990)**, Ministério de Agricultura e Reforma Agrária, Secretaria Nacional de Irrigação, Brasília, 1992.
11. DREYFUS, Jacques, **Le confort dans l'habitat en pays tropical**, Éditions Eyrolles, Paris, 1960.
12. ELEY ASSOCIATES. **Advanced lighting Guidelines**. U.S. Department of Energy, Energy Commission - Electric Power Research Institute. California, 1993.
13. ENARUM, D.; LITTLEFAIR, P., **Luminance models for overcast skies: assessment using measured data**, Lighting Research and Technology, vol. 27, no 1, pp 53-58, Great Britain, 1995.
14. FROTA, A. B., SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo, Editora Nobel, 1995.
15. GIRARDIN Maria C. **Iluminacion natural: método de cálculo y conceptos fundamentales**. Centro de Estudiantes de Arquitetura, Montevideo, 1994.
16. HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. **Iluminação natural**. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1975.
17. IESNA. **Lighting handbook - reference and application**, Illuminating Engineering Society of North America, 8th Edition, New York, 1993.
18. INCROPERA, F. P., WITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**, Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1990.
19. IPPUC, **Regulamento de edificações**, Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano da Prefeitura Municipal de Curitiba, Curitiba, 1969.
20. KITTLER, R.; PEREZ, R.; DARULA, S., **Sky classification Respecting Energy-efficient lighting, glare and control needs**. Journal of the Illuminating Engineering Society, 26 (1), pp 57-68, New York, winter 1997.
21. KOENIGSBERGER, O. H. et alli. **Viviendas y edificios en zonas calidas y tropicales**. Paraninfo, pp 145-180, Madrid, 1977.
22. LAM, W. M. C.; **Sunlighting - As formgiver for architecture**, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1986.

23. LI-COR, **LI-1000 DataLogger - Instruction Manual**, LI-COR inc. Publication No. 8510-0051, Lincoln, USA, 1990.
24. LI-COR, **LI-COR Radiation Sensors - Instruction Manual**, LI-COR inc. Publication No. 8609-56, Lincoln, USA, 1991.
25. LOVE, J. A., NAVVAB, M. **Daylighting estimation under real skies: a comparison of full-scale photometry, model photometry and computer simulation**. Journal of the Illuminating Engineering Society, 20 (1), pp 140-156, New York, 1991.
26. LOVE, J. A., NAVVAB, M. **The vertical-to-horizontal illuminance ratio: a new indicator of daylighting performance**. Journal of the Illuminating Engineering Society, 23 (2), pp 50-55, New York, 1993.
27. LYNES, J. A. **Principles of natural lighting**. Elsevier Publishing Company, New York, USA, 1968.
28. MIGUET, F., GROLEAU, D., MARENNE, C. **A sunlight and skylight evaluation tool for urban built forms**. PLEA 96, Building and Urban Renewal, pp 235-246, Louvain-la-Neuve, Belgium, July 16 -18, 1996.
29. MOORE Fuller. **Concepts and practice of architectural daylighting**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1991.
30. NAVVAB, M. **Scale model photometry techniques under simulated sky conditions**. Journal of the Illuminating Engineering Society, 25 (2), pp 160-172, New York, summer 1996.
31. OLGAY, Victor & OLGAY, Aladar. **Design with climates: bioclimatic approach to architectural regionalism**. Princeton University Press, 1963, 190 p.
32. PBH, **Código de obras**, Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, Belo Horizonte, 1930.
33. PEREIRA, Fernando O. R. **Luminous and thermal performance of windows shading and sunlighting reflecting devices**, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, School of Architectural Studies, University of Sheffield, Sheffield, UK, 1992.
34. PEREIRA, Fernando O. R. **Apostila do curso de especialização em engenharia de segurança do trabalho**. Centro Tecnológico - UFSC, Florianópolis, 1994. (A)
35. PEREIRA, Fernando O. R. **Uma metodologia para indicações de ocupação do ambiente urbano**, controle da obstrução do sol e da abóboda celeste. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, UFSC, Florianópolis, 1994. (B)

36. PEREIRA, Fernando O. R. **Iluminação natural no ambiente construído**, Apostila do curso ministrado durante o III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Gramado, 1995.
37. PEREIRA, Fernando O. R., MADEIRA, A. Q., XAVIER, A. A. **Iluminação natural - disponibilidade da luz natural**, Projeto Normalização em Conforto Ambiental, UFSC - FINEP, 1996. (A)
38. PEREIRA, Fernando O. R., SOUZA, R. V. G., AMARAL, M. G. V., MALTA, L. G. S. **Método de determinação da iluminação natural em ambientes internos**, Projeto Normalização em Conforto Ambiental, UFSC - FINEP, 1996. (B)
39. PHILIPPI, P.C., NICOLAU, V. P., NETO, J. A., PERIN, M.G., GÜTS, S., FERNANDES, C. P. **Procedimentos para a determinação das propriedades térmicas de materiais e elementos de edificações**, SITERPA, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 1988.
40. PLEIJEL, Gunnar. **The computation of natural radiation in architecture and town planning**. Statens Nämnd för Byggnadsforskning, Stockolm, 1954.
41. PRADO, L. Cintra. **Iluminação**, Curso ministrado na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 1961.
42. ROBBINS, Claude L. **Daylighting, design and analysis**, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1986.
43. SCARAZZATO, Paulo. **Dia de Típico de Projeto Aplicado à Iluminação Natural: dados referenciais para localidades brasileiras**. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 1995.
44. SOTERAS, Rafael Mur, **Geometria e Ilumination Natural - introducción de la iluminación natural en el processo de control gráfico del diseño**, Tesis Doctoral, ETSAB, UPC, Barcelona, España, 1985.
45. SOUZA, R. V. G. **O conforto ambiental como parâmetro de conservação de energia**. Anais do Congresso Técnico-Científico de Engenharia Civil. Florianópolis, SC. Vol. 1, pp 43-46, 1996.
46. SZOKOLAY, S. V. **Environmental science handbook**. The Construction Press, Lancaster, England, pp 77-174, 1980.
47. TREGENZA, P. R., **Daylighting algorithms**, School of Architectural Studies - University of Sheffield, Sheffield,UK, 1993.



48. TREGENZA P. R., **Mean daylight illuminance in rooms facing sunlit streets**, School of Architectural studies, The University of Sheffield, Sheffield, UK, October, 1994.
49. VALADARES, V.M. **Fundamentos da Relação entre Área de Janela e de Piso na Quantificação da Luz Natural em Interiores**, Trabalho apresentado à disciplina de Iluminação Natural, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 1995.

# ANEXO 1

## A.1 TABELA COM OS FATORES DE FORMA PARA HEMISFERA CELESTE

Tabela A.1.1 - Fatores de forma da hemisfera celeste para subdivisões de  $10^\circ \times 10^\circ$ .

	$\xi$								
âng	85	75	65	55	45	35	25	15	5
FF	0.0026	0.0076	0.0116	0.0142	0.0152	0.0142	0.0116	0.00758	0.0026

Tabela A.1.2 - Fatores de forma da hemisfera celeste para subdivisões como proposto por Tregenza.

	$\xi$							
âng	6	18	30	42	54	66	78	90
FF	4,53	12,80	23,57	27,07	34,51	40,45	44,28	34,33

## A.2 TABELAS DE CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS NA ABÓBODA CELESTE - DIVISÃO EM $10^\circ \times 10^\circ$ PARA CÉU CLARO E CÉU ENCOBERTO.

Tabela A.2.1 - Distribuição de luminâncias na abóboda celeste, altitude solar de  $15^\circ$ .

		$\xi$									
		$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz	5	30,09	29,53	16,47	8,64	4,86	2,96	1,95	1,40	1,09	1,09
	15	22,17	18,77	12,39	7,38	4,44	2,81	1,90	1,38	1,09	1,09
	25	15,19	12,24	8,65	5,76	3,79	2,55	1,80	1,35	1,09	1,09
	35	10,47	8,25	6,06	4,36	3,11	2,25	1,67	1,31	1,08	1,08
	45	7,45	5,80	4,36	3,31	2,53	1,95	1,54	1,25	1,07	1,07
	55	5,55	4,27	3,26	2,57	2,07	1,69	1,41	1,20	1,05	1,05
	65	4,35	3,32	2,55	2,07	1,73	1,48	1,29	1,14	1,04	1,04
	75	3,60	2,72	2,10	1,73	1,48	1,31	1,18	1,09	1,02	1,02
	85	3,16	2,36	1,82	1,50	1,31	1,18	1,10	1,04	1,01	1,01
	95	2,92	2,16	1,65	1,36	1,19	1,09	1,03	1,00	1,00	1,00
	105	2,82	2,07	1,56	1,28	1,12	1,02	0,98	0,97	0,98	0,98
	115	2,82	2,05	1,53	1,24	1,08	0,98	0,94	0,94	0,97	0,97
	125	2,89	2,08	1,54	1,23	1,05	0,96	0,91	0,91	0,96	0,96
	135	2,99	2,14	1,57	1,24	1,05	0,94	0,89	0,90	0,95	0,95
	145	3,11	2,21	1,61	1,26	1,05	0,93	0,88	0,88	0,94	0,94
	155	3,22	2,28	1,65	1,28	1,06	0,93	0,87	0,87	0,94	0,94
	165	3,31	2,33	1,68	1,30	1,07	0,93	0,87	0,87	0,93	0,93
175	3,35	2,36	1,69	1,31	1,07	0,93	0,87	0,86	0,93	0,93	

Tabela A.2.2 - Distribuição de luminâncias na abóboda celeste, altitude solar de  $30^\circ$ .

		$\xi$									
		$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz	5	11,68	13,05	14,85	12,04	6,75	3,91	2,41	1,60	1,15	1,15
	15	10,18	10,58	10,45	8,66	5,75	3,60	2,31	1,57	1,14	1,14
	25	8,13	7,82	7,16	6,04	4,50	3,12	2,14	1,51	1,13	1,13
	35	6,27	5,68	4,99	4,28	3,44	2,61	1,93	1,44	1,12	1,12
	45	4,83	4,19	3,59	3,11	2,63	2,15	1,71	1,36	1,10	1,10
	55	3,80	3,18	2,68	2,34	2,05	1,78	1,51	1,27	1,08	1,08
	65	3,10	2,52	2,09	1,83	1,64	1,48	1,33	1,19	1,06	1,06
	75	2,63	2,09	1,70	1,49	1,36	1,26	1,18	1,11	1,03	1,03
	85	2,34	1,81	1,45	1,26	1,16	1,10	1,06	1,03	1,01	1,01
	95	2,17	1,64	1,29	1,11	1,02	0,97	0,96	0,97	0,99	0,99
	105	2,08	1,55	1,20	1,02	0,92	0,89	0,89	0,92	0,97	0,97
	115	2,06	1,51	1,15	0,96	0,86	0,82	0,83	0,87	0,95	0,95
	125	2,09	1,50	1,13	0,92	0,82	0,78	0,79	0,84	0,93	0,93
	135	2,14	1,52	1,13	0,91	0,80	0,75	0,75	0,81	0,92	0,92
	145	2,20	1,55	1,13	0,91	0,78	0,73	0,73	0,79	0,91	0,91
	155	2,26	1,59	1,15	0,91	0,78	0,72	0,71	0,77	0,90	0,90
	165	2,31	1,61	1,16	0,91	0,77	0,71	0,70	0,76	0,89	0,89
175	2,33	1,63	1,17	0,91	0,77	0,71	0,70	0,76	0,89	0,89	

Tabela A.2.3 - Distribuição de luminâncias na abóboda celeste, altitude solar de 45°.

	$\xi$								
	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz	4,20	4,47	5,09	6,36	7,61	4,86	2,88	1,79	1,19
	3,93	4,08	4,47	5,17	5,45	4,16	2,70	1,75	1,19
	3,49	3,49	3,62	3,91	3,95	3,33	2,41	1,67	1,17
	3,00	2,87	2,83	2,92	2,91	2,62	2,09	1,56	1,15
	2,55	2,33	2,21	2,21	2,19	2,06	1,78	1,44	1,13
	2,17	1,91	1,75	1,70	1,69	1,65	1,52	1,32	1,10
	1,87	1,59	1,41	1,35	1,34	1,34	1,30	1,20	1,07
	1,66	1,36	1,18	1,11	1,10	1,11	1,12	1,10	1,04
	1,51	1,21	1,01	0,94	0,92	0,94	0,98	1,01	1,01
	1,41	1,10	0,90	0,82	0,80	0,82	0,87	0,93	0,98
	1,35	1,03	0,83	0,74	0,71	0,73	0,78	0,86	0,95
	1,33	0,99	0,78	0,68	0,65	0,66	0,72	0,81	0,93
	1,33	0,97	0,75	0,64	0,60	0,61	0,67	0,76	0,91
	1,34	0,97	0,73	0,62	0,57	0,58	0,63	0,73	0,89
	1,36	0,97	0,73	0,60	0,55	0,55	0,60	0,70	0,88
	1,38	0,98	0,72	0,59	0,54	0,53	0,58	0,68	0,87
	1,40	0,98	0,72	0,59	0,53	0,52	0,57	0,67	0,86
	1,41	0,99	0,72	0,59	0,53	0,52	0,56	0,66	0,85

Tabela A.2.4 - Distribuição de luminâncias na abóboda celeste, altitude solar de 60°.

	$\xi$								
	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz	1,49	1,48	1,58	1,90	2,51	3,49	3,24	1,96	1,23
	1,45	1,42	1,50	1,78	2,27	2,92	2,81	1,89	1,22
	1,37	1,32	1,37	1,58	1,93	2,34	2,33	1,76	1,21
	1,28	1,20	1,21	1,35	1,60	1,87	1,93	1,61	1,18
	1,17	1,07	1,05	1,14	1,31	1,50	1,60	1,45	1,15
	1,07	0,96	0,91	0,96	1,07	1,23	1,34	1,30	1,12
	0,99	0,85	0,79	0,81	0,89	1,01	1,13	1,17	1,08
	0,92	0,77	0,69	0,70	0,75	0,85	0,97	1,05	1,04
	0,86	0,71	0,62	0,61	0,65	0,73	0,84	0,95	1,01
	0,82	0,66	0,56	0,54	0,57	0,64	0,74	0,87	0,97
	0,79	0,62	0,52	0,49	0,51	0,57	0,66	0,80	0,94
	0,77	0,59	0,49	0,45	0,46	0,51	0,60	0,74	0,91
	0,76	0,58	0,47	0,42	0,43	0,47	0,56	0,69	0,89
	0,76	0,57	0,45	0,40	0,40	0,44	0,52	0,66	0,87
	0,76	0,56	0,44	0,39	0,38	0,42	0,49	0,63	0,85
	0,76	0,56	0,43	0,38	0,37	0,40	0,48	0,61	0,84
	0,76	0,55	0,43	0,37	0,36	0,39	0,46	0,60	0,83
	0,77	0,55	0,43	0,37	0,36	0,39	0,46	0,59	0,82



### A.3 TABELAS DE CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DE LUMINÂNCIA PARA DIVISÃO DE 10<sup>0</sup> EM 10<sup>0</sup>

Tabela A3.1 - Tabela de contribuição relativa de luminâncias, altitude solar de 15<sup>0</sup>.

$\alpha$		$\xi$								
		85	75	65	55	45	35	25	15	5
5		98	276	236	152	91	52	28	13	4
15		72	176	178	130	83	49	27	13	4
25		49	115	124	101	71	45	26	13	4
35		34	77	87	77	58	40	24	12	3
45		24	54	62	58	47	34	22	12	3
55		18	40	47	45	39	30	20	11	3
65		14	31	37	36	32	26	18	11	3
75		12	25	30	30	28	23	17	10	3
85	Lp / Lz	10	22	26	26	24	21	16	10	3
95	x	9	20	24	24	22	19	15	9	3
105	Fator de	9	19	22	23	21	18	14	9	3
115	Forma	9	19	22	22	20	17	13	9	3
125		9	19	22	22	20	17	13	9	3
135		10	20	22	22	20	17	13	8	3
145		10	21	23	22	20	16	13	8	3
155		10	21	24	23	20	16	13	8	3
165		11	22	24	23	20	16	12	8	3
175		11	22	24	23	20	16	12	8	3
soma =										5000

Tabela A3.2 - Tabela de contribuição relativa de luminâncias para altitude solar de 30<sup>0</sup>.

$\alpha$		$\xi$								
		85	75	65	55	45	35	25	15	5
5		44	141	247	245	146	80	40	17	4
15		38	115	173	176	125	73	38	17	4
25		31	85	119	123	98	63	36	16	4
35		24	62	83	87	74	53	32	16	4
45		18	45	60	63	57	44	28	15	4
55		14	34	45	48	44	36	25	14	4
65		12	27	35	37	36	30	22	13	4
75		10	23	28	30	29	26	20	12	4
85	Lp / Lz	9	20	24	26	25	22	18	11	4
95	x	8	18	21	23	22	20	16	11	4
105	Fator de	8	17	20	21	20	18	15	10	4
115	Forma	8	16	19	19	19	17	14	9	4
125		8	16	19	19	18	16	13	9	4
135		8	17	19	19	17	15	13	9	3
145		8	17	19	18	17	15	12	9	3
155		9	17	19	18	17	15	12	8	3
165		9	17	19	19	17	14	12	8	3
175		9	18	19	19	17	14	12	8	3
soma =										5000

Tabela A3.3 - Tabela de contribuição relativa de luminâncias, altitude solar de 45°.

		$\xi$									
		$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz x Fator de Forma		5	22	68	118	182	232	139	67	27	6
		15	21	62	104	148	166	119	63	27	6
		25	18	53	84	112	120	95	56	25	6
		35	16	44	66	83	89	75	49	24	6
		45	13	35	51	63	67	59	42	22	6
		55	11	29	41	49	52	47	35	20	6
		65	10	24	33	39	41	38	30	18	6
		75	9	21	27	32	33	32	26	17	5
		85	8	18	24	27	28	27	23	15	5
		95	7	17	21	23	24	23	20	14	5
		105	7	16	19	21	22	21	18	13	5
		115	7	15	18	19	20	19	17	12	5
		125	7	15	17	18	18	17	15	12	5
		135	7	15	17	18	17	16	15	11	5
		145	7	15	17	17	17	16	14	11	5
		155	7	15	17	17	16	15	13	10	5
	165	7	15	17	17	16	15	13	10	5	
	175	7	15	17	17	16	15	13	10	5	
soma = 5000											

Tabela A3.4 - Tabela de contribuição relativa de luminâncias, altitude solar de 60°.

		$\xi$									
		$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz x Fator de Forma		5	13	37	61	90	126	165	124	49	11
		15	13	36	58	84	114	138	108	47	11
		25	12	33	53	74	97	110	90	44	10
		35	11	30	46	64	80	88	74	40	10
		45	10	27	40	54	65	71	61	36	10
		55	9	24	35	45	54	58	51	33	10
		65	9	21	30	38	45	48	43	29	9
		75	8	19	27	33	38	40	37	26	9
		85	7	18	24	29	32	34	32	24	9
		95	7	16	22	25	28	30	28	22	8
		105	7	16	20	23	25	27	25	20	8
		115	7	15	19	21	23	24	23	19	8
		125	7	14	18	20	21	22	21	17	8
		135	7	14	17	19	20	21	20	16	8
		145	7	14	17	18	19	20	19	16	7
		155	7	14	17	18	19	19	18	15	7
	165	7	14	16	18	18	18	18	15	7	
	175	7	14	16	17	18	18	18	15	7	
soma = 5000											

Tabela A3.5 - Tabela de contribuição relativa de luminâncias, altitude solar de 75°.

	$\xi$									
	$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz x Fator de Forma	5	9	23	35	48	64	82	97	91	20
	15	9	23	34	47	63	79	92	80	20
	25	9	22	33	45	60	75	85	71	20
	35	8	21	32	43	56	69	76	63	19
	45	8	21	30	40	51	62	68	56	19
	55	8	20	29	37	47	56	61	51	18
	65	8	19	27	35	43	51	54	46	17
	75	7	18	25	32	39	46	49	41	16
	85	7	17	24	30	36	42	44	38	16
	95	7	16	22	28	33	38	40	35	15
	105	7	16	21	26	31	35	37	32	15
	115	7	15	20	25	29	33	34	30	14
	125	7	15	20	24	27	31	32	29	14
	135	7	15	19	23	26	29	31	27	14
	145	7	15	19	22	25	28	29	26	13
	155	6	14	18	21	24	27	28	26	13
	165	6	14	18	21	24	26	28	25	13
175	6	14	18	21	24	26	27	25	13	

soma = 5000

Tabela A.3.6 - Tabela de contribuição relativa de luminâncias, altitude solar de 90°.

	$\xi$									
	$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Lp / Lz x Fator de Forma	5	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	15	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	25	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	35	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	45	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	55	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	65	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	75	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	85	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	95	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	105	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	115	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	125	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	135	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	145	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	155	7	17	23	29	36	44	49	47	25
	165	7	17	23	29	36	44	49	47	25
175	7	17	23	29	36	44	49	47	25	

soma = 5000



Tabela A3.7 - Tabela de contribuição relativa de luminâncias - para céu encoberto.

	$\xi$									
	$\alpha$	85	75	65	55	45	35	25	15	5
<b>Lp / Lz</b> x Fator de Forma	5.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	15.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	25.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	35.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	45.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	55.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	65.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	75.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	85.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	95.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	105.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	115.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	125.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	135.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
	145.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11
155.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11	
165.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11	
175.00	4	16	29	42	50	51	45	30	11	
soma = 5000										









# ANEXO 2

## A.1 DIAGRAMAS COM OS FATORES DE FORMA PARA A HEMISFERA CELESTE

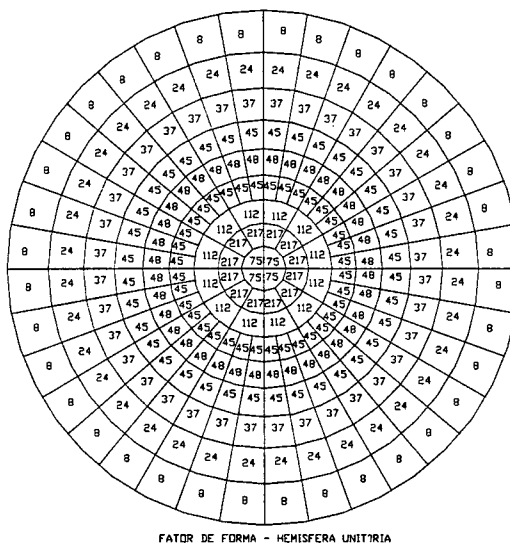


Figura A.2.1 - Diagrama com os fatores de forma da hemisfera celeste para subdivisões de 10° x 10°.

## A.2 DIAGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS PARA CÉU CLARO E CÉU ENCOBERTO - DIVISÃO EM 10° x 10°

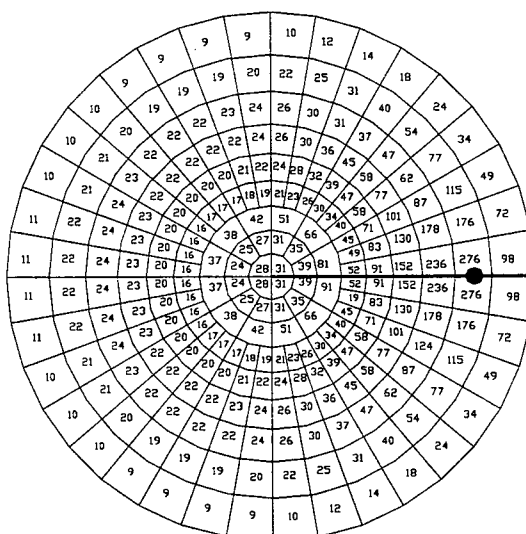


Figura A.2.2 - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu claro,  
altitude solar de  $15^{\circ}$ .

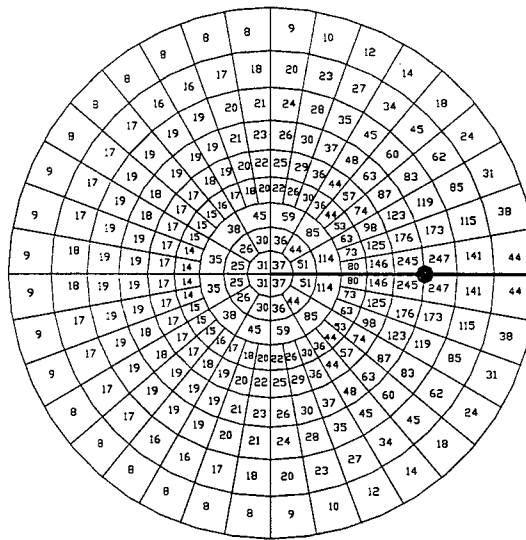


Figura A.2.3 - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu claro,  
altitude solar de  $30^{\circ}$ .

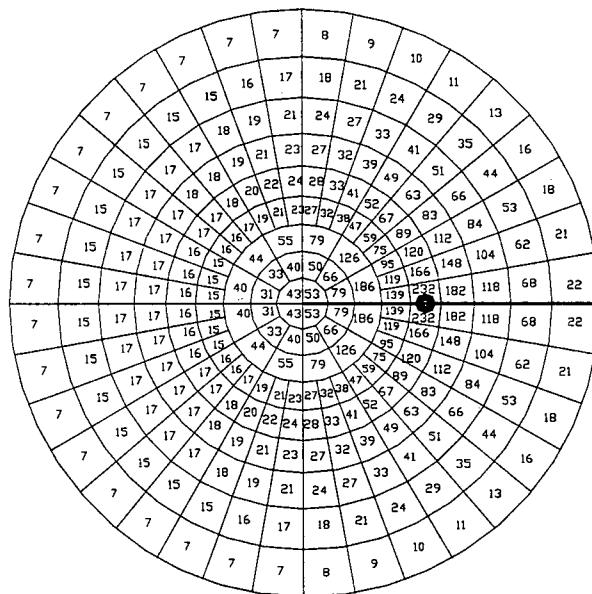


Figura A.2.4 - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu claro,

altitude solar de 45°.

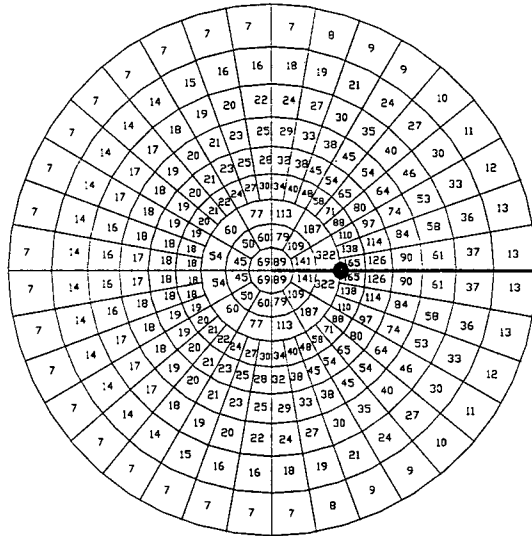


Figura A.2.5 - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu claro, altitude solar de 60°.

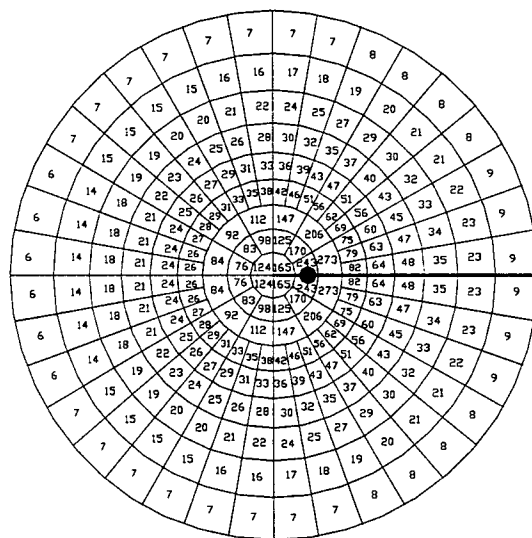


Figura A.2.6 - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu claro, altitude solar de 75°.



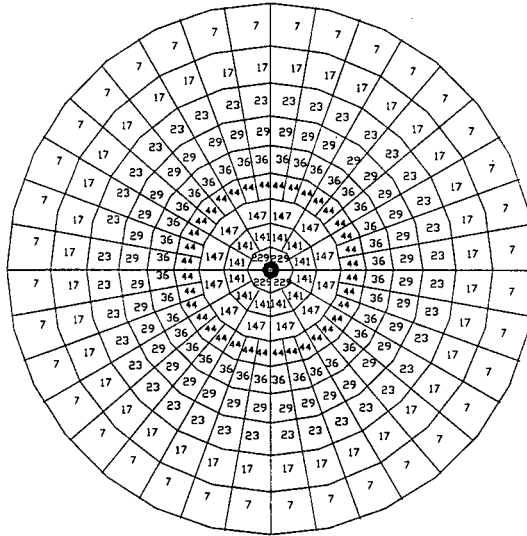
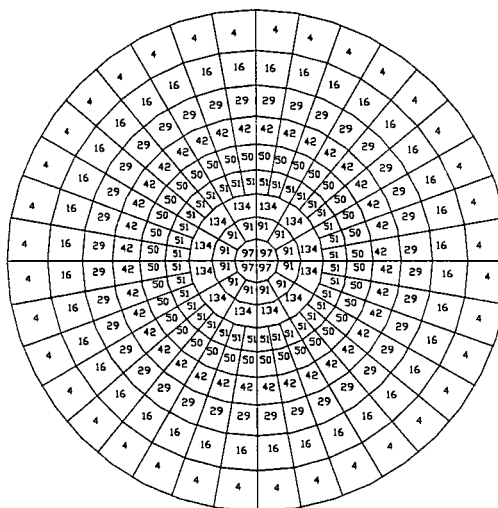


Figura A.2.7 - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu claro, altitude solar de 90°.



CIU ENCOBERTO

Figura A.2.8 - Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu encoberto.

## ANEXO 3

### TABELAS DE CÁLCULO DA HORA SOLAR CORRIGIDA, DECLINAÇÃO, ALTITUDE E ALTITUDE SOLAR, E CORREÇÃO DEVIDO AO ANEL DE SOMBREAMENTO PARA OS DIAS DE MEDIÇÃO.

Tabela A1 - Cálculo da declinação do sol, hora solar corrigida, azimute e altura solar e fator de correção g devido ao anel de sombreamento para o dia 29 de abril.

mes	dia	valor num	declinação	Xh	
4	29	90	14.508109	0.0449	
hora	hora	hora solar corrigida	altitude solar	azimute solar	sombr. céu claro
8:15	8.25	8.07	19	61	1.1841
8:45	8.75	8.57	25	57	1.1909
9:15	9.25	9.07	30	51	1.1946
9:45	9.75	9.57	35	45	1.1959
10:15	10.25	10.07	40	37	1.1952
10:45	10.75	10.57	43	29	1.1933
11:15	11.25	11.07	46	20	1.1911
11:45	11.75	11.57	48	9	1.1895
14:15	14.25	14.07	38	-40	1.1955
14:45	14.75	14.57	34	-47	1.1957
15:15	15.25	15.07	29	-53	1.1938
15:45	15.75	15.57	23	-58	1.1892
16:15	16.25	16.07	17	-63	1.1815
16:45	16.75	16.57	11	-67	1.1703
17:15	17.25	17.07	5	-71	1.1555

Tabela A2 - Cálculo da declinação do sol, hora solar corrigida, azimute e altura solar e fator de correção g devido ao anel de sombreamento para o dia 03 de abril.

mês	dia	valor num	declinação	Xh	g encob.
5	3	120	15.824477	0.05293	1.1142
hora	hora	hora solar corrigida	altitude solar	azimute solar	
8:15	8.25	8.08	19	60	
8:45	8.75	8.58	24	55	
9:15	9.25	9.08	29	50	
9:45	9.75	9.58	34	44	
10:15	10.25	10.08	39	36	
10:45	10.75	10.58	42	28	
11:15	11.25	11.08	45	19	
11:45	11.75	11.58	46	9	
14:15	14.25	14.08	37	-39	
14:45	14.75	14.58	33	-46	
15:15	15.25	15.08	28	-52	
15:45	15.75	15.58	22	-57	
16:15	16.25	16.08	17	-62	
16:45	16.75	16.58	11	-66	
17:15	17.25	17.08	5	-70	

Tabela A3 - Cálculo da declinação do sol, hora solar corrigida, azimute e altura solar e fator de correção g devido ao anel de sombreamento para o dia 07 de abril.

mês	dia	valor num	declinação	Xh	
5	7	120	16.970536	0.05848	
hora	hora	hora solar corrigida	altitude solar	azimute solar	sombr. céu claro
8:15	8.25	8.09	18	59	1.1801
8:45	8.75	8.59	23	54	1.1873
9:15	9.25	9.09	29	49	1.1919
9:45	9.75	9.59	33	43	1.1942
10:15	10.25	10.09	38	35	1.1947
10:45	10.75	10.59	41	27	1.1941
11:15	11.25	11.09	44	18	1.1930
11:45	11.75	11.59	45	8	1.1921
14:15	14.25	14.09	36	-38	1.1947
14:45	14.75	14.59	32	-45	1.1936
15:15	15.25	15.09	27	-51	1.1906
15:45	15.75	15.59	22	-56	1.1852
16:15	16.25	16.09	16	-61	1.1769
16:45	16.75	16.59	10	-65	1.1656
17:15	17.25	17.09	4	-69	1.1510

# ANEXO 4

## GRÁFICOS DE CALIBRAÇÃO DOS FOTSENSORES MEGRATRON

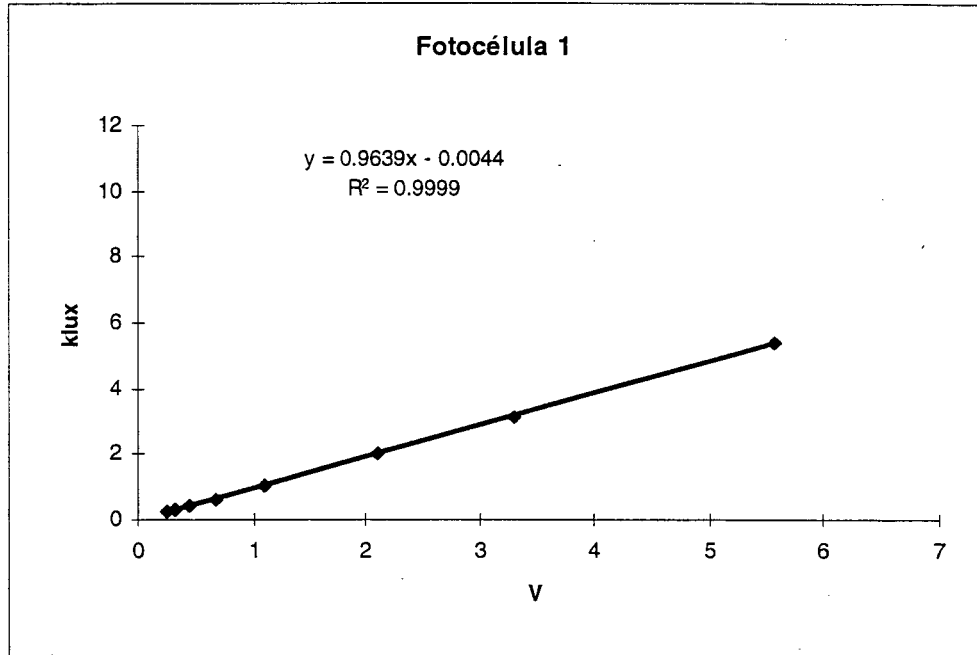


Figura A4-1 Reta de calibração da fotocélula 1, da Megatron

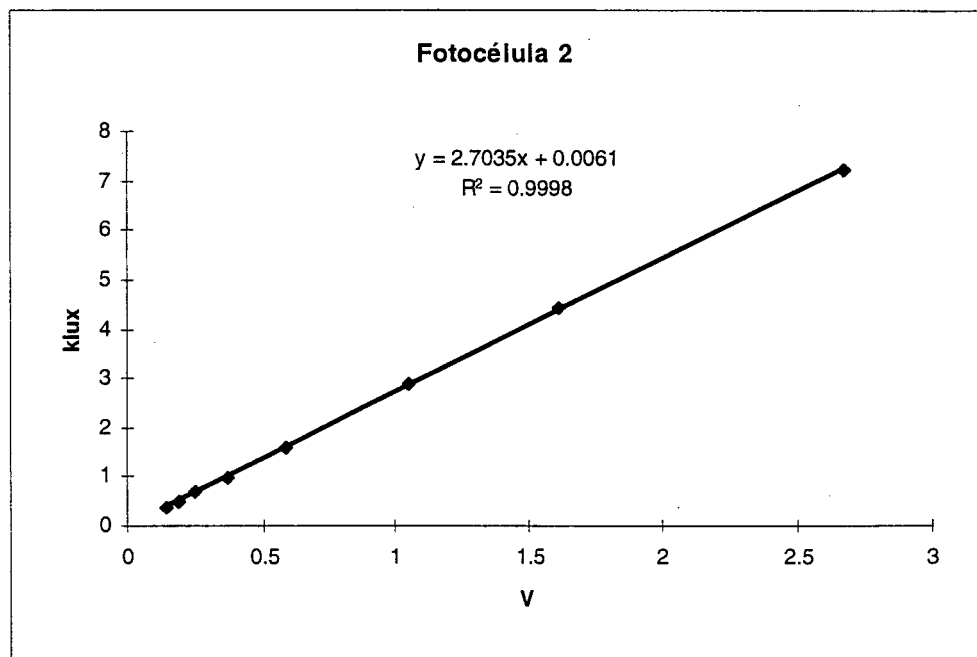


Figura A4-2 Reta de calibração da fotocélula 2, da Megatron

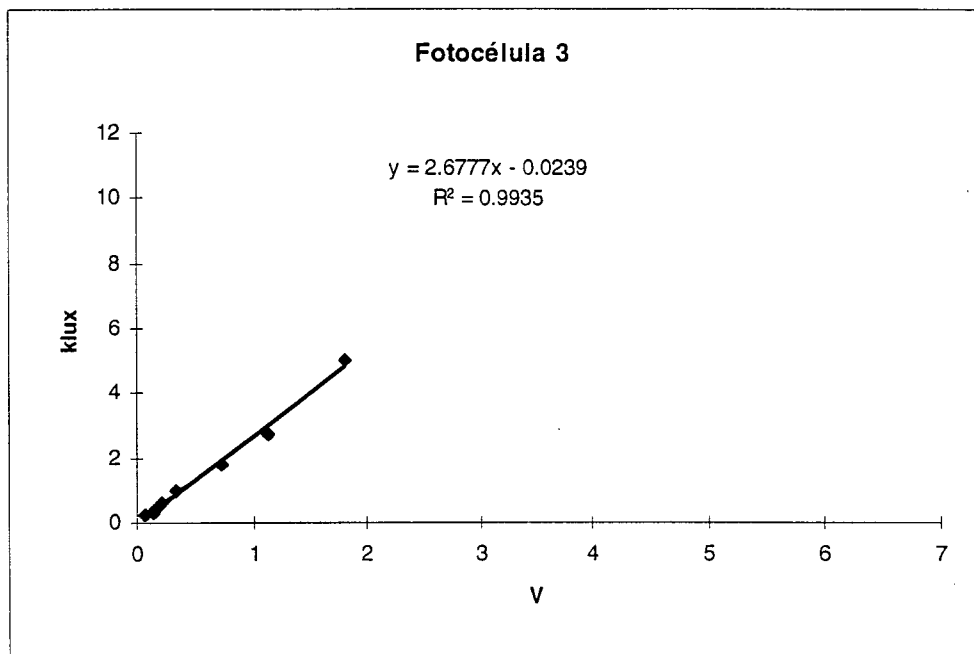


Figura A4-3 Reta de calibração da fotocélula 3, da Megatron

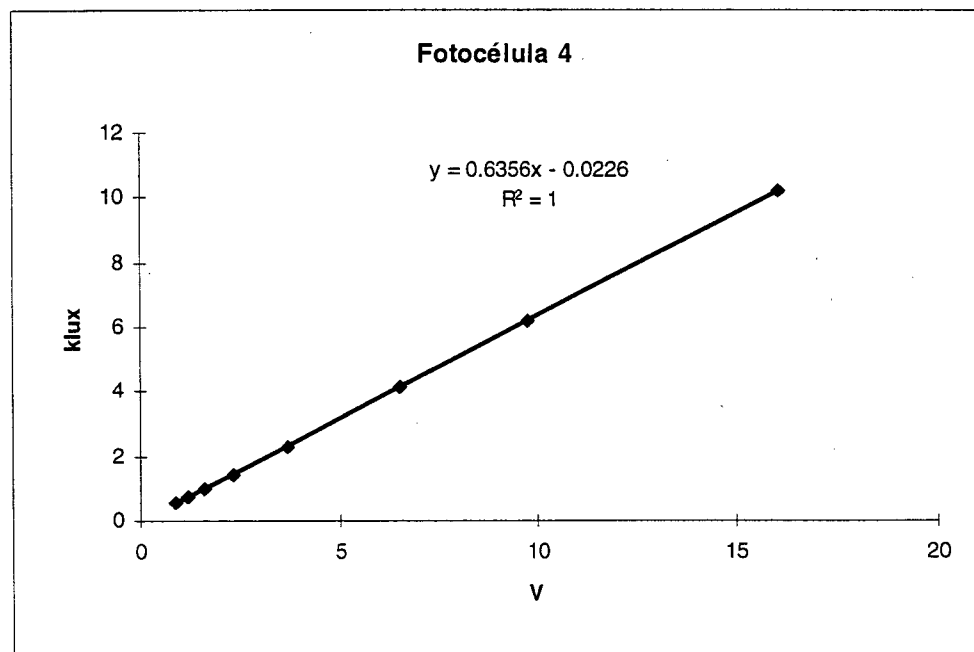


Figura A4-4 Reta de calibração da fotocélula 4, da Megatron

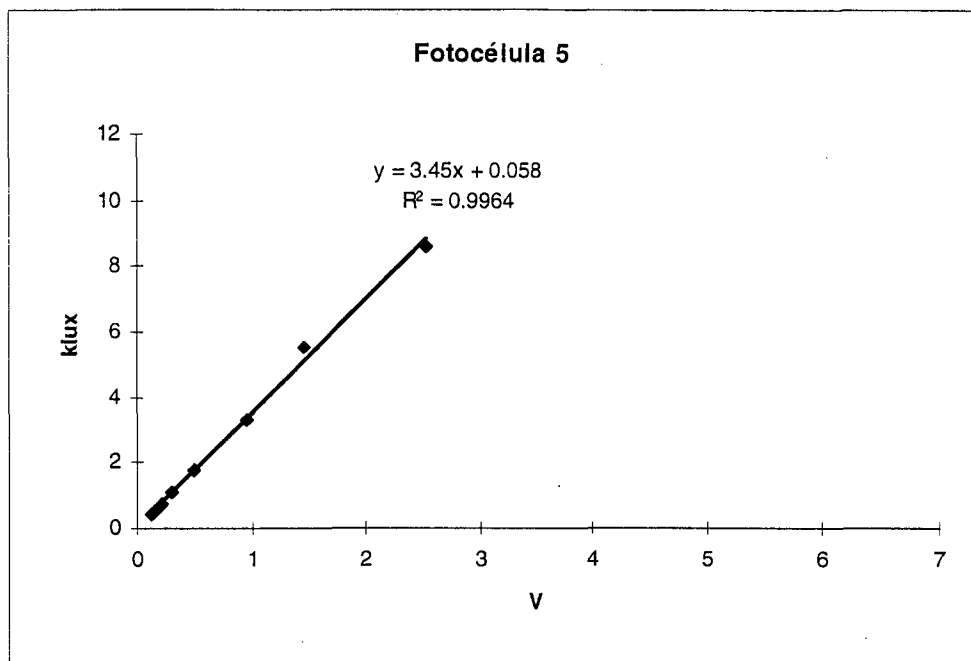


Figura A4-5 Reta de calibração da fotocélula 5, da Megatron

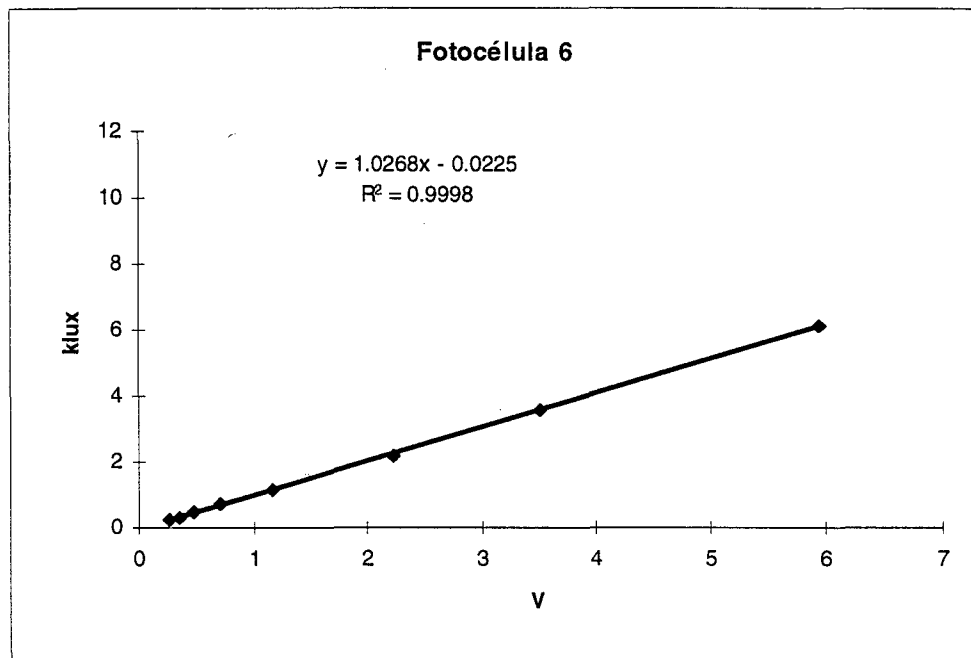


Figura A4-6 Reta de calibração da fotocélula 6, da Megatron

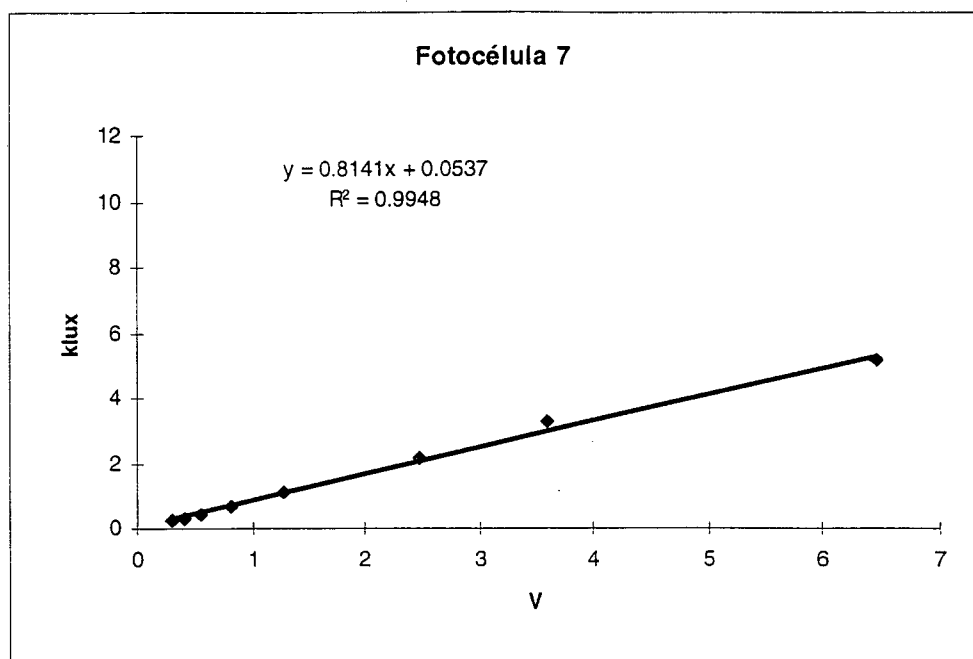


Figura A4-7 Reta de calibração da fotocélula 7, da Megatron

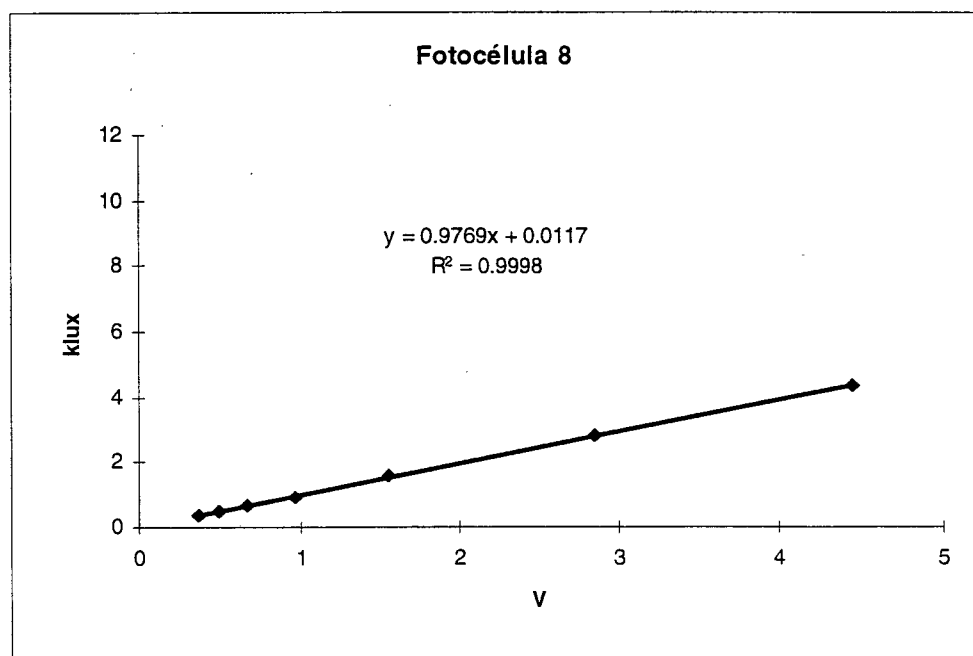


Figura A4-8 Reta de calibração da fotocélula 8, da Megatron

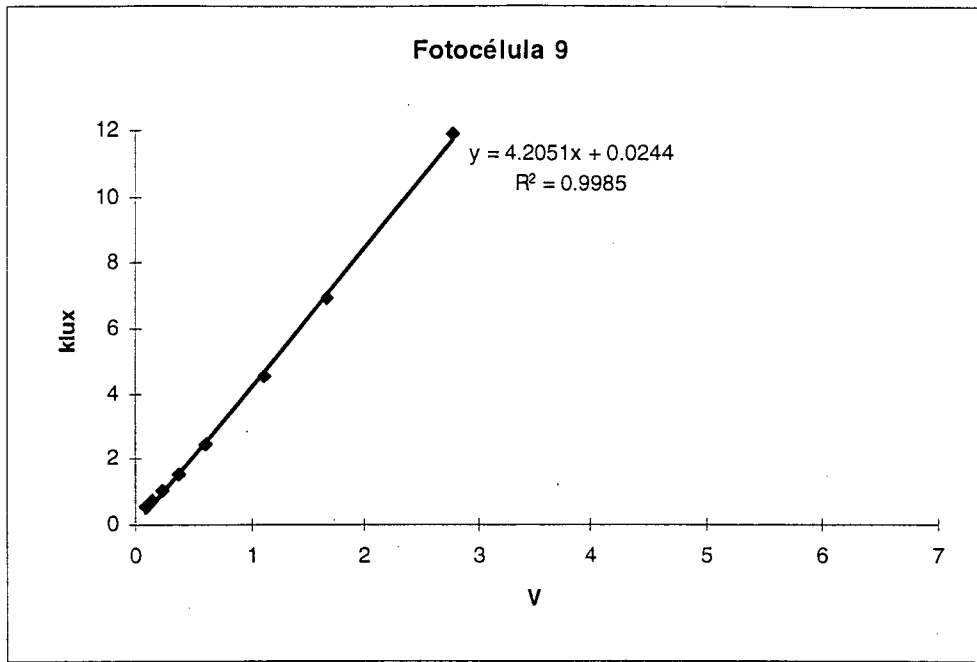


Figura A4-9 Reta de calibração da fotocélula 9, da Megatron