

**ILUMINAÇÃO NATURAL POR ABERTURAS ZENITAIS
COM ELEMENTOS DE CONTROLE**

Solange Maria Leder Zeilmann

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de mestre em engenharia de produção e sistemas.

Área de concentração: Ergonomia

Orientador: Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Phd

Florianópolis

1999

ILUMINAÇÃO NATURAL POR ABERTURAS ZENITAIS COM ELEMENTOS DE CONTROLE

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS.

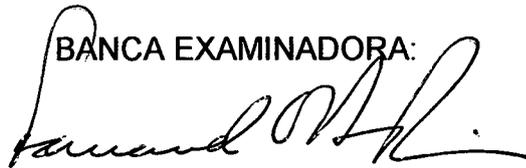
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ERGONOMIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS



Ricardo Miranda Barcia - Ph.D.

BANCA EXAMINADORA:



Fernando O. R. Pereira - Ph. D.

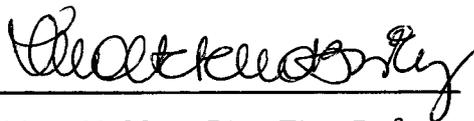
Orientador



Roberto Lamberts - Ph. D.



Sílvia R. M. Corrêa - Dr^a.



Vera H. Moro Bins Ely - Dr^a.

Aos meus pais e ao

Rodrigo

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Hercilio Paulino Ledra e Rosa Ledra, pelo infinito amor e apoio recebido nesses anos todos.

Ao Rodrigo Panosso Zeilmann, pelo amor e carinho, pelas horas de apoio e incentivo e por estar ao meu lado.

Ao professor e orientador Dr. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, pelo exemplo, dedicação, apoio e orientação no trabalho.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Aos professores membros da banca Dr. Roberto Lamberts, Dr^a. Silvia R. M. Corrêa e Dr^a. Vera H. Moro Bins Elly. Especialmente à prof^a. Dr^a. Sílvia por gentilmente ter cedido seu material de consulta.

Ao amigo e ex-prof. Ilson Wilmar Rodrigues Filho pelo incentivo inicial.

Agradecimentos especiais à colega de mestrado Arq. Angela Pogere pela amizade, companheirismo e apoio.

Ao colega de mestrado Arq. Sigfrido Graziano Júnior, aos colegas do LabCon: Arq. Adriano Kremer, Arq. Alexandre de Souza Freire, Arq. Luiz Kuchenbecker, Eng. Marcos Barros de Souza, ao colega do LabEE M. Eng. Aldomar Pedrini, ao colega do LabMicro Elcio Silva.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO	
1.1 JUSTIFICATIVA	02
1.2 HIPÓTESES	03
1.3 VARIÁVEIS DO ESTUDO.....	04
1.4 OBJETIVOS.....	05
1.4.1 Objetivos Específicos.....	05
1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	05
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	06
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 LUZ NATURAL.....	07
2.1.2 A Iluminação Natural e o Homem.....	08
2.1.2.1 Visão e contato com o exterior.....	09
2.1.2.2 Benefícios psicológicos e fisiológicos para os usuários.....	09
2.1.2.3 Elemento arquitetônico e estético.....	10
2.1.2.4 Qualidade da luz natural	11
2.1.2.5 Economia de energia.....	12

2.1.3 As Fontes de Luz Natural e sua Disponibilidade.....	12
2.1.4 Trajetória Aparente do Sol.....	14
2.2 OS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL.....	16
2.2.1 Os Sistemas de Iluminação Natural Passivos e Ativos.....	19
2.2.2 Os Componentes de Passagem Zenital.....	22
2.2.2.1 Histórico.....	23
2.2.2.2 Tipologia dos componentes de passagem zenital.....	28
2.2.2.3 Análises sobre aberturas zenitais.....	31
2.2.3 Os Elementos de Controle da luz Solar Direta	35
2.2.3.1 Elementos de controle inovativos.....	39
2.2.3.2 Análises sobre os elementos de controle	41
2.3 MÉTODOS E PARÂMETROS DE ANÁLISE DA LUZ NATURAL.....	49
2.3.1 Métodos de Previsão do Comportamento da Luz Natural.....	49
2.3.2 Os Parâmetros de Análise.....	53
2.3.2.1 Iluminâncias e fator de luz do dia.....	54
2.3.2.2 Distribuição dos níveis e iluminação	54
2.4 CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO.....	57
3. METODOLOGIA	
3.1 O MODELO DE ESTUDO.....	59
3.1.1 Características Físicas do Modelo de Estudo.....	60
3.1.2 Tipologia das Aberturas Zenitais.....	61
3.1.3 Os Elementos de Controle da Luz Solar Direta	62
3.1.4 Situação Geográfica e Orientação	64

3.1.5 Época do Ano e Condição do Céu.....	64
3.2 ESTUDO PILOTO COM MEDIÇÕES EM ESCALA REDUZIDA.....	65
3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COM O MODELO DE ESTUDO	68
3.3.1 Acesso aos Dados Referentes ao Cálculo da Iluminação Final	71
3.3.2 Os Parâmetros de Desempenho.....	72
4 RESULTADOS E ANÁLISES	
4.1 ANÁLISES SOBRE O ESTUDO PILOTO COM MEDIÇÕES EM ESCALA REDUZIDA.....	74
4.1.1 O Nível de Iluminação Externo.....	74
4.1.2 Iluminância Média no Ambiente Interno.....	76
4.1.3 Comparação entre a Distribuição dos Níveis de Iluminação Internos.....	78
4.1.4 Localização dos Níveis Máximos e Mínimos.....	80
4.2 ANÁLISE SOBRE OS RESULTADOS COM A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O MODELO DE ESTUDO	82
4.2.1 Abertura Monitor - Níveis de Iluminação Médios.....	82
4.2.2 Abertura Monitor - Níveis Máximos e Mínimos.....	84
4.2.3 Abertura Lucernário - Níveis de Iluminação Médios.....	86
4.2.4 Abertura Lucernário - Níveis Máximos e Mínimos.....	88
4.2.5 Abertura Monitor - Diversidade e Uniformidade.....	90
4.2.5 Abertura Lucernário - Diversidade e Uniformidade.....	92
4.2.7 Análises sobre as Curvas Isolux.....	94
4.2.7.1 Abertura Monitor - Curvas Isolux.....	94
4.2.7.2 Abertura Lucernário - Curvas Isolux.....	101

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	107
5.1 CONCLUSÕES	107
5.2 RECOMENDAÇÕES DE PROJETO.....	111
5.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	112
5.4 SUGESTÕES.....	113
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Relação das variáveis simuladas.....	71
TABELA 3.2	Classificação dos intervalos isolux.....	73
TABELA 4.1	Abertura monitor - Comparação dos níveis de iluminação médios.....	84
TABELA 4.2	Abertura monitor - Comparação dos máximos níveis de iluminação.....	85
TABELA 4.3	Abertura monitor - Comparação dos mínimos níveis de iluminação.....	86
TABELA 4.4	Abertura lucernário - Comparação dos níveis de iluminação médios.....	88
TABELA 4.5	Abertura lucernário - Comparação dos máximos níveis de iluminação.....	89
TABELA 4.6	Abertura lucernário - Comparação dos mínimos níveis de iluminação.....	90

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Representação esquemática do comportamento da luz ao incidir sobre uma superfície de controle interna e externa, abertura monitor.....	04
FIGURA 2.1	Capela Ronchamp, Le Corbusier	11
FIGURA 2.2	Desenho esquemático com uma projeção eqüidistante da abóboda celeste sobre um plano dimensional, o diagrama solar...	15
FIGURA 2.3	Exemplo do Diagrama solar eqüidistante com a trajetória aparente do sol.....	15
FIGURA 2.4	Exemplo de átrio, Londres.....	16
FIGURA 2.5	Abertura lateral e abertura zenital.....	17
FIGURA 2.6	Cobertura translúcida.....	18
FIGURA 2.7	Sistema de iluminação natural ativo.....	20
FIGURA 2.8	Sistema de iluminação natural no Museu de Chicago.....	20
FIGURA 2.9	Escola Valongo.....	21
FIGURA 2.10	Cobertura de uma casa de banho na Turquia.....	23
FIGURA 2.11	Detalhe de sistema de iluminação zenital no Antigo Egito.....	24
FIGURA 2.12	Panteon, Roma.....	25
FIGURA 2.13	Bazar Persa.....	25
FIGURA 2.14	Cobertura em ferro e vidro, pavilhão de exposições em Paris.....	26
FIGURA 2.15	Vista da cobertura do museu Sir John Soane, London.....	27

FIGURA 2.16	Sistemas zenitais diretamente e parcialmente voltados para o zênite.....	28
FIGURA 2.17	Abertura zenital tipo cobertura transparente.....	29
FIGURA 2.18	Abertura tipo dente de serra.....	29
FIGURA 2.19	Abertura tipo monitor.....	30
FIGURA 2.20	Vista interna de uma abertura tipo lanternin.....	30
FIGURA 2.21	Corte esquemático de modelo com variação de forro em abertura zenital.....	32
FIGURA 2.22	Corte esquemático de tipologias de aberturas zenitais.....	34
FIGURA 2.23	Reflexão especular e difusa.....	36
FIGURA 2.24	Elemento flexível tipo toldo, Montevidéo.....	37
FIGURA 2.25	Elemento fixo, rígido e externo, Montevidéo.....	37
FIGURA 2.26	Elemento filtrante, tipo veneziana.....	38
FIGURA 2.27	Elemento obstrutivo, tipo cortina.....	38
FIGURA 2.28	Redirecionamento da luz através de vidro prismático.....	39
FIGURA 2.29	Detalhe do funcionamento de uma veneziana espelhada.....	40
FIGURA 2.30	Prateleira de luz ou “light-shelves”.....	41
FIGURA 2.31	Aberturas zenitais com elementos de controle.....	42
FIGURA 2.32	Abertura zenital lucernário com captador solar.....	43
FIGURA 2.33	Abertura zenital com dispositivo de controle interno.....	43
FIGURA 2.34	Abertura lucernário com dispositivo de controle interno.....	44
FIGURA 2.35	Abertura monitor com dispositivo de controle externo.....	45
FIGURA 2.36	Variações na geometria de alguns elementos de controle interno.	45

FIGURA 2.37	Abertura lateral com elementos de controle externo em diferentes tipologias.....	46
FIGURA 2.38	Abertura lucernário com elemento de controle.....	47
FIGURA 2.39	Abertura zenital diretamente para o zênite com elemento de controle interno.....	48
FIGURA 2.40	Curvas isolux em forma de linhas de contorno, bidimensional.....	56
FIGURA 2.41	Curvas isolux em formato de escala de cores, tridimensional.....	56
FIGURA 3.1	Planta baixa do modelo.....	60
FIGURA 3.2	Corte longitudinal do modelo.....	60
FIGURA 3.3	Abertura Monitor.....	61
FIGURA 3.4	Abertura Lucernário.....	61
FIGURA 3.5	Corte e detalhe da abertura lucernário com controle interno.....	63
FIGURA 3.6	Corte e detalhe da abertura lucernário com controle externo.....	63
FIGURA 3.7	Corte e detalhe da abertura monitor com controle interno.....	63
FIGURA 3.8	Corte e detalhe da abertura monitor com controle externo.....	63
FIGURA 3.9	Trajetória solar, orientação norte e leste, solstício de inverno e verão, 10:00h.....	64
FIGURA 3.10	Foto dos aparelhos de aquisição de dados.....	66
FIGURA 3.11	Foto do local das medições com a maquete e os aparelhos de aquisição.....	67
FIGURA 3.12	Visualização da tela do programa Lightscape em fase de especificação das características físicas do modelo de estudo.....	69
FIGURA 3.13	Visualização da tela do programa Lightscape com relação das	

	iluminâncias sobre plano de referência no modelo de estudo.....	70
FIGURA 4.1	Gráfico com os níveis de iluminação externos em 06/março.....	75
FIGURA 4.2	Gráfico com os níveis de iluminação externos em 08/março.....	76
FIGURA 4.3	Gráfico com a iluminância média nas medições em escala.....	77
FIGURA 4.4	Gráfico comparativo entre a iluminância média, 06/03.....	77
FIGURA 4.5	Gráfico comparativo da diversidade, 06/março, monitor.....	79
FIGURA 4.6	Gráfico comparativo da uniformidade, 06/março, monitor.....	79
FIGURA 4.7	Gráfico comparativo da diversidade, 08/março, lucernário.....	79
FIGURA 4.8	Gráfico comparativo da uniformidade, 08/março, lucernário.....	80
FIGURA 4.9	Iluminâncias, monitor, 06/03 às 10:30h.....	81
FIGURA 4.10	Iluminâncias, monitor, 06/03 às 11:00h.....	81
FIGURA 4.11	Iluminâncias, lucernário, 08/03 às 10:30h.....	81
FIGURA 4.12	Iluminâncias, lucernário, 08/03 às 11:00h.....	81
FIGURA 4.13	Abertura monitor - gráfico da variação na média dos níveis de iluminação.....	83
FIGURA 4.14	Abertura monitor - gráfico da variação dos máximos e mínimos níveis de iluminação.....	85
FIGURA 4.15	Abertura lucernário - gráfico da variação na média dos níveis de iluminação.....	87
FIGURA 4.16	Abertura lucernário - gráfico da variação dos máximos e mínimos níveis de iluminação.....	89
FIGURA 4.17	Abertura monitor - gráfico da diversidade.....	91
FIGURA 4.18	Abertura monitor - gráfico da uniformidade.....	91

FIGURA 4.19	Abertura lucernário - gráfico da diversidade.....	92
FIGURA 4.20	Abertura lucernário - gráfico da uniformidade.....	93
FIGURA 4.21	Gráfico isolux abertura monitor/controlado externo - 21/06 céu claro	95
FIGURA 4.22	Gráfico isolux abertura monitor/controlado interno - 21/06 céu claro.	95
FIGURA 4.23	Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/06 céu claro.....	95
FIGURA 4.24	Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias, abertura monitor/controlado externo - 21/06 céu claro.....	96
FIGURA 4.25	Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias, abertura monitor/controlado interno - 21/06 céu claro.....	97
FIGURA 4.26	Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias, abertura monitor/sem controle - 21/06 céu claro.....	97
FIGURA 4.27	Gráfico isolux abertura monitor/controlado externo - 21/06 céu encoberto.....	98
FIGURA 4.28	Gráfico isolux abertura monitor/controlado interno - 21/06 céu encoberto.....	98
FIGURA 4.29	Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/06 céu encoberto.....	98
FIGURA 4.30	Gráfico isolux abertura monitor/controlado externo - 21/12 céu claro	99
FIGURA 4.31	Gráfico isolux abertura monitor/controlado interno - 21/12 céu claro.	99
FIGURA 4.32	Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/12 céu claro.....	99
FIGURA 4.33	Gráfico isolux abertura monitor/controlado externo - 21/12 encoberto.....	100
FIGURA 4.34	Gráfico isolux abertura monitor/controlado interno - 21/12 céu	

	encoberto.....	100
FIGURA 4.35	Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/12 céu encoberto.....	100
FIGURA 4.36	Gráfico isolux abertura lucernário/controle externo - 21/06 céu claro.....	101
FIGURA 4.37	Gráfico isolux abertura lucernário/controle interno - 21/06 céu claro.....	101
FIGURA 4.38	Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/06 céu claro.	101
FIGURA 4.39	Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias, abertura lucernário/controle externo - 21/06 céu claro.....	102
FIGURA 4.40	Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias, abertura lucernário/controle interno - 21/06 céu claro.....	103
FIGURA 4.41	Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias, abertura lucernário/sem controle - 21/06 céu claro.....	103
FIGURA 4.42	Gráfico isolux abertura lucernário/controle externo - 21/06 céu encoberto.....	104
FIGURA 4.43	Gráfico isolux abertura lucernário/controle interno - 21/06 céu encoberto.....	104
FIGURA 4.44	Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/06 céu encoberto.....	104
FIGURA 4.45	Gráfico isolux abertura lucernário/controle externo - 21/12 céu claro.....	105
FIGURA 4.46	Gráfico isolux abertura lucernário/controle interno - 21/12 céu	

claro.....	105
FIGURA 4.47 Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/12 céu claro	105
FIGURA 4.48 Gráfico isolux abertura lucernário/controle externo - 21/12 céu encoberto	106
FIGURA 4.49 Gráfico isolux abertura lucernário/controle interno - 21/12 céu encoberto.....	106
FIGURA 4.50 Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/12 céu encoberto.....	106

RESUMO

A necessidade atual de economia de energia e a busca pelo conforto e bem estar do homem tem aumentado o interesse pelo uso da iluminação natural nos ambientes internos.

As aberturas zenitais são atraentes pois proporcionam maiores iluminâncias internas e uma distribuição dos níveis mais uniforme. Entretanto, esta tipologia de abertura pode apresentar ofuscamento e calor excessivo decorrentes da penetração de luz solar direta no ambiente interno. Neste caso, elementos de proteção podem ser usados, que são dispositivos projetados para controlar a entrada da luz solar direta no ambiente interno.

Com o uso de simulações computacionais, utilizando-se o programa Lightscape® V.3., este trabalho analisa o comportamento da luz natural admitida em ambientes internos através de aberturas zenitais em conjunto com elementos de controle da luz solar direta. As principais variáveis do estudo referem-se a tipologia da abertura, monitor e lucernário; e ao elemento de controle, interno e externo. Os parâmetros de análise referem-se as iluminâncias e sua distribuição espacial no ambiente interno.

Os resultados apresentaram melhor desempenho do elemento de controle interno, na condição de céu claro, porém com limitações na condição de céu encoberto.

ABSTRACT

The present interest in energy conservation and in comfort and search well being has increased the interest in indoors natural illumination.

Zenithal openings are attractive, because they provide greater indoors sources of light and a more uniform distribution of levels. On the other hand, this type of opening may reveal glare and excessive heat originated in direct sunlight penetration into internal space. In this case, protection elements, which are projected devices to control indoors direct sun light entrance, can be used.

Exploiting computer simulations through Lightscape® V.3 programme, this work analyses the daylight aspects absorbed in internal spaces through zenithal openings along with control elements of direct sun light. The main variables of the study refer to the type of opening, monitor and clerestory; and also to the control element, internal or external. The parameters of analysis are related to illumination and its indoors spatial distribution.

The results demonstrate a better performance of the internal control element, when the sky condition is clear, with limitations, however, when the sky is cloudy.

1 INTRODUÇÃO

A descoberta da lâmpada incandescente, em 1880, deu início ao processo de substituição das fontes naturais de luz pelas fontes artificiais, ainda que, inicialmente seu custo fosse muito elevado. Mas, na década de 50, com a introdução da lâmpada fluorescente, a luz artificial torna-se rapidamente a fonte de luz preferencial na maioria das edificações, independente da disponibilidade de luz natural presente no ambiente externo, que passa a ser, geralmente, ignorada ou tratada como um problema pelos projetistas (Lam, 1986, p.x; Baker et al, 1993, p.1.15).

A partir da crise do petróleo em 1973, o esgotamento dos recursos naturais e a utilização desmedida das fontes de energia artificiais torna-se objeto de questionamentos. Na busca de soluções para a crise de energia, usuários e projetistas encontram na luz natural uma alternativa para a redução do consumo de energia das fontes artificiais.

O uso da luz natural, no entanto, não justifica-se somente na economia de energia. O resgate de muitos exemplos históricos conduz a um entendimento da necessidade do homem estar em contato com o ambiente natural e também pela necessidade de qualidade no ambiente construído. A qualidade da luz natural associa-se a fatores como: benefícios psicológicos e fisiológicos para os usuários, elemento estético e arquitetônico, relacionamento com o ambiente externo e qualidade espectral da luz natural.

Apesar de todas as evoluções tecnológicas e do grande enfoque dado aos sistemas de iluminação artificial, as aberturas e outros sistemas de iluminação natural têm tido seu espaço e mantêm-se em evolução, principalmente, nas últimas décadas. Porém, ainda há muito que ser desenvolvido para chegar-se a otimização da utilização da luz natural nos ambientes internos.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação aborda as aberturas, elementos responsáveis pela passagem da luz para o interior de uma edificação e também, os sistemas de iluminação natural mais comumente utilizados. Neste contexto, desenvolveu-se a análise da admissão da luz natural através de aberturas zenitais, quando estas incorporam elementos de controle da luz solar direta.

1.1 JUSTIFICATIVA

Localizadas nas paredes externas das edificações ou no envelope¹ do edifício, as aberturas dividem-se basicamente em dois grupos: aberturas laterais, situadas nos planos verticais das edificações e aberturas zenitais, situadas nos planos horizontais ou de cobertura das edificações.

Historicamente, as aberturas laterais têm sido a forma predominante de iluminação natural, mas proporcionam uma distribuição de iluminâncias desigual, com altos níveis próximo a abertura e baixos níveis no fundo dos ambientes, enquanto as aberturas zenitais apresentam distribuição dos níveis mais uniforme e maiores iluminâncias internas com a mesma área de vidro que uma abertura lateral.

Contudo, as aberturas zenitais apresentaram durante muito tempo características que limitaram seu uso, como a grande dificuldade em proteger o ambiente interno das intempéries externas, principalmente água proveniente de chuvas. Apresentam também problemas como ganho de calor e ofuscamento, comuns em sistemas zenitais. A alternativa para solucionar este problema pode estar na utilização de dispositivos de proteção ou controle da luz solar direta, melhorando a performance do sistema e reduzindo assim, problemas com ofuscamento e ganho de calor solar excessivo.

Sabe-se que a utilização de elementos de controle em conjunto com sistemas de iluminação, laterais ou zenitais, é uma estratégia de projeto que conduz a um melhor aproveitamento da luz natural em um ambiente interno, (Corrêa, 1997, p.280). Contudo, os sistemas zenitais, bem como os elementos de controle, são pouco utilizados. Percebe-se hoje, em muitas edificações, que na impossibilidade de inserção de uma abertura lateral, sistemas artificiais são preferidos em detrimento da implantação de uma abertura zenital (Leder et al, 1998, p.412-415).

O presente trabalho justifica-se na necessidade de ampliar o conhecimento das características de sistemas zenitais e elementos de controle da luz solar direta. Neste contexto, acredita-se que maiores informações sobre comportamento da luz natural, admitida por esses sistemas, poderá desencadear aumento no interesse dos projetistas

¹ Envelope - Termo que refere-se ao conjunto de paredes que formam o volume externo da edificação.

na utilização desses sistemas, assim como, auxiliar no processo de definição do próprio sistema.

1.2 HIPÓTESES

Ao se pensar em um dispositivo de controle, um dos primeiros aspectos a ser definido é o posicionamento do mesmo em relação à abertura. Já que, os elementos de controle podem estar dispostos internamente ou externamente à abertura. Sabe-se que elementos externos tendem a admitir menos calor ao ambiente interno, pois a radiação solar é dissipada externamente. Por outro lado estes estão mais sujeitos à intempéries e poluição, enquanto os elementos internos podem propiciar maior ganho de calor no ambiente interno, porém protegidos dos agentes externos e encontram-se em situação de melhor manipulação, controle e manutenção.

Contudo, pouco se sabe sobre a influência dos elementos de controle, internos ou externos, sobre as iluminâncias internas e sua distribuição. Surgiram então, hipóteses como: elementos internos podem apresentar melhor distribuição dos níveis, assim como, podem apresentar maiores iluminâncias internas, comparando-os a elementos de controle externos.

A primeira hipótese, de que elementos internos podem apresentar melhor distribuição das iluminâncias, refere-se ao posicionamento do elemento em relação à abertura. A luz que incide sobre o elemento externo, ainda que, o elemento redirecione o fluxo luminoso de maneira uniforme, deverá atravessar a abertura, antes de chegar ao ambiente interno. Neste trajeto podem ocorrer alterações indesejáveis no curso do fluxo luminoso. Por outro lado, a luz que incide sobre um elemento interno é imediatamente refletida para o ambiente interno, não existindo, neste caso, nenhum elemento interveniente neste processo, facilitando a previsão do comportamento do fluxo luminoso nessa condição, bem como favorecendo a performance do sistema interno.

A segunda hipótese, de que elementos internos podem apresentar maiores iluminâncias, refere-se ao comportamento da luz que incide sobre um elemento de controle. Significativa parcela do fluxo luminoso, bloqueado pelos elementos externos, retorna ao hemisfério, enquanto que, o fluxo luminoso, bloqueado pelos elementos

internos, apresenta um comportamento diferente, já que, a geometria do elemento e outras superfícies internas favorecem sua permanência no ambiente interno, figura 1.1. Esse fluxo luminoso que permanece no ambiente interno pode representar significativo aumento das iluminâncias internas.

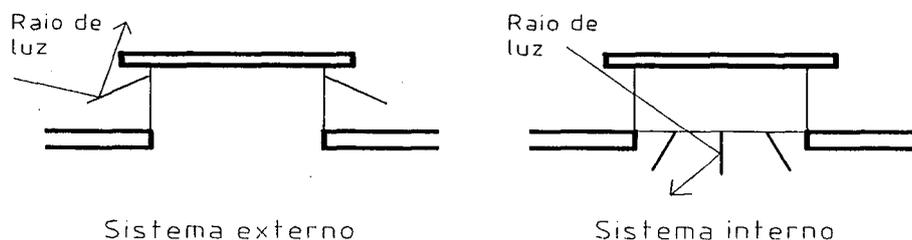


Figura 1.1 - Representação esquemática do comportamento da luz ao incidir sobre uma superfície de controle interna e externa, abertura monitor

1.3 VARIÁVEIS DO ESTUDO

As principais variáveis do estudo desenvolvido neste trabalho referem-se às aberturas e aos elementos de controle. As aberturas estão voltadas parcialmente para o zênite e tratam-se de duas tipologias: monitor e lucernário.

A variável sobre os elementos de controle encontra-se no posicionamento do elemento em relação à abertura. Cada abertura apresenta um elemento interno e outro externo, e também, a abertura sem o elemento de controle.

A condição do céu apresenta duas variáveis: céu claro e encoberto.

A época do ano também apresenta duas variáveis: solstício de inverno e verão.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é analisar o comportamento da luz natural, admitida em ambientes internos através de aberturas zenitais, em conjunto com sistemas de controle da luz solar direta, internos e externos.

1.4.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo compreendem:

- Desenvolver estudo piloto, com modelos em escala reduzida, para avaliar os parâmetros de análise escolhidos (iluminâncias e distribuição) e auxiliar na definição final do modelo de estudo;
- Realizar simulações computacionais para geração de dados para análise comparativa das tipologias e sistemas de controle escolhidos;
- Analisar a influência das aberturas zenitais em conjunto com os elementos de controle sobre os níveis de iluminação e a distribuição desses níveis;
- Analisar variações decorrentes da mudança das estações (inverno e verão) e da mudança no tipo de céu (encoberto e claro).

1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A análise desenvolvida sobre o modelo de estudo considera dois parâmetros: as iluminâncias internas e sua distribuição espacial. Esses parâmetros permitem observar se houve incidência de luz solar direta no ambiente interno, um dos principais fatos associados a problemas com ofuscamento. Contudo, apresenta-se como limitação do trabalho, uma análise direta sobre a presença ou não de ofuscamento no ambiente em estudo. Outra limitação do trabalho, refere-se à contribuição térmica, também não abordada neste estudo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho divide-se em 6 etapas: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Análises e Conclusões e Sugestões. Na Introdução faz-se uma apresentação do tema a ser desenvolvido, abordando-se a justificativa do tema, os objetivos a serem alcançados, as hipóteses, variáveis e limitações do trabalho.

A segunda etapa trata de uma revisão bibliográfica sobre o tema escolhido. Inicialmente são apresentadas considerações relativas à luz natural, como elemento

físico e sua interferência no ambiente construído. Em seguida, tem-se uma abordagem sobre sistemas de iluminação natural e elementos de controle, ressaltando-se aspectos como classificação, características e considerações, segundo literatura encontrada sobre o tema. O último enfoque aborda os métodos de simulação e cálculo do comportamento da luz natural e alguns parâmetros de análise, finalizando com breve conclusão sobre o capítulo.

A terceira etapa trata da Metodologia. Nesta fase, inicialmente, tem-se uma apresentação detalhada do modelo de estudo desenvolvido para o trabalho, em seguida é descrita a metodologia adotada na realização do estudo piloto com escala reduzida. A parte final do capítulo refere-se ao desenvolvimento das simulações computacionais sobre o modelo de estudo, objetivo principal do trabalho.

A quarta etapa divide-se em duas fases. A primeira fase refere-se a apresentação de alguns resultados e análises sobre o estudo piloto com modelo em escala reduzida. A segunda fase consiste na apresentação das análises realizadas sobre o resultados apresentados com a simulação computacional sobre o modelo de estudo.

A quinta e última etapa refere-se às conclusões obtidas com o trabalho, recomendações de projeto com aberturas zenitais e sugestões para novos trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura sobre o tema iluminação natural. Inicialmente tem-se uma definição do tema, seguida de um destaque aos aspectos relativos a qualidade e benefícios da luz natural. Por último, breve enfoque sobre a disponibilidade de luz natural e a trajetória aparente do sol.

Na segunda fase desse capítulo tem-se uma abordagem sobre os sistemas de iluminação natural, ressaltando as aberturas zenitais e os elementos de controle da luz solar direta.

O capítulo finaliza com um enfoque aos métodos e parâmetros de análise, destacando-se análises sobre as potencialidades e limitações de cada método. Por último, tem-se ainda uma conclusão do capítulo.

2.1 LUZ NATURAL

Denomina-se luz natural a luz proveniente do sol, seja em forma direta, através dos raios solares, ou de forma indireta, devida a reflexão da atmosfera (luz difusa) e à reflexão das superfícies dos objetos existentes sobre a terra.

A luz é energia física em forma de ondas eletromagnéticas. A radiação que o olho humano pode perceber como luz são aquelas com comprimento de onda entre 380 e 770 nanômetros (nm), do espectro eletromagnético (Robbins, 1986, p.18). A luz do sol cobre todo esse espectro de radiação visível, que o olho humano pode perceber, e também ondas infravermelho e ultravioleta que o olho não percebe, mas que podem danificar materiais sensíveis e produzir calor. A distribuição espectral da luz solar pode ainda variar com a hora do dia, a estação, a altitude do local e as condições da atmosfera (Baker et al., 1993, p. 2.7).

Os raios de luz emitidos pelo sol, que chegam à terra, ao contrário das fontes artificiais, que caracterizam-se pela divergência dos raios emitidos, são considerados como paralelos (Robbins, 1986, p.19).

2.1.2 A Iluminação Natural e o Homem

Os espaços internos ou externos, onde há presença de seres humanos, devem estar adaptados as características físicas e psicológicas dos mesmos. Segundo definição da "Ergonomics Research Society" da Inglaterra (apud Lida, 1990, p.1), "ergonomia é o estudo do relacionamento entre o homem e o seu trabalho, equipamento e ambiente, e particularmente a aplicação dos conhecimentos de anatomia, fisiologia e psicologia na solução dos problemas surgidos desse relacionamento". A função principal da ergonomia é encontrar uma situação onde o ser humano sinta-se em condição de "conforto", ou seja, estado em que o usuário não seja prejudicado, tanto fisicamente quanto psicologicamente, e ao mesmo tempo, mantenha a sensação de prazer e bem estar.

Dentro desse contexto, o conforto visual dos usuários era tradicionalmente associado simplesmente com a existência dos níveis de iluminação adequados para o desenvolvimento da tarefa, ao mesmo tempo, minimizando outros estímulos no ambiente. Mas, recentes estudos na área de ergonomia e psicologia mostraram que o homem tem necessidade de ambientes mais interessantes nos espaços de trabalho, e que alterações, nesse sentido, tem resultado em aumento da produtividade (Baker et al., 1993 p.2.1).

Algumas pesquisas indicam que a produtividade aumenta em torno de 15% quando os trabalhadores estão satisfeitos com seu ambiente de trabalho, e, referindo-se ao conforto obtido através da iluminação, um estudo feito por Merck em 1983 (apud Lomonaco, 1997 p.50-52) mostrou índices de 20% dos trabalhadores insatisfeitos com a iluminação do seu espaço de trabalho. Demonstrando assim, a necessidade de maior preocupação por parte dos projetistas com a iluminação de um ambiente, bem como com os aspectos indiretamente ligados a mesma.

O uso da iluminação natural, nos espaços de trabalho e outros em geral, tem sido associado a fatos positivos como a visão e contato com o exterior, benefícios psicológicos e fisiológicos para os usuários, elemento estético e arquitetônico, e a qualidade da luz natural, além da economia de energia.

2.1.2.1 Visão e contato com o exterior

As aberturas, além de proporcionar a iluminação natural e ventilação, possibilitam contato e visualização do ambiente externo, permitindo que o indivíduo obtenha informações sobre as condições externas como hora do dia, temperatura, vento, chuva e outros, proporcionando, inclusive, uma sensação de bem estar e alívio da monotonia com a visualização da paisagem externa, que, ao contrário do ambiente interno, é dinâmica (carros, pessoas, tempo). Conforme Robbins (1986, p.10), as edificações sem janelas comumente são criticadas pelas pessoas por motivos como ausência da luz do dia, ventilação pobre, ausência de contato com as condições do tempo externo, perda do contato com a paisagem externa, sentimento de isolamento ou claustrofobia e sentimento de depressão e tensão.

Ressaltando o aspecto da ventilação, estudos realizados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos concluíram que “poluentes químicos e biológicos transportados pelo ar podem apresentar-se em concentrações de duas a cinco vezes maiores em ambientes fechados do que nos abertos” (Andrade, 1999, p.34).

2.1.2.2 Benefícios psicológicos e fisiológicos para os usuários

A forte ligação que existe entre a luz natural e o homem se dá, com certeza, pelo contato de milhões de anos que existe entre ambos (a substituição da iluminação natural pela artificial tem menos de 100 anos). O que certamente justifica a necessidade que o homem tem de manter contato com a luz natural. Para evidenciar este fato, recentes estudos têm indicado que muitas pessoas sofrem da “síndrome do dia curto”, ou dias em que há pouca luz do sol, ou seja, pessoas que ficam depressivas em situações de privação ou pouco contato com a luz natural (Lam, 1986, p.21).

A luz do sol também está associada ao metabolismo interno do homem. Alguns pesquisadores afirmam que existem camadas da retina que não estão associadas a função da visão, mas servem como um receptor de ondas de luz, que por sua vez estão conectadas com as glândulas endócrinas, responsáveis pelo sistema metabólico do homem. Com isto, pode-se afirmar que a iluminação natural influencia no perfeito

funcionamento do “relógio biológico” do ser humano, (Baker et al., 1993, p.2.5), que teria relação com horários de dormir, refeições e metabolismo. Karmel (apud Robbins, 1986, p.10), em uma pesquisa realizada com mais de 1.200 estudantes, mostrou que escolas em edifícios que possuíam poucas aberturas, apresentavam estudantes significativamente mais hostis, desajustados e com grande número de psicopatologias de grupo. Isso comparado a outros estudantes de escolas em edificações com maior quantidade de janelas.

Mais recentemente, o fenômeno conhecido como “edifícios doentes”, isto é, edifícios que apresentam grande número de usuários com desordens físicas e psicológicas, têm apontado como uma das causas, a iluminação desses locais, mais especificamente, a privação da luz natural e outros como a qualidade espectral da luz artificial e a tremulação das lâmpadas fluorescentes (Baker et al., 1993, p.1.18; Energy Reserch Group, 1994, p.1).

2.1.2.3 Elemento arquitetônico e estético

A maior vantagem do uso da luz natural não é a economia de energia que ela pode proporcionar, mas o fato que, se usada conscientemente, pode proporcionar ambientes muito agradáveis e possibilitar uma iluminação prazerosa para os usuários. A Capela Ronchamp é sem dúvida um belo exemplo, projeto do arquiteto Le Corbusier, apresentada na figura 2.1.

O conhecimento dos benefícios que a inserção da luz natural em um ambiente interno podem trazer, há muitos anos tem sido utilizado, resultando em obras de grandes efeitos estéticos, como pode ser observado, em templos e igrejas dos períodos antigos, onde a luz natural era empregada para ressaltar formas arquitetônicas, hierarquizar e dramatizar espaço internos. A luz natural, através dos tempos, tem sido símbolo de limpeza, pureza e conhecimento (Moore, 1985, p.1).



Figura 2.1 - Capela Ronchamp, Le Corbusier (Baker et al, 1993, p. 1)

2.1.2.4 Qualidade da luz natural

A luz natural contém comprimento de onda que cobre todo o espectro da radiação visível, por isso, a mesma possibilita a perfeita reprodução de todas as cores, já que as cores dos objetos e superfícies dependem da composição espectral, da fonte de luz pela qual eles estão sendo vistos. Ainda que composições espectrais próximas da luz natural sejam encontradas em outras fontes artificiais, a luz natural continua sendo preferível, e é a fonte de luz padrão segundo a qual as outras fontes de luz são julgadas quanto a sua reprodução de cor (Energy Research Group, 1994, p.1).

É possível, que devido a qualidade superior da luz natural em comparação com as fontes artificiais, a mesma possibilite o desempenho de uma tarefa com menos luz que a quantidade de luz artificial para a performance da mesma tarefa (Erenkrantz Group; 1979, apud Robbins 1986, p.4).

A luz natural também introduz em um ambiente interno menos calor por unidade de luz que as fontes de luz artificiais disponíveis no mercado, aproximadamente 125 lumens por watt, enquanto que uma lâmpada fluorescente produz 65 lúmens por watt (Moore, 1985, p.91).

2.1.2.5 Economia de energia

Os sistemas de iluminação artificial consomem grande parte do montante total de energia consumido pelos edifícios atualmente. Em alguns casos, até 50% do consumo total do edifício (Lam, 1986, p.3). Utilizar a luz natural, como fonte de luz interna, pode reduzir esse montante consumido pelas fontes artificiais e também reduzir situações de pico (energia que deve estar disponível para o caso de todos os equipamentos ligados no máximo consumo). Resultados observados de muitos projetos realizados com objetivo de aproveitar recursos naturais como fonte de energia, mostram economia nos custos com consumo energético em mais de 50%, conseguido através de boas decisões durante o projeto, e sem com isso, representar qualquer aumento no custo da construção.

Além da economia direta obtida com a substituição da luz artificial pela natural, a luz do sol pode contribuir para o aquecimento do edifício, em regiões ou estações frias, e em situações de calor, as aberturas podem funcionar como sistemas de ventilação, promovendo o resfriamento da edificação.

A radiação solar apresenta-se como uma forma ideal de energia porque não polui o ambiente e está presente em todos os lugares do planeta, é um recurso gratuito e inesgotável, anterior e superior a vida de qualquer edifício.

2.1.3 As Fontes De Luz Natural e sua Disponibilidade

As fontes de luz natural podem ser caracterizadas como direta e indireta. Como fonte de luz natural direta tem-se a luz do sol e a luz da abóbada celeste. Como fonte de luz indireta tem-se a luz do sol e abóbada refletida do entorno.

A disponibilidade de luz natural provenientes dessas fontes varia de acordo com o local, sua posição geográfica (latitude, longitude e topografia), o entorno natural e entorno construído, as condições atmosféricas, a condição do céu, a qualidade do ar, horário, mês e dia do ano. Em adição, o montante de luz recebido por uma edificação varia com as características das superfícies do entorno e a orientação do edifício (Energy Research Group, 1994, p.2).

A luz direta do sol refere-se aos raios diretos do sol que chegam até a terra, caracterizando-se por ser uma fonte de luz pontual e extremamente intensa. A luz da abóbada celeste é difusa e é o resultado da refração e reflexão da luz do sol quando atravessa a atmosfera, comporta-se como uma fonte de luz distribuída (área).

A luz refletida no entorno é aquela produzida pelos reflexos da luz solar e da luz produzida pela abóbada celeste que, em contato com as superfícies do entorno, passam a comportar-se como fonte de luz indireta. Uma fonte de luz indireta pode em algumas situações ser mais intensa que a luz proveniente da abóbada celeste (Moore, 1985, p.30-32).

A quantidade de luz natural recebida em um ambiente interno está relacionada com a luz proveniente do exterior. Estimar a quantidade, variação e a duração da luz proveniente das fontes externas é um importante fator para o desenvolvimento e elaboração do projeto. É necessário ao iniciar um projeto, esclarecer a real disponibilidade de luz para o local em estudo.

Muitos países tem realizado registros periódicos dos níveis de iluminação externo proveniente do céu. Segundo Robbins (1986, p.29), nos Estados Unidos, os primeiros registros datam de 1877. Esses registros, coletados periodicamente, permitem uma caracterização dos níveis de iluminação externos encontrados nas diferentes regiões e localidades, eles fornecem subsídios para estimar a disponibilidade de luz natural.

Estudiosos como Moon, Spencer, Kimball, Pokrowski, Pleijel e outros, elaboraram fórmulas e estudos a fim de estimar as quantidades de luz provenientes das fontes naturais, para as diversas partes do globo e em diferentes condições de céu. O resultado foi o desenvolvimento de inúmeros modelos para definir a disponibilidade de luz natural, o que evidencia uma grande diferença de opiniões quanto ao melhor método a ser empregado (Robbins, 1986, p.30; Hopkinson, 1966, p.49).

Os registros das luminâncias do céu, em vários países, permitiu que na Europa a "Comission Internationale de L'Eclairage" CIE e nos Estados Unidos a "Illuminating Engineering Society of North America" IES, entidades compostas por vários pesquisadores da área, estabelecessem modelos padrões de céu, que representariam teoricamente a quantidade de luminância proveniente do céu em condições de céu claro e céu encoberto (Robbins, 1986 p.35; Scarazzato, 1995, p.270). Como resultado existem

atualmente, três tipos de céu aceitos internacionalmente como padrão: céu uniforme, céu encoberto e céu claro. Destes, apenas o céu encoberto e o céu claro estão normalizados pela C.I.E..

O céu encoberto caracteriza-se principalmente pelo encobrimento do sol. A distribuição de luminância padrão para céu encoberto da C.I.E. foi definido através da fórmula original proposta por Moon e Spencer, em 1942, e adotada pela CIE em 1955. O céu claro caracteriza-se por apresentar o sol aparente, e sua distribuição de luminância padrão da C.I.E. foi definida através da fórmula original, proposta por Kittler, em 1965, e adotada pela CIE em 1973 (Robbins, 1986 p.35; Schiller, 1987, p.44-47).

2.1.4 Trajetória Aparente do Sol

Os estudos anteriores estão relacionados com a disponibilidade de luz natural proveniente das fontes da luz solar direta e da luz da abóbada celeste, porém, o montante de luz que um edifício recebe está também associado com as características das superfícies do entorno e a orientação do edifício em relação a posição do sol, ou seja, com a insolação direta que cada fachada do edifício recebe diariamente (Energy Research Group, 1994, p.2).

Segundo Côrrea (1997,pg.86), as aberturas voltadas para a orientação norte, no hemisfério sul, produzem altos níveis de iluminação, elevados ganhos térmicos no inverno e, medianos no verão. Ao mesmo tempo, a orientação oeste e leste produzem níveis desiguais, em períodos de manhã e tarde, e apresentam ganhos térmicos maiores no verão que no inverno, enquanto que, a orientação sul apresenta a componente luz direta do sol apenas nos meses de verão, em períodos de início e final do dia.

Para dar soluções a muitos problemas decorrentes da exposição excessiva ou insuficiente às fontes de luz natural, como a necessidade de previsão das horas que determinada abertura receberá luz solar direta, é necessário conhecer a posição e o movimento do sol ao longo do ano, em relação a qualquer localidade específica, isso é, definir a altura e o azimute solares em cada situação (Hopkinson, 1966, p.603).

Com intuito de simplificar a aplicação das diversas fórmulas existentes sobre o tema, foram elaboradas tabelas e cartas solares (conhecidos por diagramas solares) que

são facilmente utilizáveis (figura 2.2). Os diagramas dos percursos solares mais conhecidos são os diagramas de projeção estereográfica, diagramas de projeção eqüidistante (figura 2.3) e diagramas de projeção gnomônica, de autores como Pleijel, Olgyay e outros.

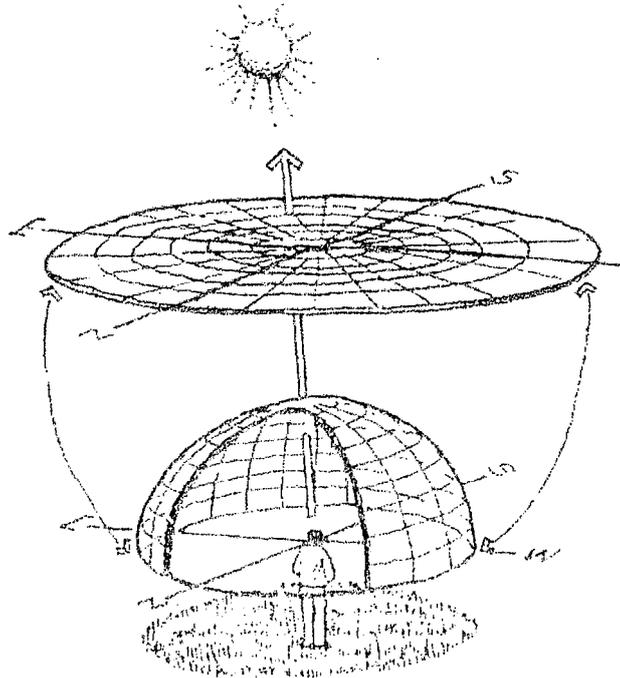


Figura 2.2 - Desenho esquemático com uma projeção eqüidistante da abóboda celeste sobre um plano dimensional, o diagrama solar. (Moore, 1985, p.58)

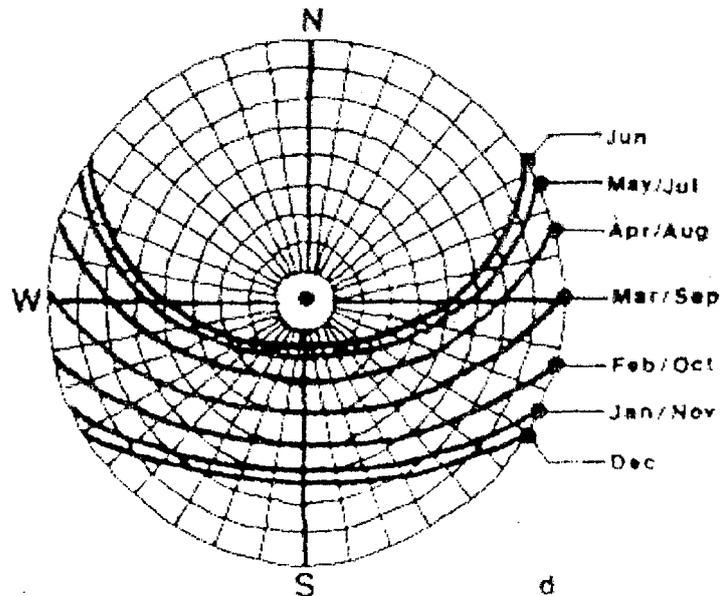


Figura 2.3 - Exemplo de Diagrama solar eqüidistante com a trajetória aparente do sol, a altitude solar corresponde as linhas circulares do diagrama e o azimute solar corresponde as linhas retas que cortam os círculos (Moore, 1985, p.59)

2.2 OS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Os sistemas de iluminação natural são constituídos de elementos que possuem a função de conectar o ambiente externo com o interno, permitindo que a luz natural presente no exterior chegue até o ambiente interno. “A principal proposta de um sistema de iluminação natural é providenciar um montante razoável de luz aonde ela é necessária no interior do edifício, ao mesmo tempo garantindo uma boa performance visual e proporcionando suficiente contraste de luz para o conforto visual dos usuários” (Robbins, 1986, p.63).

São alguns dos principais objetivos de um sistema de iluminação natural: maximizar a transmissão de luz por unidade de área de vidro, controlar a penetração da luz direta do sol sobre espaços de trabalho, minimizar a perda de calor no inverno e ganho de calor no verão e controlar o ofuscamento (Moore, 1985, p.68).

De acordo com Baker et al. (1993, p.5.1), os sistemas de iluminação natural dividem-se em dois principais grupos: componentes de condução e componentes de passagem. Os componentes de condução são elementos ou espaços projetados para guiar e/ou distribuir a luz para o interior de um edifício, varandas e átrios são exemplos, figura 2.4.

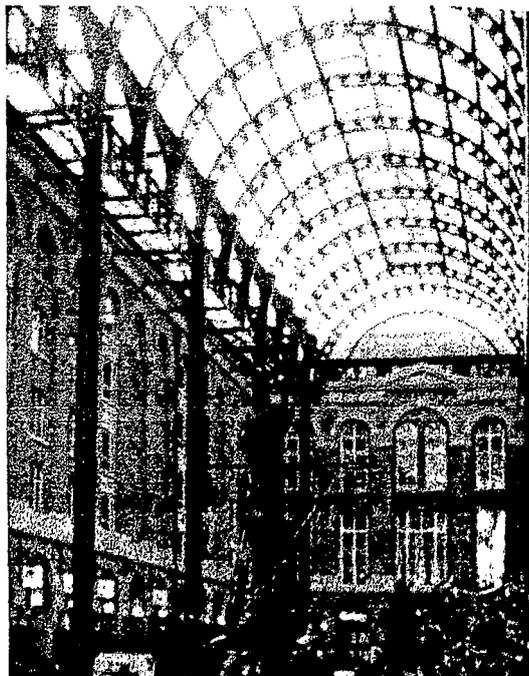


Figura 2.4 - Exemplo de átrio, Londres (arquivo da autora)

Componentes de passagem são elementos através dos quais a luz passa de um ambiente para o outro, uma abertura é o exemplo mais claro, figura 2.5, dividem-se em: componentes de passagem lateral, zenital e global.

Os componentes de passagem lateral são elementos localizados nas paredes verticais ou no envelope vertical do edifício. Estes elementos permitem a entrada lateral da luz, figura 2.5.



Figura 2.5 - Abertura lateral, à esquerda e zenital, superior direita (Baker et al., 1991, p.1.16)

Os componentes de passagem zenital são elementos situados nas paredes horizontais ou nos planos de cobertura do edifício, e que permitem a entrada da luz de forma zenital, iluminando um espaço que está situado abaixo do próprio componente, ver figura 2.5.

Os componentes de passagem global são aqueles que fazem parte do próprio envelope do edifício, permitindo ao mesmo tempo uma entrada lateral e zenital da luz, como por exemplo uma cobertura translúcida, ver figura 2.6.



Figura 2.6 - Cobertura translúcida (Tebbitt, 1986, p.85)

Historicamente, as aberturas laterais tem sido a forma predominante de iluminação natural, principalmente por proporcionar simultaneamente iluminação, ventilação e visão do exterior. As aberturas zenitais apresentaram durante muito tempo limitações de ordem tecnológica, que só foram resolvidas com o aparecimento do vidro e o desenvolvimento de sistemas de aberturas resistentes a infiltrações de água (Lam, 1986, p.73). Porém, os componentes de passagem lateral também apresentam características negativas, como a grande incidência de ofuscamento nas proximidades das aberturas e o alto contraste na distribuição dos níveis de iluminação, (Robbins, 1986, p.66).

Acredita-se que componentes de passagem lateral e componentes de passagem zenitais possam ser usados em conjunto para melhorar fatores como a distribuição e o alcance da luz natural, entre outros. Ainda que as aberturas zenitais limitem-se a edifícios térreos ou com poucos andares, possivelmente um grande número de edificações poderiam ser beneficiadas com a iluminação natural através de aberturas zenitais, em locais onde optou-se por iluminação artificial, em decorrência da impossibilidade de implantação de componentes de passagem lateral.

2.2.1 Os Sistemas de Iluminação Natural Passivos e Ativos

O interesse no uso da iluminação natural, nos últimos anos, tem resultado no desenvolvimento de um número de novas soluções, objetivando o aumento da disponibilidade de luz natural no interior dos edifícios. Os avanços tecnológicos têm influenciado no surgimento de inovações nos sistemas e também nos materiais utilizados.

Os objetivos principais das novas tecnologias são aumentar a profundidade de penetração da luz natural dentro de um ambiente, e controlar e distribuir a luz natural direta, de forma que ela possa ser usada efetivamente como fonte de iluminação (Crisp et al., 1988, p.19).

No cenário atual, o edifício é um objeto estático enquanto o sol é um elemento dinâmico. Sobre essa consideração, os sistemas de iluminação natural podem ser divididos ainda em: sistemas passivos e sistemas ativos.

Os sistemas passivos, assim como o edifício, são elementos estáticos e tradicionalmente os mais utilizados, como aberturas laterais e zenitais, átrios, varandas e outros.

Os sistemas ativos são dinâmicos e estão em constante ajustamento seguindo as mudanças de posição do sol, através do dia e das estações, a fim de garantir sempre o máximo montante disponível de luz natural. Alguns necessitam de fonte de energia e são ainda considerados caros (Dordai, 1997, p.64).

Como sistemas ativos podem ser citados, os sistemas feitos através de espelhos e/ou lentes, chamados de heliostatos, montados com objetivo de rastrear a trajetória do sol e captar o máximo de luz disponível no exterior. A luz coletada pelos heliostatos é conduzida através de "dutos de luz", que conduzem a luz com o mínimo de perda, durante essa trajetória até o local objetivado (geralmente espaços subterrâneos ou edifícios de vários pavimentos). No interior desses dutos utilizam-se materiais como fibras óticas, lentes, espelhos e outros. O exemplo da figura 2.7 refere-se a uma solução implantada na Universidade de Minnesota nos Estados Unidos (Pereira, 1993, p.261; Crisp et al., 1988, p.19).

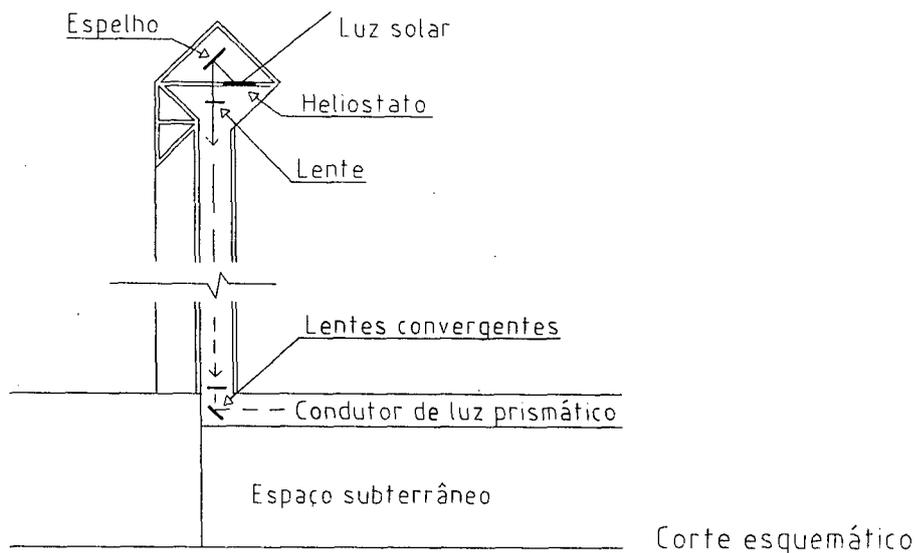


Figura 2.7 - Sistema de Iluminação natural ativo

Também podem ser citados como exemplo de sistema ativo, o Museu de Arte Contemporânea de Chicago (Navvab, 1998, p.160). O sistema consiste em elementos passivos e ativos, utilizando-se aberturas zenitais com vidros filtrantes da radiação ultravioleta em conjunto com elementos de controle (persianas) motorizadas, que controlam a entrada de radiação excessiva, figura 2.8. O resultado permitiu que as obras de arte do Museu de Chicago pudessem ser expostas sob a mesma fonte de luz, na qual as mesmas foram criadas, a luz natural.

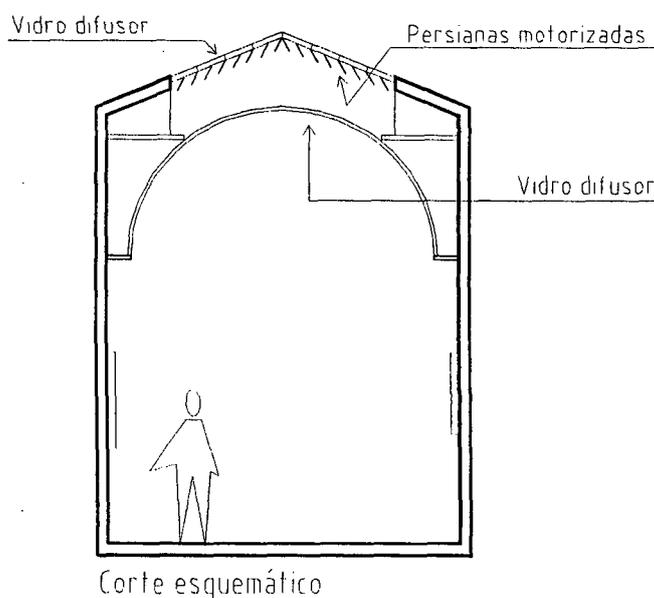


Figura 2.8- Sistema de Iluminação natural no Museu de Chicago

Estudos realizados com objetivo de avaliar a performance de edificações com luz natural na Europa (Kristensen, 1994, p.587-596), apresentaram edificações com estimativas de até 92%, da iluminação utilizada, proporcionada por luz natural. Como destaque desse estudo ressalta-se que, grande parte das edificações analisadas utilizam simultaneamente sistemas laterais, zenitais e elementos de controle, assim como, sistemas ativos e passivos. Um desses estudos apresenta a escola Valongo, no município de Agueda em Portugal, onde inúmeras estratégias com luz natural são utilizadas, beirais externos, bancadas de luz internas com material especular, iluminação zenital, que podem ser sombreadadas com um painel ajustável em períodos de verão (sistema ativo) e dutos de luz, figura 2.9.

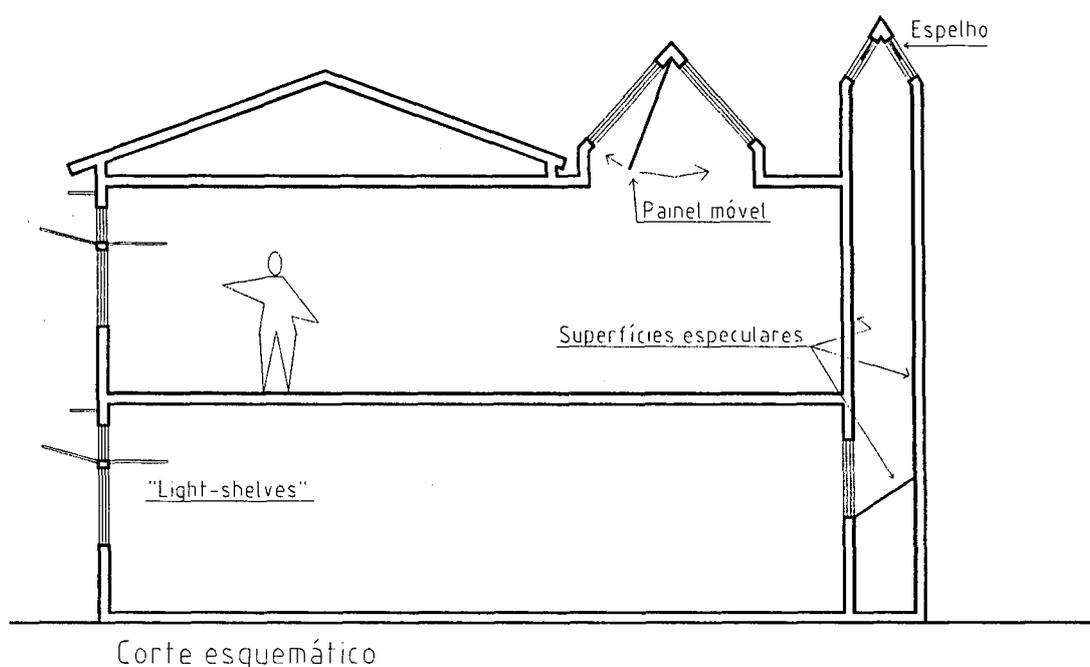


Figura 2.9 - Escola Valongo

2.2.2 Os Componentes de Passagem Zenital

Componentes de passagem zenitais, ou simplesmente aberturas zenitais, são aqueles elementos localizados nos planos de cobertura da edificação e iluminam o espaço que encontra-se abaixo do próprio componente. Podem estar voltados parcialmente ou diretamente para o zênite. Normalmente não proporcionam visão da paisagem externa mas possibilitam visão do céu e das condições externas.

As aberturas zenitais podem ser usadas para aumentar a profundidade de penetração da luz natural, nas aberturas laterais, ou em casos onde o uso das aberturas laterais é inadequado. O autor também ressalta que a iluminação zenital é o sistema de iluminação natural com maior facilidade de integração com sistemas artificiais, pois a luz entra no espaço vindo do forro, em ambos os casos (Robbins, 1986, p.87/89).

Conforme Lam (1986, p.138), a mais óbvia vantagem das aberturas zenitais sobre as aberturas laterais é a liberdade de colocar a fonte de luz natural aonde a iluminação é desejada, por outro lado, uma das principais limitações da iluminação zenital é, sem dúvida, a dificuldade de iluminar edifícios com mais de dois pavimentos.

2.2.2.1 Histórico

Os primeiros exemplos de iluminação zenitais em ambientes internos eram aberturas sem vidro, que serviam simultaneamente para ventilar e iluminar. A figura 2.10 refere-se a cúpula de uma casa de banho na Turquia, e trata-se de um sistema com diversas aberturas sem vidro, formando um disco luminoso.



Figura 2.10 - Cobertura de uma casa de banho na Turquia (Rudofsky, 1981, p.304)

No Antigo Egito, utilizaram-se diversos sistemas zenitais, como aberturas feitas com grelhas de pedras cortadas ou pequenas fendas nos telhados que levavam luz para o interior dos templos, muitas vezes de forma indireta, figura 2.11.

Há também exemplos muito interessantes como o Templo de Ammon, em Lúxor, onde através de iluminação indireta, com aberturas zenitais, os níveis de iluminação foram intencionalmente variados para reforçar a hierarquia dos espaços internos (Moore, 1985, p. 3).

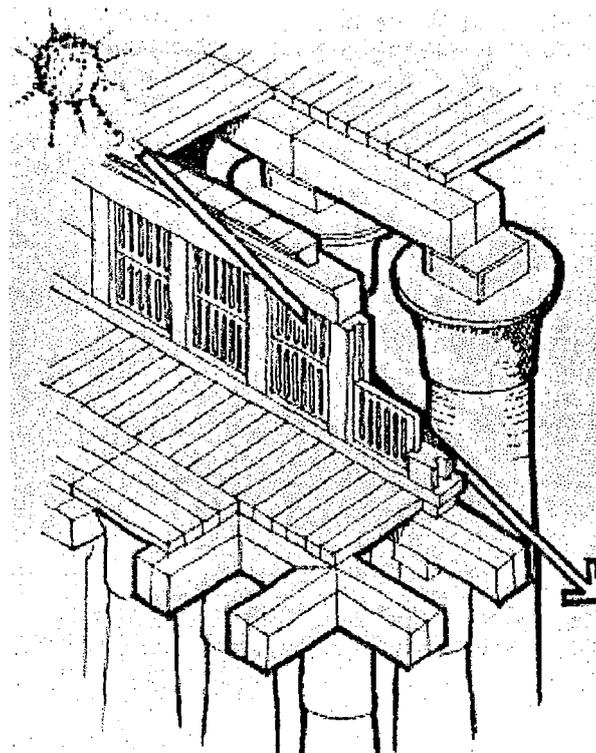


Figura 2.11 - Detalhe de sistema de iluminação zenital no Antigo Egito (Moore, 1985, p.4)

Os romanos também desenvolveram uma variedade de estratégias para iluminação natural, como exemplo a "golden house" de Nero, que possuía uma abertura zenital em forma de óculo no "hall" central, e uma série de aberturas zenitais que iluminavam os quartos (Moore, 1985, p.6).

Lam (1986, p.139) cita como primeiros exemplos de aberturas zenitais, os bazares da Antiga Pérsia e o Panteon de Roma. Ambos os casos tratam-se de aberturas tipo óculo, localizadas no centro da cobertura que é em forma de abóboda. Essas aberturas são pequenas, com cerca de 2 a 5% da área do piso, mas muito adequadas, figuras 2.12 e 2.13.

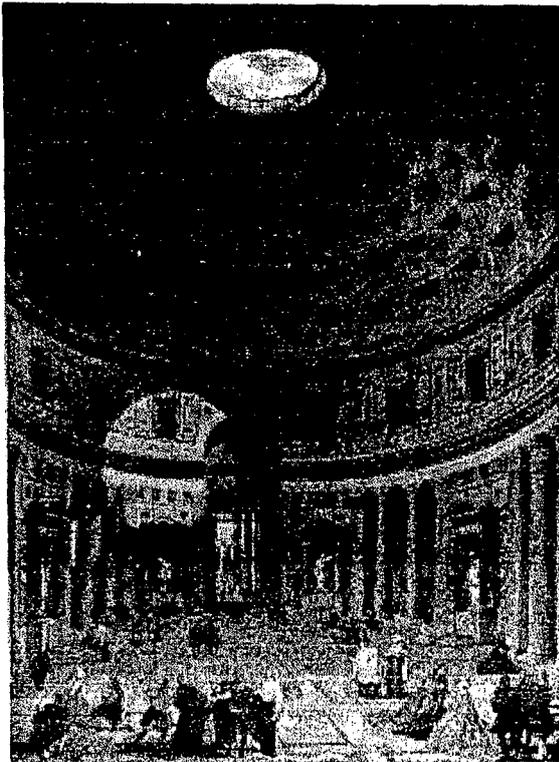


Figura 2.12 - Panteon (Lam, 1986 p.139)



Figura 2.13 - Bazar Persa (Lam, 1986, p.139)

Os edifícios sacros do Cristianismo e Renascimento representam grandes exemplos de iluminação zenital, onde a iluminação zenital era preferencialmente utilizada para dar ênfase e aumentar o misticismo dos altares. Ressalta-se exemplos como a arquitetura Barroca, pela utilização de técnicas de iluminação indireta. As aberturas zenitais localizavam-se em posições estratégicas de forma a não serem vistas, apenas a luz torna-se visível, a fonte era escondida muitas vezes de forma que houvessem duas estruturas separadas, as paredes externas e as paredes internas (Moore, 1985, p. 8-11).

A invenção do vidro possibilitou um maior acesso da luz natural às edificações, pois protegia o ambiente interno das intempéries externas, mas seu método de produção e o conseqüente custo elevado, limitou durante muito tempo sua utilização. Principalmente no século XII, o uso do vidro difundiu-se largamente na arquitetura sacra, utilizado em aberturas zenitais ou em forma de vitrais, possibilitava grandes efeitos estéticos "a admissão da luz através de massivos elementos carregados de simbolismo era irresistível para os arquitetos das grandes igrejas e catedrais" (Baker et al., 1993, p.1.2).

Até o final do período pré-industrial, a fabricação do vidro era possível somente em pequenas dimensões, além desse fato, as técnicas construtivas empregadas nas edificações da época não permitiam grandes vãos, o que limitou a dimensão das aberturas (Baker et al., 1993 p.1.3).

Com o advento da Revolução Industrial no séc. XIX, e suas grandes transformações tecnológicas, como a utilização do ferro na construção civil, e os novos processos de industrialização do vidro, surge a possibilidade de aberturas com grandes vãos e até mesmo coberturas totalmente transparentes em ferro e vidro. Essas inovações expandiram-se a diferentes tipos de edificações: estações de trem, fábricas, centros de comércio e pavilhões, figura 2.14 (Baker et al., 1993, p.1.5).

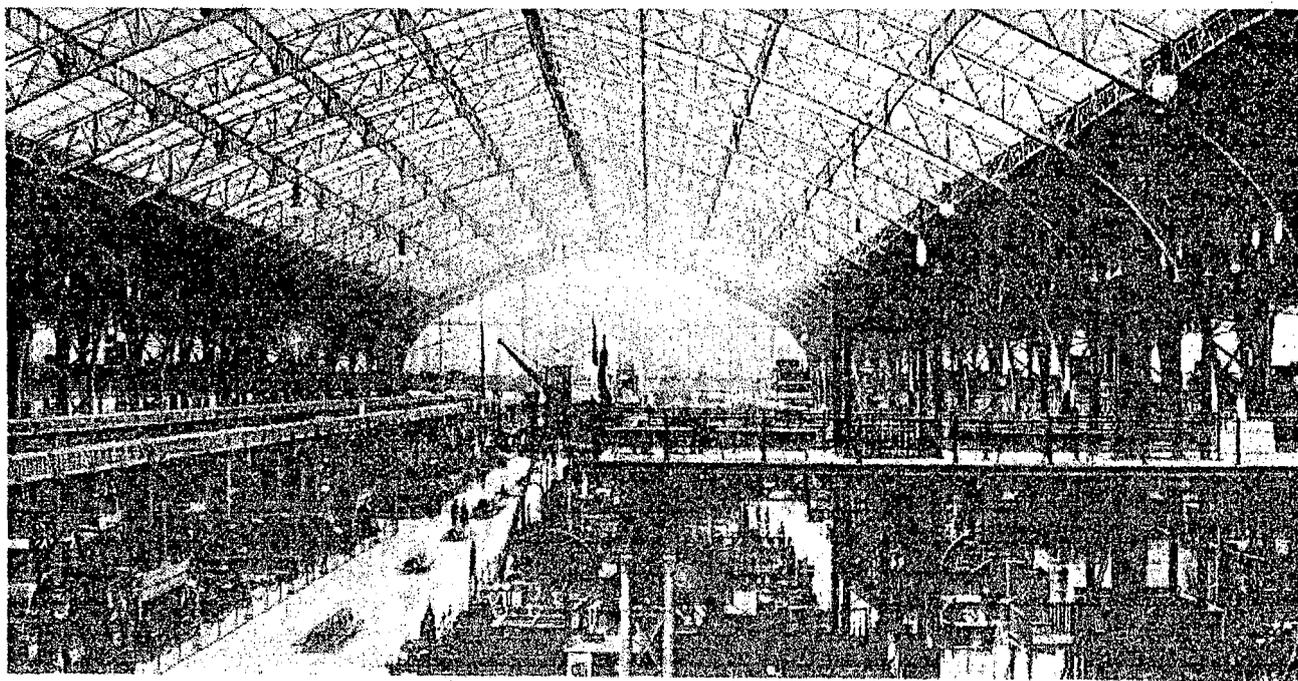


Figura 2.14 - Cobertura em ferro e vidro, pavilhão de exposições em Paris (Pevsner, 1979)

Porém, o uso indiscriminado do vidro em grandes panos nas aberturas logo mostrou-se inadequado por trazer problemas como: perda de calor no inverno, ganho excessivo de calor no verão e ofuscamento por excesso de luz (Moore, 1985, p. 13). Le Corbusier (apud Compagno, 1996, p.7), em 1930, sugeria dois conselhos para resolver esses problemas: a ventilação correta e o controle do calor. Mas a dificuldade no controle

da luz natural, sem dúvida, resultou na preferência pelas fontes artificiais, que tiveram seu uso ampliado com a invenção da lâmpada incandescente.

Contudo, as aberturas zenitais são uma opção de iluminação natural perfeitamente aplicável em muitos casos, apenas devem ser cuidadosamente projetadas (Lam, 1986, p.140). A visão da cobertura do atual Museu Sir John Soane, figura 2.15, nos mostra que o arquiteto utilizou sua casa como um laboratório para suas investigações com iluminação natural, através de uma variedade de aberturas zenitais, em 1812.

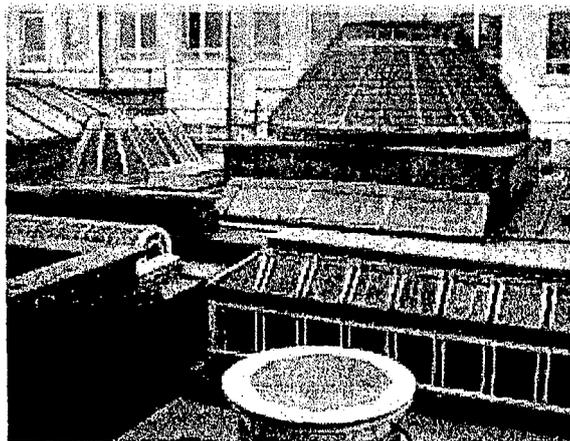


Figura 2.15 - Vista da Cobertura do museu Sir John Soane, London (Baker, 1993, p.1.7)

Ainda que os sistemas de iluminação artificial tenham se difundido e avançado tecnologicamente com grande rapidez, principalmente nos últimos quarenta anos, as aberturas e outros sistemas de iluminação natural também mantiveram-se em evolução, “respondendo a exigências de ordem funcional, oportunidades tecnológicas e influências culturais e têm, consistentemente enriquecido a arquitetura no decorrer dos séculos” (Baker et al., 1993, p.1.18). Neste contexto podem ser citados exemplos como: Le Corbusier, Alvar Aalto, Louis Khan e Frank Lloyd Wright, profissionais que em muito contribuíram na evolução e valorização dos sistemas de iluminação natural.

2.2.2.2 Tipologia dos componentes de passagem zenital

As tipologias mais comuns dos componentes de passagem ou aberturas zenitais podem ser agrupadas em dois grandes grupos: aberturas zenitais diretamente voltadas para o zênite e aberturas zenitais parcialmente voltadas para o zênite (Lam, 1986, p.140), figura 2.16.

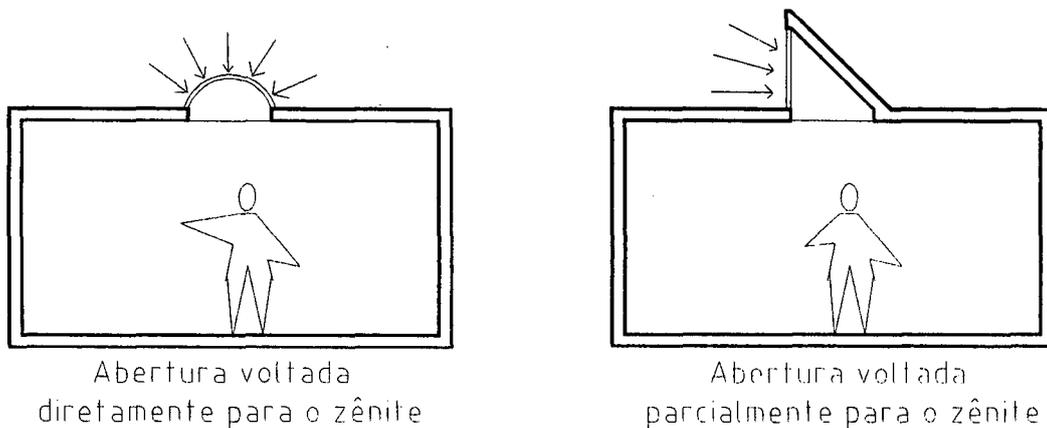


Figura 2.16 - Sistemas zenitais diretamente e parcialmente voltados para o zênite

Os sistemas zenitais voltados diretamente para o zênite podem estar em planos horizontais, curvos ou inclinados. Em muitos casos, esses sistemas não permitem ventilação, neste caso, a esquadria é fixa. Pode-se destacar aberturas tipo: cobertura transparente, figura 2.17, e domo, que consiste em uma superfície concâva construída em material transparente ou translúcido (Baker et al., 1993, p. 5.16-5.17).

Para Lam (1986, p.141-143), as aberturas voltadas diretamente para o zênite apresentam vantagens como facilidade de implantação (podendo até serem adicionadas após o edifício construído) e providenciam uma iluminação mais eficiente nas condições de céu encoberto, porém, apresentam desvantagens como admitir máximos níveis de luz natural e calor no verão, quando o sol está alto, e mínimos níveis de luz natural e calor no inverno, quando o sol está baixo, maior potencial para problemas com ofuscamento e maior vulnerabilidade a problemas de infiltração de água.

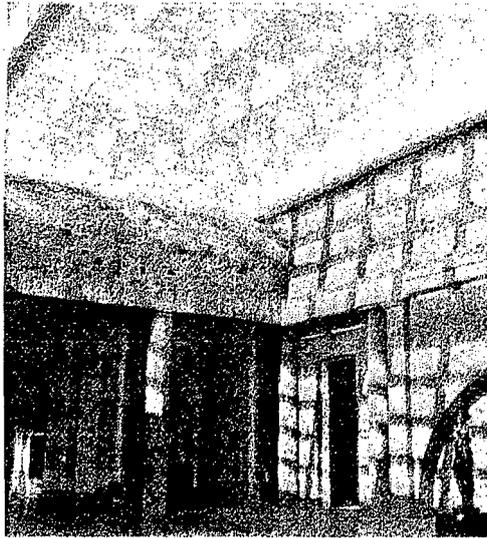


Figura 2.17 - Abertura zenital tipo cobertura transparente (Revista AU, 1998, p.64)

As aberturas zenitais voltadas parcialmente para o zênite, localizam-se na cobertura da edificação, porém a área de contato com o exterior encontra-se normalmente em planos verticais ou inclinados, permitindo visão parcial do zênite, já que os outros lados da abertura são opacos. Podem proporcionar ventilação e a esquadria pode ser fixa ou móvel. Dentre esses sistemas pode-se destacar os lucernários, os monitores e os lanternins.

Os lucernários são aberturas verticais ou inclinadas construídas no próprio telhado. As aberturas conhecidas como dente de serra consistem em aberturas tipo lucernário, construídas em série sucessiva e paralela, figura 2.18.



Figura 2.18 - Abertura tipo dente de serra (Baker et al., 1993, p.5.15)

Os monitores são aberturas formadas pela suspensão de uma parte central do telhado. A abertura localiza-se nos vãos existentes na parte suspensa do telhado, a figura 2.19 refere-se a uma série de aberturas monitor.



Figura 2.19 - Abertura tipo monitor (Baker et al., 1993, p.5.15)

Os lanternins consistem em uma elevação do telhado, no ponto mais alto do telhado ou de uma cúpula, geralmente, de forma circular, as aberturas localizam-se no vão entre a elevação e o telhado. A figura 2.20 trata de um lanternin em uma cúpula (Baker et al., 1993, p. 5.14-5.17).

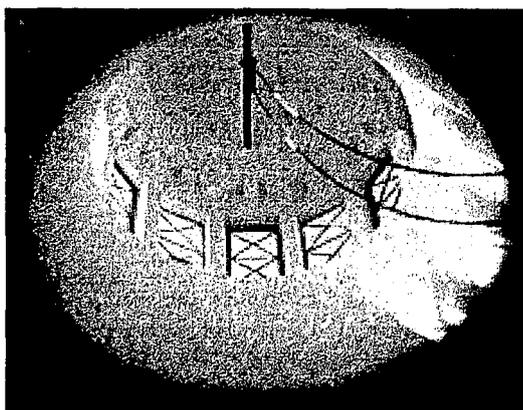


Figura 2.20 - Vista interna de uma abertura tipo lanternin (Baker et al., 1993, p.5.17)

As aberturas parcialmente voltadas para o zênite apresentam vantagens como: permitir mais facilmente o controle do ofuscamento (utilizando-se os mesmos elementos usados em aberturas verticais como beirais, brises e lâminas), beneficiar a entrada da luz quando o sol está baixo e proporcionar maior conservação de energia. Como

desvantagens: podem admitir menos luz por unidade de vidro que uma abertura orientada diretamente para o zênite e são mais difíceis de adicionar ao edifício, por isso, devem ser integradas no estágio inicial do projeto (Lam, 1986, p.146).

2.2.2.3 Análises sobre aberturas zenitais

Existem vários estudos e análises sobre o comportamento da luz natural ao incidir sobre sistemas zenitais. O conhecimento dessas informações é sem dúvida de grande utilidade quando se quer projetar um sistema zenital, principalmente por esse sistema apresentar algumas características bastante distintas daquelas encontradas em um sistema lateral.

Aberturas zenitais geralmente proporcionam uma distribuição dos níveis mais uniforme. Além disso, também admitem mais luz natural por metro quadrado de vidro que uma abertura lateral. Proporcionalmente, em alguns casos, pode ser até três vezes mais efetiva como fonte de luz que uma abertura lateral (Energy Research Group, 1994, p. 8). Por outro lado, sistemas zenitais usualmente têm visão de grandes porções do céu, onde a disponibilidade de iluminação exterior é maior, com isso, a possibilidade de ofuscamento é maior (Robbins, 1986, p.89).

Robbins (1986, p. 87-109) apresenta vários estudos sobre sistemas zenitais analisando as iluminâncias e a distribuição dos níveis. As variáveis sobre seus modelos de análise consideram o pé-direito da sala e a quantidade, a geometria e as dimensões da abertura, sobre condições de céu encoberto e céu claro.

Sobre as aberturas totalmente voltadas para o zênite, o autor ressalta aspectos como: a iluminância interna sobre céu encoberto é significativamente maior que sob céu claro (excluída a luz solar direta), assim como os níveis apresentam-se maiores no verão que no inverno; maior número de pequenas aberturas espaçadas proporcionalmente em breves intervalos providenciam melhor distribuição que grandes aberturas espaçadas em maiores intervalos; a espessura do forro exerce importante influência, figura 2.21, quanto mais espesso (forro 2), menor nível interno, assim como a inclinação do forro (forro inclinado) favorece sensivelmente a distribuição dos níveis; a refletividade da abertura também exerce influência, sendo que, maior refletividade associa-se a maiores níveis.

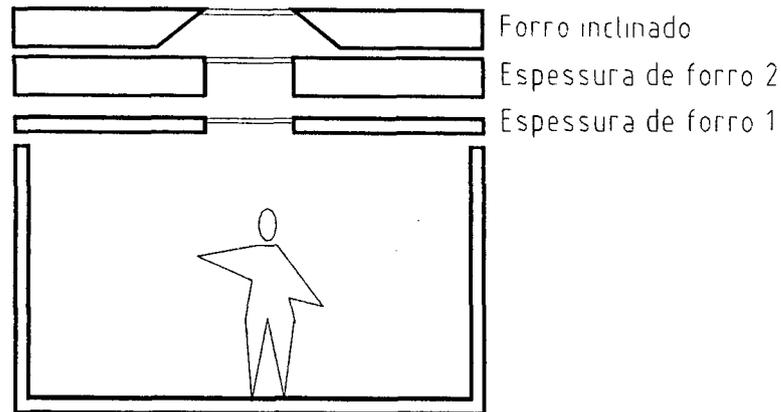


Figura 2.21 - Corte esquemático de modelo com variação de forro em abertura zenital

No caso das aberturas zenitais voltadas parcialmente para o zênite (monitor e lucernário) ressaltam-se observações como: nas aberturas tipo dente de serra (lucernário) a distribuição dos níveis é diferente entre uma série de aberturas e uma abertura individual; numa série de aberturas a distribuição abaixo da primeira abertura é significativamente diferente das outras; a condição do céu influencia muito a distribuição dos níveis. Nas aberturas tipo monitor observou-se que, a distribuição da luz não apresenta diferenças significativas entre uma série de aberturas monitor e uma abertura individual, e numa série de aberturas a distribuição abaixo da primeira abertura não apresenta-se muito diferente daquela observada nas outras.

Também Moore (1985, p.90-103) realizou extenso trabalho de análise sobre modelos com aberturas zenitais, simulando com modelos em escala, sob condição de céu claro e encoberto. O autor analisou variáveis como a geometria da abertura, da sala e o tipo de vidro.

Sobre as análises com aberturas voltadas diretamente para o zênite (domos) pode-se ressaltar observações como: com vidro claro, a forma do vidro (côncava, convexa ou planar) tem pouco efeito na transmissão e distribuição da luz que penetra no ambiente, porém vidros translúcidos (porque mudam a direção da luz através da refração e reflexão) afetam a transmissão e distribuição da luz solar direta. Da mesma forma, o aumento dos coeficientes de reflexão do plano de cobertura externo não influencia às aberturas com vidro plano e côncavos e também exercem pouca influência sobre vidros claros convexos.

Das análises sobre aberturas voltadas parcialmente para o zênite, tipo monitor, pode-se ressaltar observações como: comparando-se abertura monitor orientada para o sul, com vidro claro, e abertura monitor orientada para o norte, com vidro translúcido, a abertura monitor com vidro translúcido apresentou luminância interna significativamente maior.

Com objetivo de avaliar o comportamento da luz natural admitida em aberturas zenitais, Cábus (1997, p.153) desenvolveu seu trabalho sobre várias tipologias de aberturas zenitais, analisando a distribuição das iluminâncias. O trabalho foi realizado através de simulações computacionais, utilizando o programa Lumen Micro®. Tendo algumas conclusões como: o aumento da refletividade das superfícies é fator determinante na melhoria da distribuição de iluminâncias em um ambiente interno; o aumento no número de aberturas em um ambiente tende a melhorar o desempenho na distribuição, mas até certo limite, após este, a melhora é insignificante; aberturas proporcionalmente distribuídas em relação a suas dimensões e ao ambiente melhoram a distribuição.

Um trabalho realizado por Bouchet et al. (1996, p. 293-298) sobre coletores e dutos de luz com a finalidade de iluminar espaços subterrâneos (metrô e outros) apresentou resultados interessantes. O método utilizado foi simulação computacional. Os sistemas de iluminação consistem em aberturas zenitais e dutos de condução da luz.

Quatro tipos de aberturas zenitais foram analisadas, que estão representadas na figura 2.22. O tipo 1 está voltado diretamente para o zênite, os outros tipos voltados parcialmente para o zênite (lucernário) e orientados para o norte (orientação sul no hemisfério norte). A área de abertura (ou base da abertura) é um quadrado com 1 x 1 metros e a altura da abertura também é de um metro (os tipos 2, 3 e 4 também foram analisados com altura de 2 metros).

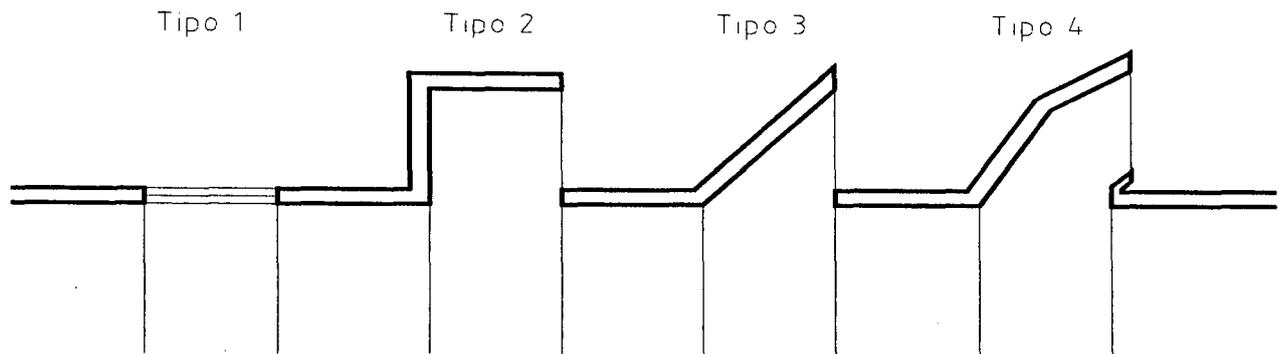


Figura 2.22 - Corte esquemático de tipologias de aberturas zenitais

Na avaliação das aberturas zenitais foi considerado como parâmetro de eficiência a razão entre o fluxo luminoso que entra na abertura e aquele que sai, comparado a uma situação sem a abertura. A abertura tipo 1, como esperado, apresentou maior eficiência, seguida pela abertura tipo 3. Aumentando a altura das aberturas tipo 2, 3 e 4 a eficiência também aumenta, mas a abertura tipo 3 continua apresentando maior eficiência que as outras. A análise sobre a distribuição dos níveis apresentou traçado das curvas isolux mais regular para a abertura tipo 1. Também é interessante ressaltar que nas análises sobre os dutos de condução da luz, observou-se que o revestimento dos mesmos com superfícies especulares (coeficiente de reflexão maior que 80%) permitia conduzir luz a uma profundidade de até 15 vezes a largura do duto, enquanto o revestimento com superfícies difusoras (coeficiente de reflexão igual a 80%) o limite seria até 2.5 vezes a largura do duto. Outra observação interessante é que das análises efetuadas sobre a geometria do duto, entre formato retangular e quadrado, o quadrado apresentou melhor eficiência.

Utilizando modelos em escala, Lam (1986, p.138-156) desenvolveu diversas análises com aberturas zenitais e elementos de controle, comparando tipologia e geometria de aberturas e elementos de controle, assim como, variações decorrentes da orientação, tipo de vidro, e condição de céu (claro e encoberto). Pode-se ressaltar observações como: lucernários orientados para o norte (sul no hemisfério norte) recebem duas vezes mais luz no inverno que no verão; uma abertura orientada diretamente para o zênite, com vidro difusor, proporciona maior iluminância no período próximo às 12:00 h,

mas menor iluminância no início e final do dia, que uma abertura lucernário orientada para o norte, com vidro claro. Porém, além de suas análises o autor sugere algumas recomendações para melhorar a performance das aberturas zenitais: em climas temperados inclinar e orientar as aberturas tanto quanto possível para reduzir as desvantagens sazonais; usar pequenas áreas de vidro transparente é melhor que grandes áreas de vidro com baixa transmissividade; orientar aberturas de forma que redirecionem a luz para superfícies como paredes, iluminando as superfícies de trabalho indiretamente; inserir elementos de controle da luz direta para reduzir ofuscamento e redirecionar a luz .

2.2.3 Os Elementos de Controle da Luz Solar Direta

A luz natural traz consigo calor e radiação infravermelha, além disso, a intensidade da luz solar direta pode encontrar-se acima do desejado, o que evidencia a necessidade de controle sobre a mesma. Os elementos de controle da luz solar direta desempenham a principal função de impedir o acesso da radiação solar direta no ambiente interno. Porém com o maior enfoque dado a iluminação natural nas últimas décadas, esses elementos passaram a contribuir no desempenho da abertura, como o controle do ofuscamento, redirecionamento da luz e melhoria na distribuição.

A luz permite ser manipulada através do uso consciente de fenômenos físicos como reflexão, transmissão, absorção, refração, difusão, polarização e outros. "Quando a luz incide numa superfície, uma fração do total incidente é refletida, ou seja, retorna ao hemisfério de procedência sem penetrar na matéria; uma outra porção é absorvida pelo material, configurando-se num ganho de energia, enquanto uma última fração pode ser transmitida para o outro lado, no caso de superfícies transparentes ou translúcidas" (Pereira, 1993, p.257-259).

Os dispositivos de controle da luz solar promoverão intervenções no curso natural da luz ao serem inseridos nas aberturas. Sendo assim é possível efeitos como o redirecionamento da luz através da inserção de um espelho diante de uma abertura, que provocará uma reflexão especular dos raios que incidirão sobre o mesmo, da mesma

forma a utilização de materiais difusores promoverão a reflexão da luz de forma difusa, ver figura 2.23.

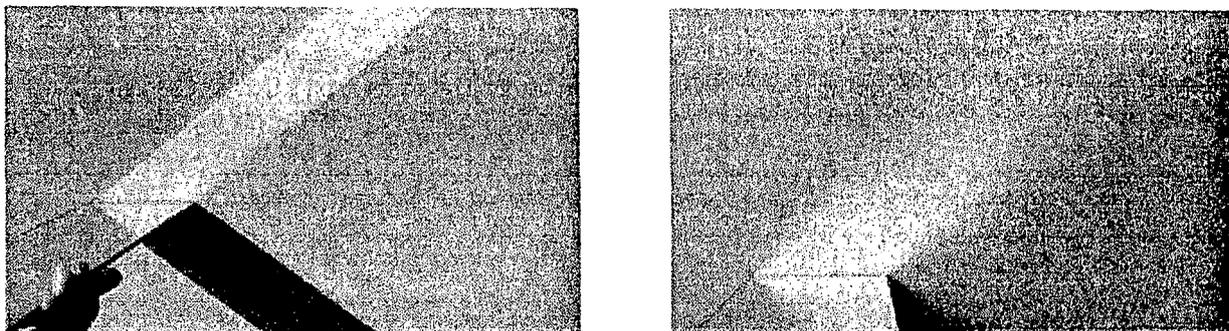


Figura 2.23 - Reflexão especular, à esquerda, e difusa, à direita (Baker et al., 1993, p.5.50)

Os elementos de controle, além de redirecionar, admitir ou bloquear a luz que entra em um ambiente interno através do uso consciente dos fenômenos físicos, que podem provocar os materiais empregados, também exigem cuidado no projeto quanto ao formato, dimensionamento, inclinação, distância e posicionamento do elemento em relação a abertura e orientação do mesmo em relação ao sol.

Conforme classificação realizado por Baker et al. (1993, p.5.3), os elementos de controle podem ser divididos em cinco grupos: os elementos flexíveis, os elementos fixos e opacos, os elementos filtrantes da luz solar, os elementos obstrutivos da luz solar e as superfícies de separação.

1. Os elementos flexíveis são elementos que obstruem totalmente ou parcialmente a luz solar direta, gerando uma luz difusa, permitem a ventilação natural e podem ou não obstruir a visão do exterior, são fixos ou móveis. Os toldos são exemplos, figura 2.24.



Figura 2.24- Elemento flexível, tipo toldo, Montevideo (arquivo da autora)

2. Os elementos fixos são componentes que possuem a função específica de redirecionar ou obstruir a luz solar direta. Eles obstruem parcialmente a visão do ambiente externo, são estruturas fixas que em algumas situações apresentam mobilidade ou possibilidade de ajuste da posição, ou inclinação dos mesmos em relação à abertura. Os brises ou “brise soleil” são exemplos de elementos opacos que permitem mobilidade. Na figura 2.25, os elementos apresentados são opacos e fixos, não permitem mobilidade.

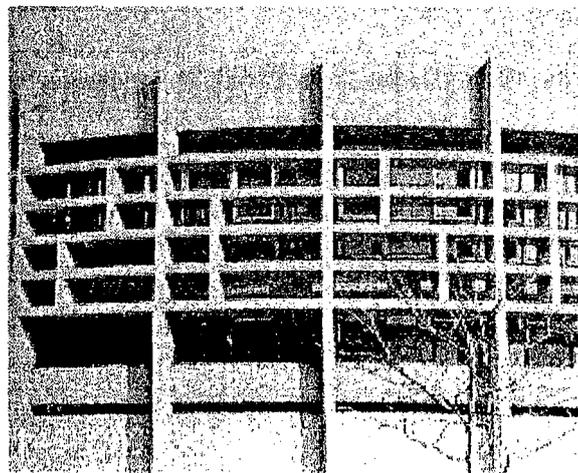


Figura 2.25 - Elemento fixo, rígido e externo (Baker et al, 1993, p.5.25)

3. Os elementos filtrantes da luz solar são componentes que cobrem a superfície de uma abertura, permitindo a ventilação e protegendo o interior da radiação solar direta, mas impedem a visão do ambiente externo. Os materiais podem ser transparentes,

difusores ou redirecionadores da luz solar direta. Os elementos podem ser fixos, móveis ou ainda ajustáveis. As venezianas e persianas são exemplos, figura 2.26.

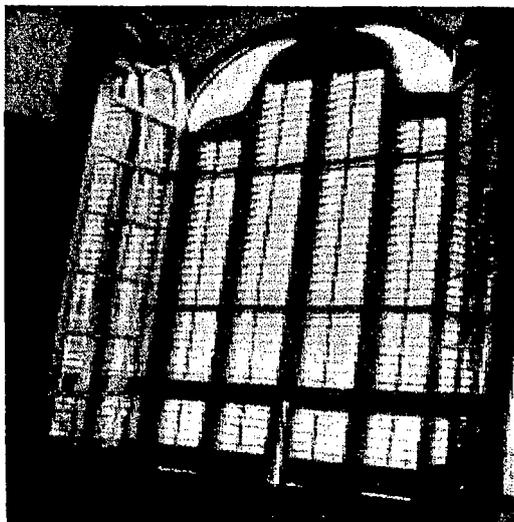


Figura 2.26 - Elemento filtrante, tipo veneziana (Baker et al., 1993, p.5.24)

5. Os elementos obstrutivos da luz solar são componentes opacos, ajustáveis ou móveis que cobrem toda a superfície da abertura, obstruindo total ou parcialmente a ventilação e a visão do ambiente externo. Estes localizam-se no interior ou exterior da edificação, e, de acordo com o material utilizado, podem apresentar características de transparência, difusão e redirecionamento da luz solar direta. As cortinas são exemplos comumente utilizados, figura 2.27.

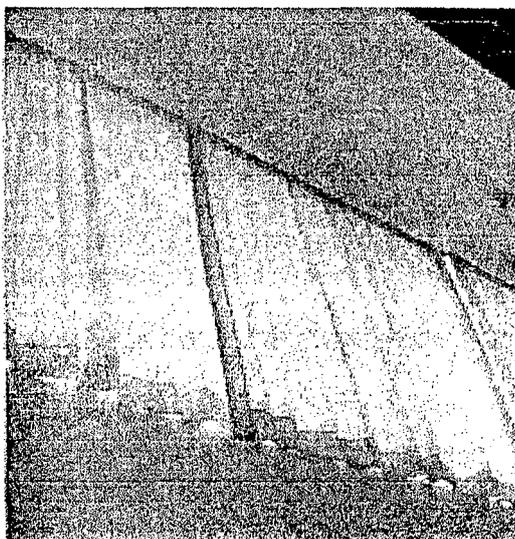


Figura 2.27 - Elementos obstrutivo, tipo cortina (Baker et al., 1993, p.5.2)

5. As superfícies de separação são elementos de material transparente ou translúcido (de acordo com o material empregado pode apresentar índices maiores ou menores de reflexão, difusão e redirecionamento da luz solar direta) que separam dois ambientes permitindo que a luz passe através dele, mas não admitindo a passagem de ar e às vezes obstruindo até a visão. Podem ser fixos ou móveis, sendo o vidro um exemplo.

2.2.3.1 Elementos de controle inovativos

O desenvolvimento de novos materiais e sistemas tem melhorado a eficiência dos sistemas de iluminação natural. Os objetivos no desenvolvimento de novos materiais são: evitar a entrada da radiação indesejável, sem que isso signifique reduções nos níveis internos; aumentar a eficiência dos sistemas de iluminação conduzindo a luz para locais de difícil acesso, como fundo de salas; e o controle do ofuscamento.

Uma dessas inovações é a substituição dos vidros comercialmente disponíveis, por vidros especiais, com o objetivo de controlar a perda e os ganhos de calor sem prejudicar a passagem da luz desejável. Alguns permitindo até o contato visual com o ambiente externo.

Os vidros ou acrílicos prismáticos, figura 2.28, alteram a direção do fluxo luminoso. Consistem numa série de vidros prismáticos ajustados entre dois panos de vidro plano, usam a refração e reflexão para redirecionar a luz para locais pouco iluminados, e/ou refletir para o exterior a radiação indesejável. Possuem custos mais acessíveis mas obstruem a visão do exterior (Baker et al., 1993, p.4.15; Energy Research Group, 1994, p.9).

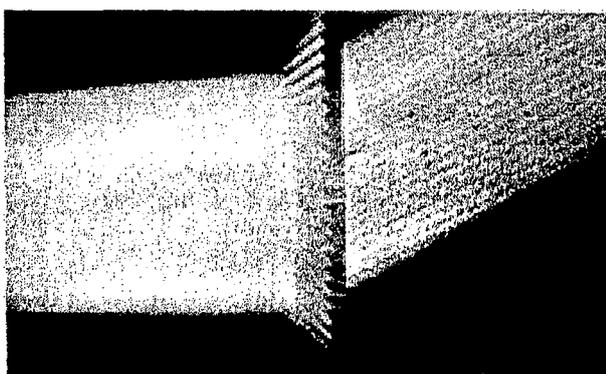


Figura 2.28 - Redirecionamento da luz com vidro prismático (Baker et al., 1993, p. 5.57)

Similar ao vidro prismático existe também o filme prismático, sua principal vantagem consiste em ser uma fina película que pode ser usado como revestimento superficial de um vidro plano.

A veneziana espelhada é outro sistema de controle desenvolvido para ser usado em conjunto com vidros. O dispositivo consiste em um conjunto de lâminas fixas dentro de um vidro duplo, cada lâmina possui três faces de forma que, de acordo com a altitude solar, os raios solares podem ser refletidos ao interior ou exterior. Raios solares com altitude elevada são refletidos para o exterior, figura 2.29.

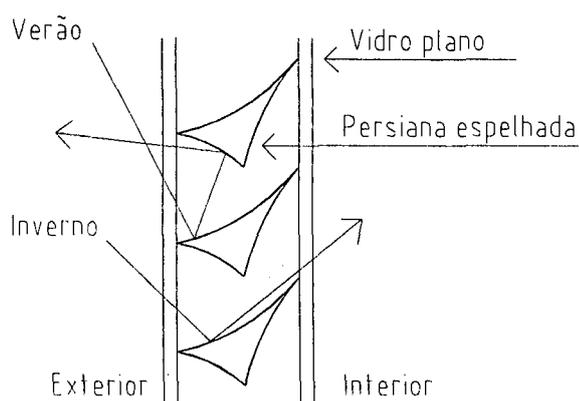
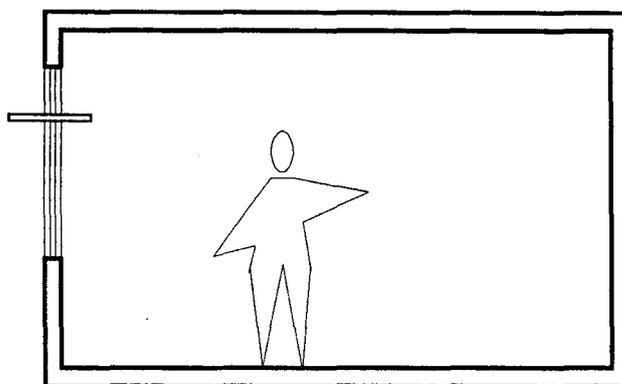


Figura 2.29 - Detalhe do funcionamento de uma veneziana espelhada

Materiais transparentes tipo fibra ótica, plástico espumoso e aerogel têm merecido atenção e estudos, pois os mesmos transmitem a luz e também funcionam como um material de vidro, sua transmissividade varia de 45% a 80%. O aerogel, por exemplo, tem baixa condutividade térmica podendo ser usado em forma de sanduíche com proteção de vidro nos lados (Energy Research Group, 1994, p.10).

As bancadas de luz ou "light-shelves", figura 2.30, são elementos de controle fixos, retos ou curvos, introduzidos nas aberturas, acima do nível do olho, para reduzir o ofuscamento e direcionar a luz para o fundo dos ambientes. As bancadas de luz não são conceitos recentes, já que sua primeira aplicação data da década de 50, mas recentemente, implementações têm sido feitas nesse sistema e apresentado bons resultados, como o revestimento com superfícies especulares (Pereira, 1993, p.262; Crisp et al., 1988, p.20).

Baker et al. (1993, p.51) realizou diversos estudos sobre “light-shelves”, analisando a contribuição desse sistema sobre o comportamento dos níveis internos, o controle do ofuscamento e da luz solar direta. Os resultados apresentaram bom desempenho do sistema no controle do ofuscamento, melhora na quantidade e qualidade da luz e limitações no controle da luz solar direta, nas situações de baixa altitude solar.



Corte esquemático

Figura 2.30 - Prateleira de luz ou “light-shelves”

Uma análise experimental realizada por Aizlewood (1993, p.141-152) sobre alguns sistemas de controle inovativos, avaliou e comparou por dezoito meses os resultados de quatro sistemas: bancadas de luz, vidros prismáticos, persianas espelhadas e filme prismático. Os elementos foram montados em uma escala real, simulando uma sala de escritório típico. Os valores encontrados mostraram resultados muito favoráveis com os novos sistemas, comparando-se a sistemas convencionais de janelas com vidro e persianas, mesmo a bancada de luz, que dos sistemas analisados é o mais simples, mostrou melhor performance. Os parâmetros da análise foram os níveis de iluminação, distribuição dos níveis, e controle do ofuscamento.

2.2.3.2 Análises sobre os elementos de controle

Alguns tipos de elementos de controle, como cortinas e venezianas, têm seu uso bastante difundido. Porém, nas últimas décadas esses sistemas passaram a desenvolver outras funções, além do controle da luz direta, associadas ao desempenho da abertura.

São infinitas as possibilidades de projeto, na procura de soluções que melhorem a performance de um sistema de iluminação natural. Os trabalhos já desenvolvidos apresentam-se como importante base de apoio aos projetistas, na tarefa de encontrar a solução mais adequada.

Lam (1986, p.144-156) recomenda a utilização dos elementos de controle para melhorar a performance de um sistema de iluminação natural, principalmente no controle do ofuscamento e no redirecionamento da luz. O autor sugere várias estratégias que podem apresentar bom desempenho. Na figura 2.31 pode-se observar algumas dessas soluções. Os elementos A, B e C referem-se a aberturas totalmente voltadas para o zênite, os elementos D, E e F referem-se a aberturas parcialmente voltadas para o zênite. Os elementos A e E são externos, os elementos B, C, D e F são internos. Além dessas sugestões inúmeras outras soluções podem ser adotadas em um sistema de iluminação natural.

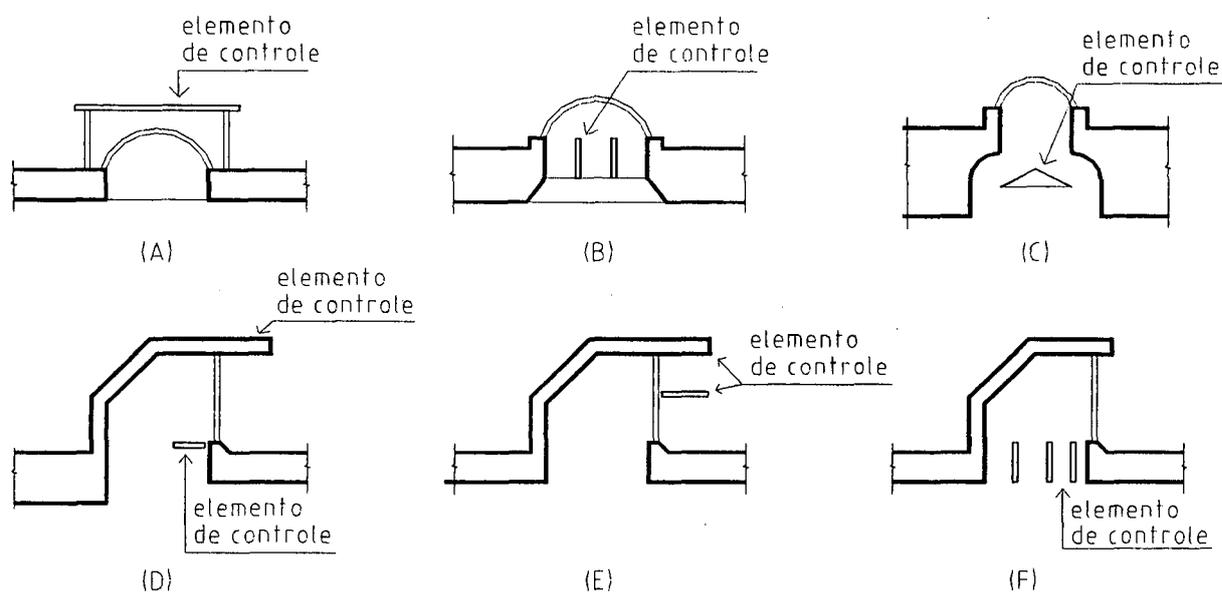


Figura 2.31 - Aberturas zenitais com elementos de controle - corte esquemático

Uma interessante estratégia sugerida por Lam, refere-se aos captadores de luz solar, que são elementos dispostos diante de aberturas zenitais que estejam orientadas em posição contrária ao sol, de forma que a luz direta incidirá sobre o captador e será refletida para a abertura, figura 2.32. Esses dispositivos são adequados para aberturas

monitor e lucernário, orientadas para o sul, e aberturas monitor com orientação leste-oeste. Estes dispositivos foram analisados através de modelo em escala. Os resultados apresentaram aumento de 100% nas iluminâncias internas e melhora na distribuição, na condição de céu claro. Porém na condição de céu encoberto apresentaram redução de 50% nas iluminâncias.

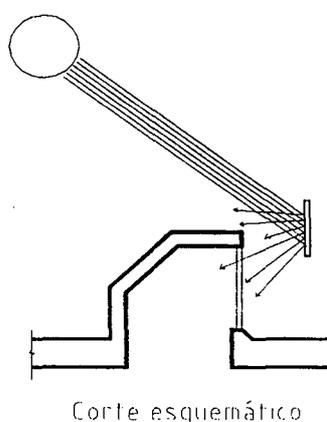


Figura 2.32 - Abertura zenital lucernário com captador solar

Moore (1985, p. 94-103) também realizou alguns estudos interessantes sobre elementos de controle. Entre estes pode-se destacar estudos com a inserção de um dispositivo de controle abaixo de uma abertura voltada diretamente para o zênite, trata-se de um elemento com formato semelhante a uma pirâmide, com vidro claro, figura 2.33. Os resultados apresentados com esse sistema foi comparando com a mesma abertura com vidro translúcido. O elemento além de bloquear a luz solar direta, que incide sobre a abertura, redistribui a luz de forma mais uniforme no ambiente interno.

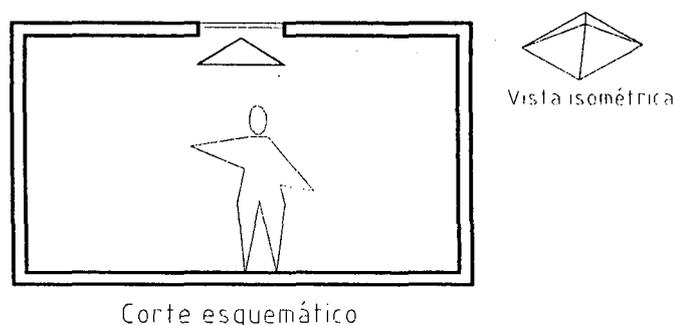


Figura 2.33 - Abertura zenital com dispositivo de controle interno

Ainda referindo-se ao dispositivo da figura 2.32, sobre o tipo de material utilizado na superfície do elemento de controle, pôde-se observar o seguinte: a utilização de acabamento difusor (superfície branca) apresenta melhora na distribuição, mas não altera muito as iluminâncias internas; com acabamento especular (superfície espelhada) ocorre melhora na distribuição e as iluminâncias dobram seus valores. Segundo o autor, a performance do sistema associa-se a uma função da distância abaixo da abertura e da inclinação do refletor.

Outro dispositivo de controle, analisado por Moore, consiste em uma série de pequenas placas verticais dispostas sobre uma abertura tipo lucernário, figura 2.34. Esse sistema foi desenvolvido por Mazria (1981, apud Moore) e utilizado no projeto de uma biblioteca. Comparando-se uma abertura lucernário com o dispositivo da figura 2.34, com vidro claro, a uma abertura lucernário, somente com vidro translúcido, as iluminâncias internas com o sistema de controle apresentaram-se equivalentes ao dobro daquelas com a abertura apenas com o vidro translúcido. Contudo, a distribuição das iluminâncias, com o sistema de controle não apresentou boa distribuição, neste caso, o autor sugere o uso de maior número de placas para conseguir-se uma distribuição mais uniforme. Não obstante, em outra análise, as placas foram inclinadas e os resultados apresentaram melhora na distribuição dos níveis, com o mesmo número de placas (Figura 2.34).

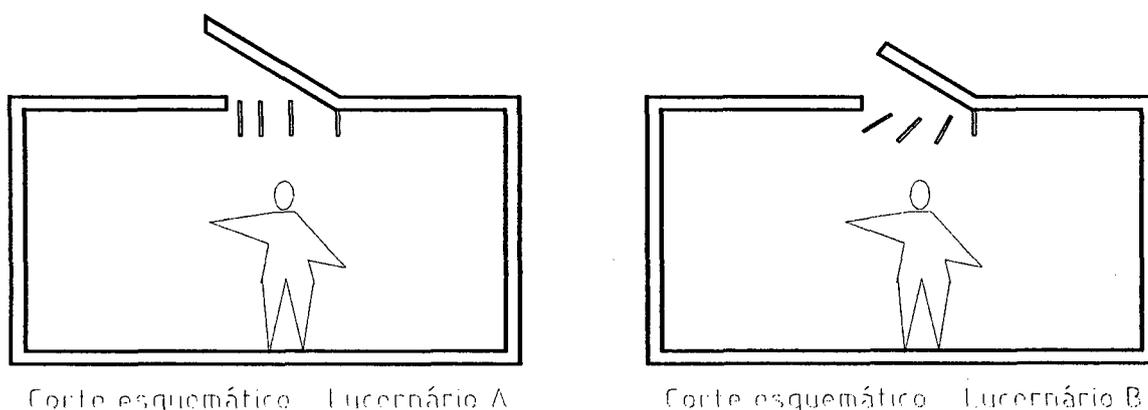
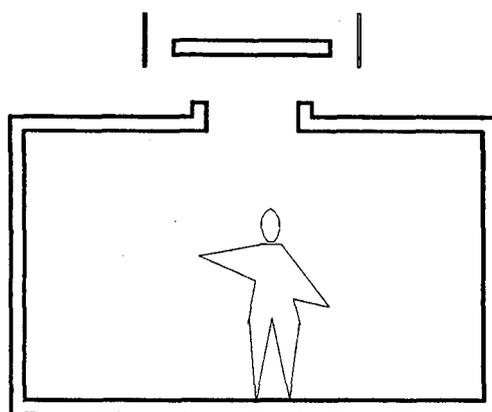


Figura 2.34 - Abertura lucernário com dispositivo de controle interno

Moore também analisa o sistema proposto por Lam, o captador solar. Os elementos são dispostos em uma abertura monitor, figura 2.35. Comparando esse

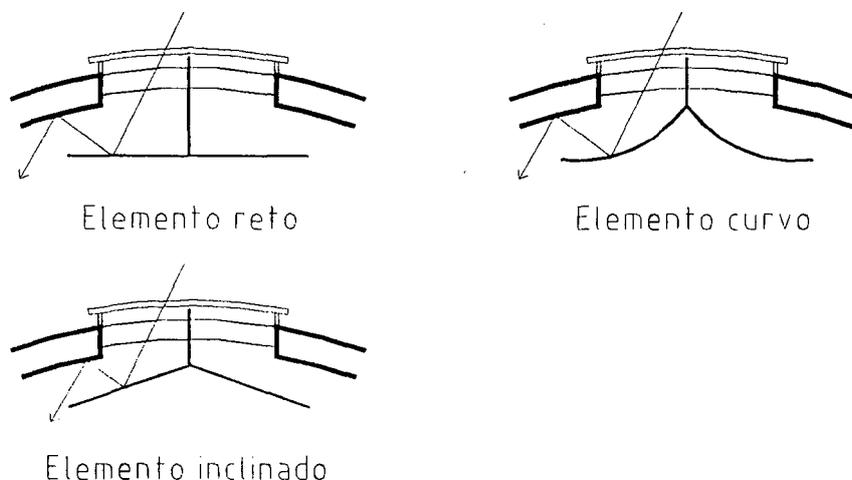
sistema a uma abertura zenital, voltada diretamente para o zênite, com vidro translúcido, é observada melhora nas iluminâncias. Comparando o mesmo sistema com o sistema desenvolvido por Mazria, disposto em uma abertura monitor, a distribuição é melhorada mas as iluminâncias diminuem.



Corte esquemático

Figura 2.35 - Abertura monitor com dispositivo de controle externo

O estudo desenvolvido para o edifício de exposições temporárias de artes, na Bienal de Veneza, apresentou análises sobre alguns sistemas de controle internos. As simulações utilizaram modelos em escala. O sistema consiste em uma abertura zenital voltada diretamente para o zênite, abaixo da abertura foram dispostos elementos de controle, figura 2.36. Três geometrias foram analisadas: superfície reta, curva e inclinada.



Elemento reto

Elemento curvo

Elemento inclinado

Figura 2.36 - Variações na geometria de alguns elementos de controle internos

O elemento com superfície côncava apresentou maiores iluminâncias e melhor distribuição dos níveis. Após as análises sobre a geometria do elemento, foram realizados estudos sobre o coeficiente de transparência e refletância mais adequado. Os estudos resultaram na escolha de um material que apresentasse transparência em torno de 23%. Na definição do material foi verificada a possibilidade de utilizar lâminas de metal perfurado, procurou-se materiais que apresentassem 20% de sua área perfurada, dentro dessa exigência, foram analisados 4 diâmetros: 1mm, 2mm, 4mm e 8mm. A chapa perfurada com diâmetros de 1mm apresentou melhor uniformidade (Traverso, 1998, p.441-444).

O trabalho desenvolvido por Basso (1997, p. 315-318), com modelos em escala reduzida, foi realizado sobre aberturas laterais, mas algumas de suas conclusões podem servir aos sistemas zenitais. Foram analisados oito sistemas de proteção solar, figura 2.37. Cinco sistemas foram executados com lâminas posicionadas na horizontal em diferentes formatos. Dois sistemas são superfícies verticais em duas posições opostas, um sistema é tipo toldo. Foram ensaiadas três orientações nordeste, norte e noroeste.

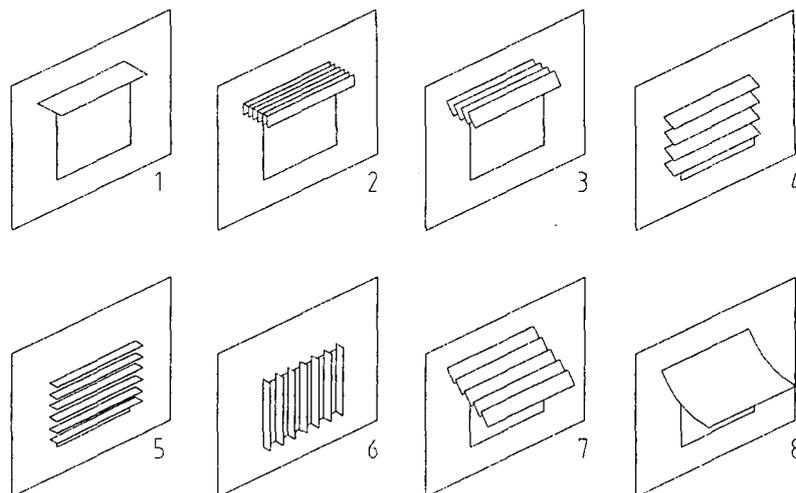


Figura 2.37 - Abertura lateral com elementos de controle externo em diferentes tipologias

Das conclusões apresentadas pode-se ressaltar: a interferência da cor no desempenho do brise, como esperado, existe, mas a maior ou menor interferência está associada a possibilidade de múltiplas reflexões que a geometria do elemento pode

oferecer; as soluções que não avançam sobre a área da abertura, os elementos 1,2,3, e 7, têm menor interferência na iluminação natural; quanto mais o dispositivo assemelhar-se a uma lâmina única horizontal posicionada sobre a abertura (brise 1), menor será a interferência na iluminação natural, mesmo quando é utilizado cor escura.

O trabalho desenvolvido na transformação do antigo pavilhão da Expo'92, Lisboa, em uma escola de engenharia, apresenta uma inovação na abertura tipo lucernário em conjunto com o dispositivo de controle apresentado por Moore, figura 2.38. ,

Segundo os autores do projeto, foi possível com o sistema apresentado e outros sistemas de iluminação natural desenvolvidos para a reforma do antigo pavilhão, diminuir excesso de iluminância próximo as aberturas, aumentar o aproveitamento da luz natural (através de reflexões) e ao mesmo tempo evitar problemas como superaquecimento e ofuscamento. Os estudos foram realizados através de simulação computacional (Cabeza et al., 1998, p.261-264).

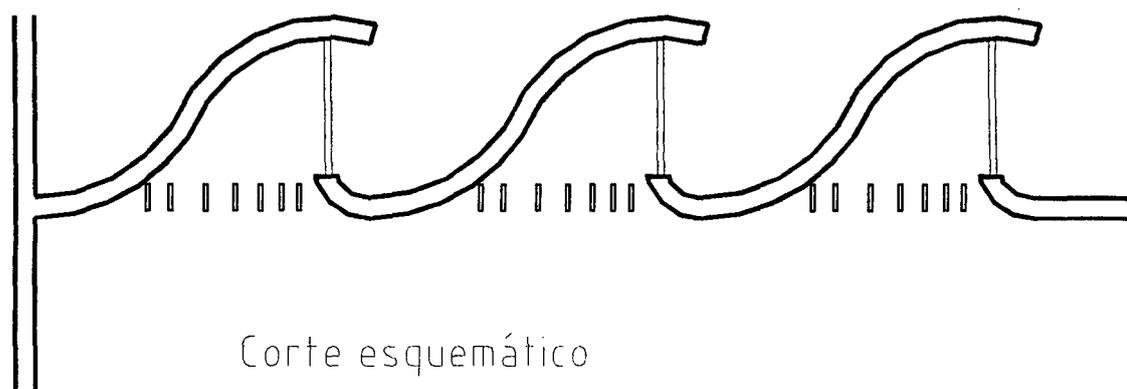


Figura 2.38 - Abertura lucernário com elemento de controle

Assim como o exemplo do antigo pavilhão da Expo'92, a procura por melhores soluções de projeto tem apresentado resultados bastante otimistas. O trabalho realizado por Beltrán et al. (1994, p.25-30) comprova esta hipótese. A equipe construiu um elemento de controle muito singular, figura 2.39, projetado para redirecionar a luz solar direta, nas diversas posições do sol com o decorrer das estações, estando este adaptado

a situação geográfica do local. O trabalho foi realizado através de medições e observações em escala e simulações computacionais.

O sistema de iluminação consiste numa abertura zenital voltada diretamente para o zênite, coberta com um vidro parcialmente difusor, a lateral da abertura voltada para o norte é revestida com uma superfície especular, com objetivo de refletir os raios solares de inverno (baixa altitude). O elemento de controle é dividido em duas metades, uma voltada para o lado sul e outra voltada para o lado norte, cada lado possui um formato. Pretendia-se dessa forma, obter o melhor aproveitamento do sol nas diferentes posições solares, além disso, o refletor possui alguns pequenos intervalos ou buracos por onde é possível a passagem de luz, que deve iluminar a porção da sala imediatamente abaixo do elemento de controle. A parte inferior do elemento de controle é uma superfície difusora.

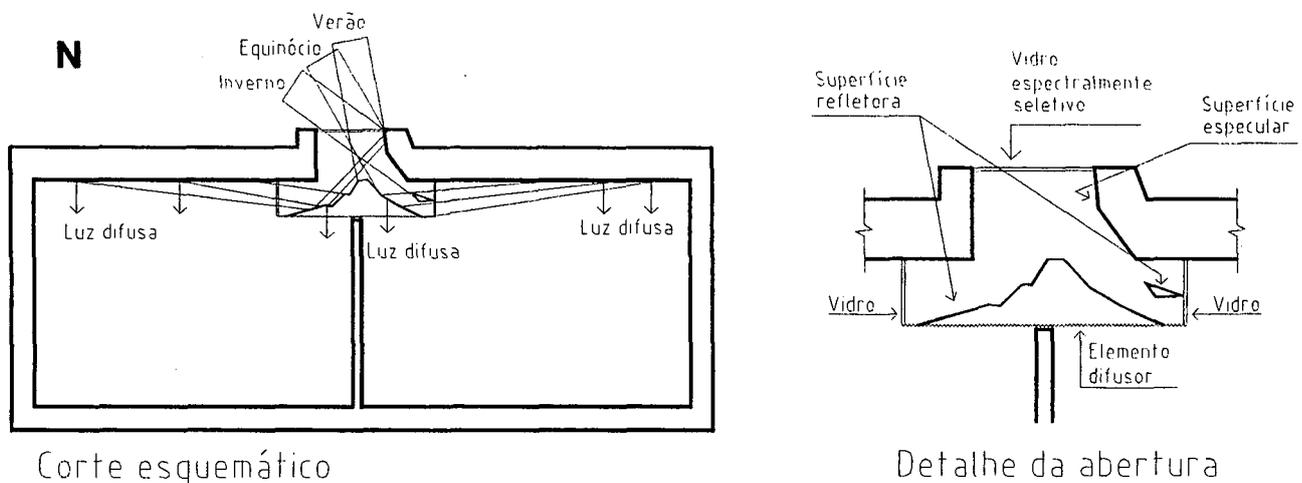


Figura 2.39 - Abertura zenital diretamente para o zênite com elemento de controle interno

Os resultados obtidos com o modelo desenvolvido apresentaram uma distribuição dos níveis uniformemente distribuída no ambiente interno, melhoras significativas na variação entre o máximo pelo mínimo nível (de até cinco vezes menos que a abertura sem o dispositivo de controle) e maiores níveis no fundo da sala para ambos os lados do ambiente.

2.3 MÉTODOS E PARÂMETROS DE ANÁLISE DA LUZ NATURAL

O desenvolvimento de uma análise sobre o comportamento da luz natural pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa refere-se ao processo de simulação ou previsão do comportamento da luz natural em um modelo de estudo. Finalizada a primeira etapa, e com os resultados dessa, é então possível proceder a análise propriamente dita, que corresponde a segunda etapa e refere-se aos parâmetros utilizados para a realização das análises.

2.3.1 Métodos de Previsão do Comportamento da Iluminação Natural

Existem três métodos para simular e prever o comportamento da luz natural. São eles: métodos com modelos físicos em escala reduzida ou escala real, métodos simplificados e métodos através de simulação computacional.

I. Método com modelo físico em escala

As maquetes ou modelos físicos em escala são simulações de um ambiente real existente ou em projeto, podendo ser em escala reduzida ou em escala real ("Mockups"). São ferramentas utilizadas por arquitetos há muito tempo. Segundo Schiler (1987, p.13), os modelos em escala podem ser extremamente fiéis a realidade, quando apropriadamente construídos, retratando a distribuição da luz natural dentro do modelo exatamente como aconteceria em uma situação real. Isto ocorre devido a pequena dimensão das ondas de luz, as ondas eletromagnéticas do espectro visível medem de 380 a 770 nanômetros (nm) de comprimento, o que significa ser menor que uma partícula de pó, sendo assim a luz em um modelo reduzido comporta-se da mesma forma que em uma situação real.

Para obter êxito com um modelo, deve-se respeitar ao máximo características como as dimensões, os revestimentos, a geometria, os coeficientes de reflexão e absorção dos materiais, tipo de vidro, mobiliário, detalhe de esquadrias, enfim, reproduzir as mesmas propriedades ou condições que encontraríamos na situação real, que se quer simular através do modelo em escala (Lam, 1986, p.189). Todos esses detalhes exigem

tempo, o que não indica os modelos em escala para resolverem dúvidas simples (Schiler, 1987, p.15).

Uma das vantagens dos modelos em escala é permitir avaliações quantitativas e qualitativas da luz. As medições quantitativas são feitas através de instrumentos fotoelétricos, as fotocélulas, que além de estarem calibradas, devem ter suas dimensões adequadas à escala do modelo. As avaliações qualitativas podem ser feitas através de observações, fotografias ou até mesmo filmagens (Moore, 1985, p.167). As medições podem ser desenvolvidas em condições simuladas com céu artificial ou sob condições de céu real. O céu artificial possibilita grande controle, mas sua construção e manutenção pode ser onerosa. O Céu real é facilmente acessível mas as variações das condições climáticas são de difícil controle e podem induzir a erros (Schiller, 1987, p.48).

Os modelos em escala apresentam vantagens como: ferramenta simples de projeto que pode ser entendida facilmente; possibilita alguns estudos precisos com baixo investimento; possibilita a avaliação de soluções e geometrias complexas; permite rápidas alterações em um mesmo modelo (por exemplo, avaliar diferentes tipos de abertura) e possibilita também avaliações de aspectos qualitativos como a identificação de problemas com ofuscamento (Baker et al., 1993, p.9.1). Podem ser considerados como aspectos desvantajosos: a necessidade de boa instrumentação fotométrica, que representa um custo significativo; a necessidade de utilização de céu natural que pode demandar extenso tempo, ou sua alternativa, o céu artificial, que envolve alto custo na construção e manutenção (Schiler, 1987, p.49 e 87).

II. Métodos simplificados

Os métodos simplificados permitem uma análise de forma simples e rápida do efeito relativo de diversos parâmetros de projeto. Mas os resultados obtidos são aproximados e limitados, permitem a análise de um ponto de cada vez, encontram-se limitados por suposições teóricas inerentes a processos gráficos simplificados e limitados com relação a estudos paramétricos (Pereira, 1995, p.34). Ainda assim, eles podem ser adequados e muito úteis nos primeiros estágios de um projeto. Existem várias ferramentas simplificadas, cabendo ao projetista escolher qual a mais apropriada de acordo com a dúvida a ser solucionada.

Os métodos simplificados podem ser: matemáticos, utilizando-se de fórmulas e equações; tabulares, apresentados em forma de tabelas; ou gráficos que apresentam-se em forma de diagramas e nomogramas.

Como método matemático pode-se citar o “método do fluxo total” ou “método dos lúmens”, baseado em cálculos de transferência de fluxo. Esse método foi desenvolvido inicialmente para o cálculo com iluminação artificial e mais tarde adaptado à iluminação natural. O método considera o sistema em análise como uma caixa fechada, na qual a luz é admitida através da abertura. Após a iluminância na superfície da abertura ser estabelecida, multiplica-se pela área da janela e o produto será o fluxo total incidente na janela (em lúmens). Após alguns tratamentos sobre esse valor, relativos a área, fatores de manutenção e outros, obtém-se um valor médio de iluminação, mas é possível também obter o valor em um dado ponto. (Baker et al., 1993, p. 9.7, Souza, 1997, p.37).

Os métodos tabulares são baseados na avaliação do “daylight factor”, ou da componente do céu, sobre extensos parâmetros geométricos que descrevem a abertura e a posição do ponto de referência. Destacam-se pela utilização rápida e fácil (Baker et al., 1993, p. 9.7).

Os métodos gráficos oferecem uma extensa variedade de opções, apresentam-se em forma de diagramas e nomogramas. O diagrama de pontos é um método bastante utilizado, baseado na projeção estereográfica da abóbada celeste, o valor procurado, normalmente a componente celeste, é encontrada através da contagem dos pontos, que podem ser vistos através da projeção da janela sobre o diagrama (Baker et al., 1993, p. 9.7).

III. Métodos computacionais

Os computadores são equipamentos destinados, entre outras funções, a realizar extensos cálculos com grande rapidez, utilizando-se de algoritmos, que são descrições de conjuntos de comandos. A estrutura do método de simulação computacional sobre iluminação é um modelo matemático baseado na distribuição física da luz.

Os métodos computacionais destacam-se por apresentar vantagens como: facilidade e rapidez em efetuar uma grande quantidade de cálculos matemáticos; possibilidade de visualização de um ambiente ainda não construído, podendo ser alterado parcialmente ou totalmente, segundo a conveniência do projeto (Romero, 1995,

p. 32) e ainda permitir simultaneamente, avaliações térmicas e a possibilidade de serem conectados diretamente com programas de modelagem de consumo de energia (Pereira, 1995, p. 34).

Por outro lado, os métodos computacionais, encontram-se limitados a suposições teóricas usualmente assumidas em algoritmos de problemas complexos e necessitam de equipamento computacional adequado (Pereira, 1995, p. 34). Também o tratamento das propriedades dos materiais e a entrada de dados fotométricos apresentam-se com limitações dos programas computacionais (Houser, 1999, p.117).

No caso da simulação da iluminação em ambientes físicos, a resolução analítica do problema, emissão, transmissão e propagação da luz requer a seleção de algoritmos para simular a fonte de luz, o ambiente, os materiais, a geometria do edifício e os móveis. Para a simulação do tipo de céu assume-se um tipo ideal de céu, usualmente um padrão da C.I.E. (Baker et al., 1993, p.9.8), que estão estocados no programa como um banco de dados. Os algoritmos mais conhecidos que recriam uma iluminação global semelhante a uma situação real são o método "ray-tracing" e o método da radiosidade.

O método "ray-tracing" foi um dos primeiros algoritmos de iluminação global a serem desenvolvidos. Este método considera a luz como milhões de fótons (pequenas partículas de luz), que viajam da fonte de luz até encontrarem alguma superfície no ambiente. Dependendo do material da superfície, alguns desses fótons são absorvidos, enquanto outros são refletidos de volta ao ambiente. A iluminação final de um ambiente é determinada pela interação entre as superfícies e os milhões de fótons que são emitidos pela fonte de luz. Os fótons primeiramente considerados são aqueles que entram no olho do observador, o algoritmo trabalha com o tracejamento dos raios em sentido contrário, ou seja, voltando da posição do observador até a interseção com a superfície. (Manual do Lightscape, p. 1-7)

O método da radiosidade foi inicialmente desenvolvido com o objetivo de simular a transferência de calor (radiação) entre superfícies, sendo mais tarde utilizado para simular a propagação da luz. Consiste em uma divisão inicial das superfícies em pequenos elementos, o processo calcula a quantidade de luz distribuída da fonte para cada um desses elementos e calcula também as reflexões de um elemento para outro. As superfícies são assumidas como perfeitamente difusoras (lambertianas), ou seja, refletem

a luz igualmente em todas as direções. Usando métodos interativos são computados os níveis finais de iluminação (Manual do Lightscape, p.1-10; Dehoff, 1993, p.342).

Em levantamento e estudo executado pela IESNA - Illuminating Engineering Society of Northern America (1997, p.41-50) são destacados os seguintes programas com capacidade de executar análises de iluminação natural: Luxicon 1.2, LightCad 2.0, Beem 1.01, Adeline 2.0, Radiance 3.0, Lumen Micro 7.1, Lightscape 3.0 e Light. Todos esses programas operam em sistemas DOS ou Windows e estão disponíveis no mercado para compra, com exceção do Radiance 3.0, desenvolvido pelo laboratório de Berkeley, que necessita de uma plataforma que opere em sistema Unix e é distribuído gratuitamente.

2.3.2 Os Parâmetros de Análise

A fotometria influencia diretamente aspectos do ambiente visual como a performance da tarefa, a satisfação do usuário e a aparência do espaço (CIBSE, 1994, p.4). A iluminação natural em um ambiente interior pode ser expressa em termos absolutos (lux) ou como uma porcentagem da iluminação total no exterior ("daylight factor" ou fator de luz do dia). Pode-se dizer ainda que, dois fatores são importantes na observação da iluminação em um ambiente, a qualidade da iluminação e a quantidade de luz.

Fatores qualitativos são aqueles segundo os quais se busca evitar distúrbios na visão normal dos objetos, relacionados com a fonte da luz, a presença de ofuscamento, a qualidade espectral da luz, o contraste de cores e outros (Neto, 1980, pág.87).

Fatores quantitativos são determinados com base nas iluminâncias e sua distribuição espacial, relacionados com índices numéricos, devem permitir a realização da tarefa visual com o máximo de rapidez, exatidão, facilidade e comodidade (Neto, 1980, p.61).

2.3.2.1 Iluminâncias e fator de luz do dia

A iluminância é um parâmetro que determina a quantidade de luz em um ambiente. Quando um fluxo luminoso atinge uma superfície, resulta na iluminância, que é a medida do fluxo luminoso por unidade de área, ou seja, lúmens por metro quadrado. A unidade da iluminância é o lux. A iluminação pode ser especificada e medida como planar, escalar, cilíndrica e vetorial. A forma mais comumente usada é a iluminação planar que está associada a tarefas que são desenvolvidas sobre um plano de referência, que pode localizar-se em uma superfície horizontal, inclinado ou vertical.

O fator de luz do dia ou "daylight factor" é a razão entre a iluminação interior e a iluminação disponível no exterior, medida em um plano horizontal e expressa em percentual. É definido como a taxa de iluminação natural, em um dado ponto de um plano, em um ambiente interno, devido a luz recebida direta ou indiretamente de um céu de distribuição de luminâncias conhecida, em relação à iluminação em um ponto num plano horizontal externo, devido a uma hemisfera desobstruída do céu. A contribuição da luz solar direta é excluída tanto no ponto interno quanto no ponto externo, (Souza, 1997, p.34, Moore, 1985, p.202).

2.3.2.2 Distribuição dos níveis de iluminação

Somente a análise sobre as iluminâncias não caracteriza adequadamente a iluminação em um ambiente interno, é necessário observar também a distribuição dos níveis, que está associada as variações das iluminâncias em um mesmo ambiente.

Grandes diferenças entre os níveis de iluminação conformam uma má distribuição dos níveis, que pode ser um aspecto indesejável. Em geral uma distribuição mais uniforme no campo visual é melhor para a realização de uma tarefa (IESNA, p.98). Excessivas mudanças nos índices de iluminação sobre uma área de trabalho podem distrair e causar mudanças na adaptação visual no desenvolvimento da tarefa, o que poderá reduzir a performance visual, assim como, afetar o nível de conforto (CIBSE, 1994, p.8). Porém, algumas experiências relatam que a uniformidade nos níveis de iluminação não é um critério preciso ou rigoroso. Há relatos de ambientes de trabalho

com grandes variações na iluminação e tidos como aparentemente satisfatórios (Boyce, 1987, p.50).

Alguns pesquisadores têm também considerado os efeitos psicológicos de diferentes distribuições espaciais da luz, tendo desenvolvido alguns modelos que poderiam servir como um guia para o uso apropriado e consciente dos efeitos que a iluminação pode produzir nos usuários. O resultados de algumas pesquisas efetuadas dentro desse contexto mostram que: espaços iluminados de maneira uniforme são associados a impressões de ambientes mais espaçosos e claridade visual; e, espaços iluminados de maneira não uniforme são associados à impressões de relaxamento, privacidade, preferência e mais agradáveis (IESNA, p.99, Flynn apud Davis, 1987, p. 14).

Dentre os parâmetros relativos à observação sobre a distribuição das iluminâncias em um ambiente destacam-se a uniformidade e a diversidade, além desses, merece destaque também as curvas isolux.

I. Diversidade e uniformidade

A diversidade e a uniformidade são parâmetros recomendados pela CIBSE (1994, p. 29) para análise da distribuição dos níveis de iluminação. A uniformidade é obtida dividindo-se o menor nível de iluminação encontrado, pelo nível de iluminação médio. Valores próximos a 1 representam uma distribuição uniforme. A diversidade representa a variação entre o maior e o menor nível de iluminação encontrado em um plano de referência. O valor correspondente a diversidade é expresso como a razão do máximo nível de iluminação pelo mínimo.

II. Curvas isolux

Ao realizar-se uma análise sobre dados de iluminação pode-se ler e interpretar alguns dados diretamente sem que estes tenham um tratamento. Mas, a organização dos dados em um formato mais adequado pode facilitar a visualização e possíveis comparações. Neste caso, as curvas isolux são representações gráficas da distribuição dos níveis no ambiente analisado, de fácil entendimento e muito utilizadas, assemelham-se a um mapa de levantamento topográfico. As variações dos níveis de iluminação ocorrem sobre um plano de referência, as mudanças dos níveis de iluminação são mostradas através do uso de linhas de contorno, figura 2.40 (Lam, 1986, p.194). As curvas podem ser representadas de forma bidimensional ou tridimensional.

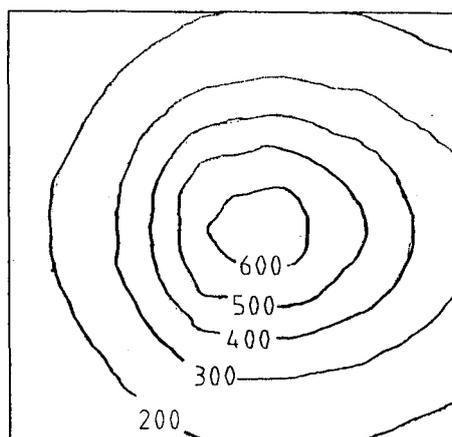


Figura 2.40 - Curvas isolux em forma de linhas de contorno, bidimensional

Os contornos das curvas podem ser em forma de linhas, figura 2.40, ou utilizando-se uma escala de cores, figura 2.41. Outra vantagem é a possibilidade de apresentação das curvas através de cortes longitudinais ou transversais, proporcionando a visualização do comportamento da distribuição dos níveis em diversos eixos.

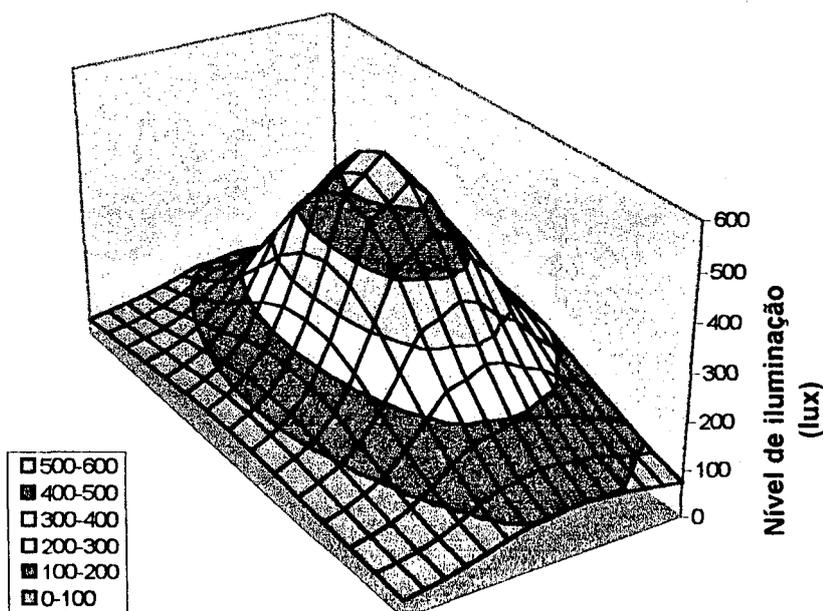


Figura 2.40 - Curvas isolux em formato de escala de cores, tridimensional

2.4 CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO

Uma das principais contribuições da revisão bibliográfica ao desenvolvimento do trabalho ocorreu na definição do modelo de estudo, assim como, na escolha do método de simulação do comportamento da iluminação natural.

Considerando-se as análises sobre sistemas zenitais, optou-se por aberturas zenitais parcialmente voltadas para o zênite, já que essa tipologia de abertura impede o acesso da luz solar direta quando o sol apresenta-se alto. Dessa forma, a abertura também exerceria influência no controle da luz solar direta. Dentre as tipologias existentes optou-se por aberturas lucernário e monitor.

A orientação da abertura também foi definida considerando-se as investigações realizadas neste capítulo. Neste caso, optou-se pela orientação norte para a abertura lucernário e orientação leste-oeste para a abertura monitor, tendo como objetivo principal a incidência de luz solar direta sobre a abertura na maior parte do dia.

Os elementos de controle foram definidos considerando-se o objetivo inicial de analisar elementos externos e internos. Optou-se por elementos fixos e opacos pela sua função específica de redirecionar e/ou obstruir a luz solar direta.

A escolha do método de análise considerou os seguintes aspectos como principais condicionantes: a confiabilidade dos resultados, o tempo de execução, o custo e a possibilidade de avaliação de diferentes variáveis em um mesmo modelo.

Os métodos através de cálculos numéricos simplificados não foram utilizados neste trabalho, principalmente por não possibilitarem a avaliação em conjunto de diversos pontos em um mesmo processo de cálculo. A utilização desse método demandaria extenso trabalho e tempo, a fim de registrar os níveis dos diversos pontos e das variáveis que se pretendia analisar.

O método através de medições com modelo reduzido, devido a não disponibilidade de céu artificial, limitar-se-iam a análises sob céu natural. As simulações sob céu natural apresentam dificuldade na observação de variações em um mesmo modelo sob idênticas condições de disponibilidade de luz natural. Não obstante, os modelos em escala reduzida foram utilizados em uma fase piloto no início das experimentações, simulados em condições de céu real.

As simulações computacionais apresentaram-se como o método mais adequado ao estudo pretendido, pela rapidez na execução dos resultados e a possibilidade de avaliação dos diversos modelos sob condições idênticas de disponibilidade de luz natural.

3 METODOLOGIA

Este capítulo divide-se em três etapas, a primeira etapa refere-se ao detalhamento das características do modelo de análise desenvolvido para este trabalho. O modelo é um ambiente interno com abertura zenital em conjunto com o elemento de controle da luz solar direta, sendo que, a abertura zenital apresenta-se em duas tipologias: monitor e lucernário, e o elementos de controle divide-se em interno e externo.

A segunda etapa relata a metodologia adotada na realização do estudo piloto utilizando-se modelo em escala reduzida. Trata-se de uma etapa simplificada objetivando maior interação com o modelo de estudo, através da construção de um pré-modelo em escala reduzida; interação com os parâmetros de análise escolhidos, que são as iluminâncias internas e sua distribuição; e também, uma interação com o programa computacional escolhido através de algumas simulações experimentais com o mesmo pré-modelo construído em escala reduzida.

A segunda etapa trata das simulações computacionais sobre o modelo de análise desenvolvido neste trabalho. As simulações computacionais foram realizadas utilizando-se o programa Lightscape® V3.0 e realizadas no LabCon - Laboratório de Conforto Ambiental do Departamento de Arquitetura da Universidade Federal de Santa Catarina. Os resultados obtidos com as simulações computacionais fornecem subsídios para o desenvolvimento das análises.

3.1 O MODELO DE ESTUDO

O modelo de estudo é a representação gráfica das hipóteses que pretende-se verificar e está associado ao objetivo principal do estudo. Toda análise sobre iluminação natural requer um modelo sobre o qual serão feitas simulações, medições ou cálculos do comportamento da luz.

O detalhamento do modelo de estudo deve ser compatível com o método escolhido no qual o mesmo será inserido. Tratando-se especificamente deste trabalho, a

concepção do modelo de estudo foi desenvolvida em conjunto com simulações computacionais experimentais, utilizando-se o programa previamente definido com o objetivo de certificar-se das especificações e procedimentos corretos na realização das simulações, assim como, melhorar a interface com o programa escolhido.

3.1.1 Características Físicas do Modelo de Estudo

O modelo de estudo foi gerado a partir de uma planta quadrada, já que não se pretendia analisar a influência da geometria da sala, com comprimento e largura de 6,00 metros e pé-direito com altura de 3,00 metros, figuras 3.1 e 3.2. As aberturas zenitais também possuem seções de abertura de forma quadrada e estão localizadas exatamente no centro do plano de cobertura.

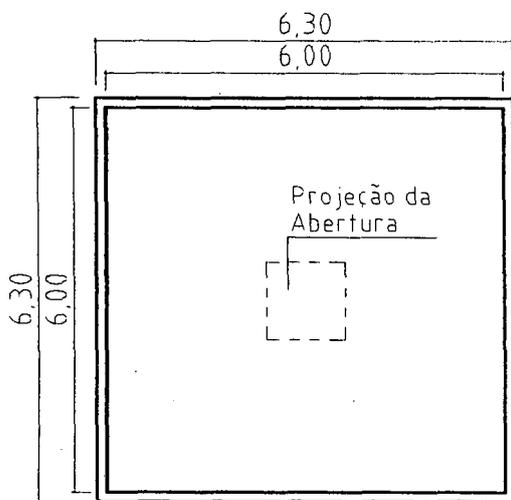


Figura 3.1 - Planta baixa do modelo

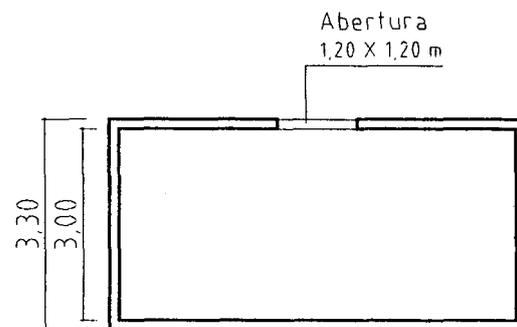


Figura 3.2 - Corte longitudinal do modelo

Na refletância das superfícies internas do modelo foram utilizados valores recomendados pela Illuminating Engineering Society of North America (IESNA, p.518): para salas tipo escritórios adotar índices de reflexão de: forro com 80% ou mais; paredes com 50 a 70%; piso 20 a 40%. Com base nessa referência optou-se por índice de 80% para o forro, 50% para as paredes e 30% para o piso. A superfície externa do plano de cobertura foi considerada com índice de reflexão de 30%, todas as outras superfícies externas possuem índices de reflexão igual a zero.

Os desenhos referentes a construção do modelo foram elaborados em 3D usando o programa AutoCAD (Autodesk Inc.) 13 para Windows. Após concluído, o modelo foi exportado em formato DXF e importado para o Lightscape®.

No programa Lightscape®, as especificações pertinentes ao modelo de estudo podem ser agrupadas em duas fases. Inicialmente, são determinadas as características físicas do modelo tais como: coeficiente de reflexão das superfícies, material, orientação da superfície e indicação da janela (superfície assumida como abertura ou entrada de luz). Posteriormente, são especificadas as características referentes a localização geográfica (latitude e longitude), orientação, condição do céu, horário, dia e mês do ano.

3.1.2 Tipologia das Aberturas Zenitais

As aberturas zenitais definidas para os estudos deste trabalho seguem as tipologias: lucernário e monitor, figuras 3.3 e 3.4. Aberturas com esta tipologia são comumente utilizadas para a iluminação zenital de edifícios industriais, porém, a principal condicionante delimitadora da escolha foi a característica que as tipologias adotadas apresentam de excluir grande parte do sol nos horários de maior altura, por estarem voltadas parcialmente para o zênite.

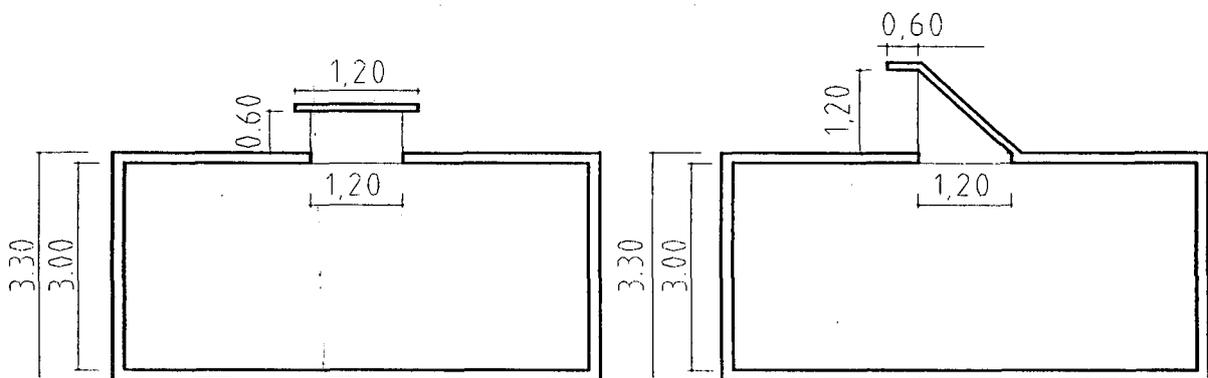


Figura 3.3 - Abertura Monitor

Figura 3.4 - Abertura Lucernário

A geometria escolhida permitiu que as dimensões das aberturas fossem iguais ou equivalentes. A área da abertura equivale a 4% da área da superfície do piso.

As aberturas estão localizadas exatamente no centro do plano de cobertura. Suas dimensões são 1,20 x 1,20 metros (m), que no caso da abertura lucernário permanece a mesma dimensão na face externa da abertura, mas para a abertura monitor, a face externa da abertura é dividida em duas áreas com 1,20 m de largura por 0,60 m de altura.

As aberturas não possuem vidro e as superfícies internas das paredes, que fazem parte da abertura, foram consideradas com o mesmo índice de reflexão utilizado para o forro, de 80%.

3.1.3 Os Elementos de Controle da Luz Solar Direta

Os elementos de controle em análise neste trabalho são do tipo fixos e opacos, encontram-se internos e externos à abertura. Têm como principal função, impedir o acesso da luz solar direta no ambiente interno, que no caso de aberturas zenitais pode ser extremamente inconveniente.

Para cada tipologia de abertura foi desenvolvido um elemento de controle específico. Os elementos desenvolvidos para a abertura lucernário podem ser observados nas figuras 3.5 e 3.6 e os elementos da abertura monitor nas figuras 3.7 e 3.8.

A geometria dos elementos de controle foi definida utilizando-se como base de apoio um diagrama solar construído em representação azimutal eqüidistante (Fonseca, 1982, anexo) para uma latitude de 28°. Sobre esse diagrama definiu-se que os elementos de controle, assim definidos, apresentariam-se de forma a evitar o acesso ao ambiente interno, todos os raios diretos do sol com altitude solar maior que 30°. Em conjunto com os elementos de controle e com a mesma função foram inseridos pequenos beirais sobre as aberturas.

A superfície dos elementos de controle possui um coeficiente de reflexão de 90%, material opaco e perfeitamente difusor.

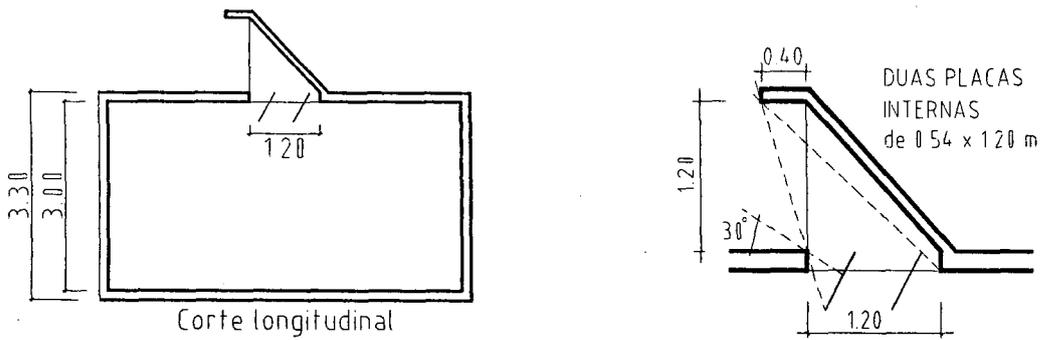


Figura 3.5 - Corte e detalhe da abertura lucernário com controle interno

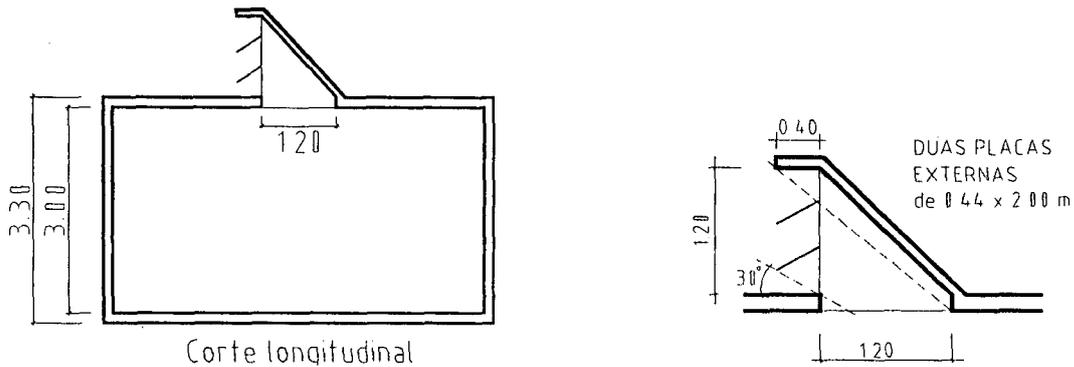


Figura 3.6 - Corte e detalhe da abertura lucernário com controle externo

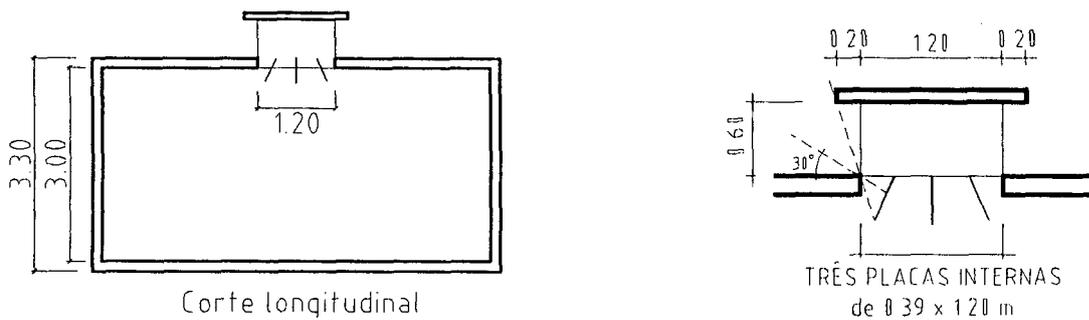


Figura 3.7 - Corte e detalhe da abertura monitor com controle interno

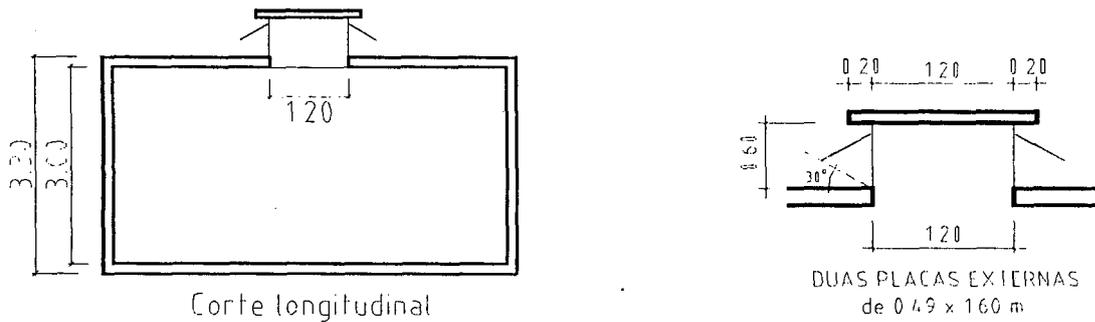


Figura 3.8 - Corte e detalhe da abertura monitor com controle externo

3.1.4 Situação Geográfica e Orientação

A situação geográfica considerada foi a cidade de Florianópolis: latitude de $27^{\circ}30'$ (sul) e longitude $48^{\circ}00'$ (oeste). Para efeito desse estudo foi eliminada a componente refletida externa, exceto a da cobertura, para a qual foi considerado um índice de reflexão de 30%.

A orientação do modelo foi definida com o objetivo de garantir que houvesse incidência da luz direta do sol sobre os sistemas de controle, desta forma, as aberturas tipo lucernário foram voltadas para a orientação norte e as aberturas monitor voltadas para orientação leste-oeste. Observar na figura 3.9, desenho esquemático com a posição solar (altitude e azimute solar) nos dias 21 de junho (solstício de inverno) e 21 de dezembro (solstício de verão), para as orientações norte e leste.

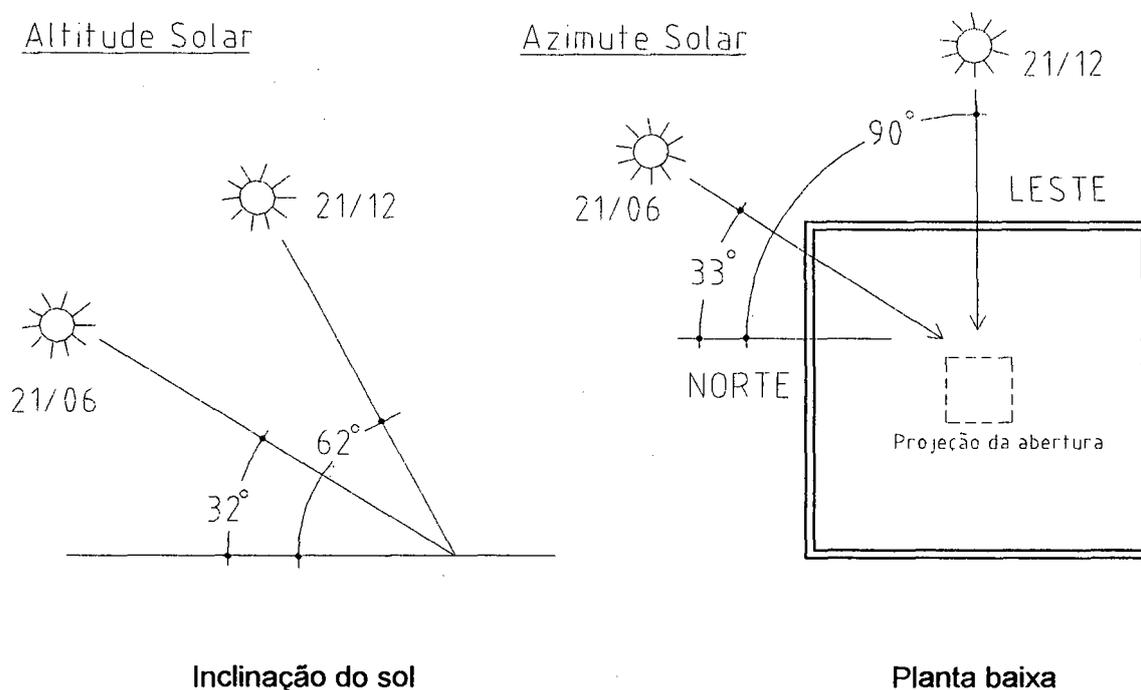


Figura 3.9 - Trajetória solar, orientação norte e leste, solstício de inverno e verão, 10:00h

3.1.5 Época do Ano e Condição do Céu

As variáveis referentes à época do ano e a condição do céu são solstício de verão, 21 de dezembro, com céu claro e encoberto, e solstício de inverno, 21 de junho, com céu claro e encoberto. Pretendia-se dessa forma analisar situações de pico de verão e

inverno. A escolha pelo céu claro ocorreu pelo interesse em analisar o comportamento dos sistemas de controle solar frente a incidência de radiação solar direta e a escolha do céu encoberto pretendia verificar se os elementos de controle reduziram significativamente os níveis de iluminação internos.

3.2 ESTUDO PILOTO COM MEDIÇÕES EM ESCALA REDUZIDA

O estudo piloto compreende a construção de um modelo em escala reduzida e a realização de algumas medições sob céu condição de real. Após as medições, as mesmas condições do modelo em escala foram reproduzidas e simuladas no programa computacional Lightscape®, o que possibilitou algumas comparações.

O modelo é o mesmo desenvolvido para as análises, porém nesta etapa, os elementos de controle foram excluídos e somente foram construídas as aberturas, lucernário e monitor.

Os modelos foram construídos em escala 1/20, confeccionados com papel acartonado revestido com fina película de papel branco em ambos os lados, com uma espessura de 1,5 mm. A maquete após construída não apresentava vazamentos de luz nas junções e dobras e o papel utilizado era totalmente opaco.

Para os registros dos níveis de iluminação utilizou-se uma instrumentação composta por quatro fotocélulas e dois aparelhos de aquisição de dados, de forma a se obter leituras médias de valores a cada intervalo de tempo considerado.

As fotocélulas são tipo SA (LI-COR) com correção do efeito cosseno e correção da sensibilidade espectral da cor. Estes sensores vêm calibrados de fábrica e devem ser recalibrados a cada dois anos. Três fotocélulas foram utilizadas para os registros internos e uma fotocélula foi utilizada para o registro externo. A média dos níveis internos e níveis externos foram registradas e armazenadas simultaneamente a cada minuto no aparelho de aquisição de dados. O intervalo entre cada leitura é de cinco segundos.

Os aparelhos de aquisição de dados são do tipo *DataLogger* Li-1000, figura 3.10. O aparelho possui 10 canais de entrada de sensores e atua também como um medidor multicanal. Possui dois canais de entrada de corrente localizados em conectores BNC.

Os dados podem ser armazenados manualmente para medições instantâneas ou armazenados automaticamente (modo LOG). 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 programa, fornecido junto com o aparelho, que pode armazenar e/ou mostrar leituras instantâneas, médias, mínimas ou máximas. Os dados permitem interface com outros programas de tratamento estatístico.

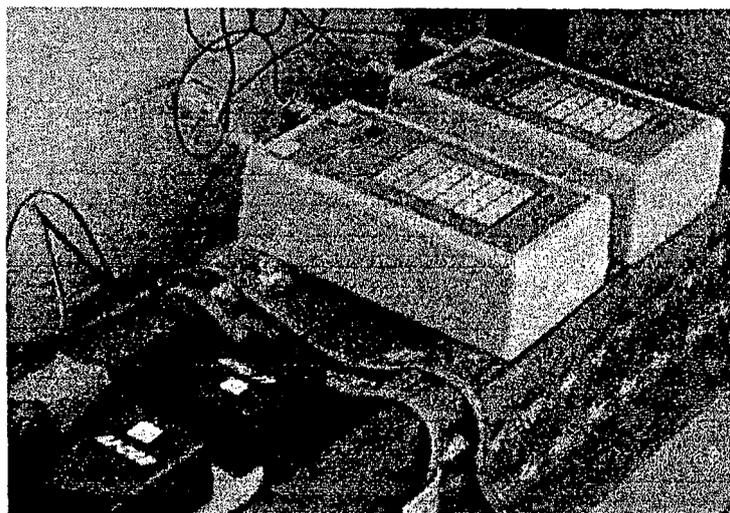


Figura 3.10 - Foto dos aparelhos de aquisição de dados

As medições do modelo em escala reduzida foram realizadas nos dias 6 e 8 de março de 1999. No dia 6, foi utilizado o modelo com abertura monitor, e no dia 8, o modelo com abertura lucernário. Os horários das medições iniciaram às 9:00 horas da manhã e finalizaram às 16:00 h da tarde. As aberturas, lucernário e monitor foram orientadas para o norte.

O local utilizado para a realização das simulações foi a cobertura do edifício residencial Savannah, figura 3.11, localizado à Rua Bento Aguido Vieira, nº335, bairro Trindade, próximo ao campus da UFSC, Florianópolis.

O entorno edificado próximo encobria aproximadamente 30% da abóbada celeste. O coeficiente de reflexão das superfícies do entorno foi estimado em aproximadamente 70%, após medição expedita, realizada com auxílio de um luxímetro.

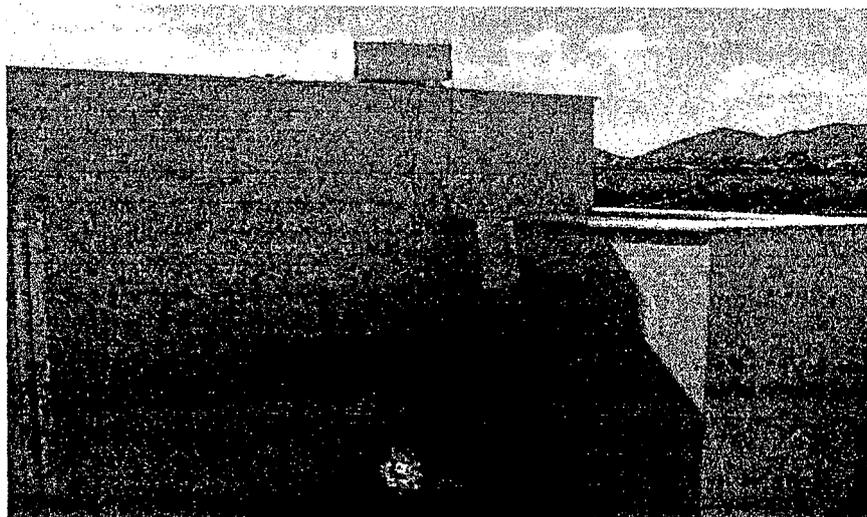


Figura 3.11 - Foto do local das medições com a maquete e os aparelhos de aquisição

No dia 06 de março, as medições foram realizadas em condições predominantemente de céu claro com a existência de nuvens esparsas. No dia 08 de março ocorreram variações na condição do céu, alternando situações de céu claro, céu encoberto e parcialmente encoberto.

As simulações computacionais reproduzindo as medições com o modelo em escala reduzida foram construídas e desenvolvidas com as mesmas condições verificadas na maquete.

As dimensões e a geometria do modelo computacional foram facilmente reproduzidas de forma igual aquelas do modelo em escala, utilizando-se o programa AutoCAD 13 para Windows. Com algumas limitações como: no modelo computacional, não foi considerado o entorno construído, assim como também foi desconsiderada a componente refletida externa, exceto para o plano de cobertura da maquete, para o qual foi considerado um coeficiente de reflexão de 70%. Outra limitação verificada refere-se ao papel utilizado na maquete, pôde-se perceber visualmente que o papel apresentava uma aparência levemente especular, porém nas simulações computacionais, o papel foi especificado de forma simplificada como um material perfeitamente difusor e com um índice de reflexão de 70%. Esperava-se, portanto, ocorrência de diferenças entre os resultados dos dois métodos simulados em decorrência desse fato.

Os horários, o dia e mês do ano são os mesmo das observações no modelo em escala. Todas as simulações computacionais foram feitas inicialmente sobre condições

de céu claro, e posteriormente os horários onde os níveis verificados externamente indicavam céu encoberto foram simuladas novamente com a condição de céu encoberto.

3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COM O MODELO DE ESTUDO

A etapa referente as simulações computacionais com o modelo de estudo é uma das principais partes deste trabalho. Após a escolha do método, através de simulação computacional, definiu-se também qual programa seria utilizado. Dentre os programas computacionais que processam cálculos de iluminação natural, os programas Lumen Micro® V7.0 e Lightscape® V3.0 encontravam-se disponíveis no LabCon.

O programa Lumen Micro® V7.0 apresenta vantagens como opção de análise sob condição de céu claro, parcialmente encoberto e encoberto, interface com CAD e saída de dados por relatórios tabulados, gráficos de curvas isolux e apresentação tridimensional da distribuição da luz no ambiente estudado. Por outro lado, apresenta desvantagens como não permitir análises com superfícies inclinadas e não considerar a refletividade da superfície de cobertura, o que limitaria a análise pretendida sobre os elementos de controle. Por conseguinte, o programa Lightscape® V3.0 mostrou-se mais adequado ao desenvolvimento do trabalho.

Em termos de configuração mínima o programa Lightscape® requer computadores com no mínimo um coprocessador Pentium, com 32Mb de memória RAM e um monitor SVGA. A versão 3.0 foi concebida para ser utilizada em ambiente Windows 95 ou Windows NT. O programa simula o comportamento da luz natural tanto em espaços internos como externos, isolados ou simultaneamente. Os ambientes podem ter geometria complexa com superfícies horizontais, verticais e inclinadas. A interface com programas CAD é através da possibilidade de importar geometrias em formato DXF ou 3DS. Os dados de entrada são feitos por meio do mouse ou teclado, figura 3.12.

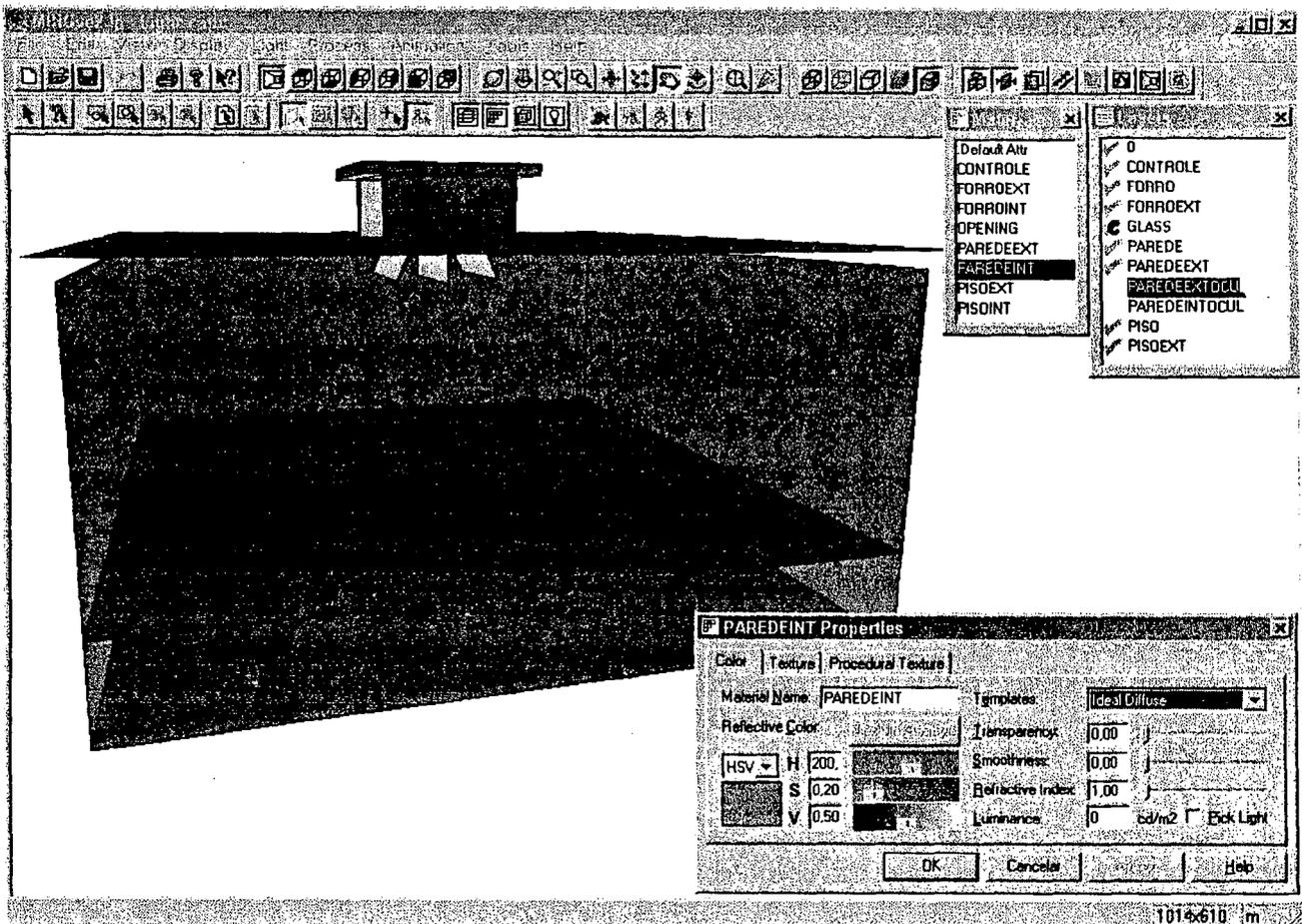


Figura 3.12 - Visualização da tela do programa Lightscape em fase de especificação das características físicas do modelo de estudo

O programa Lightscape® é predominantemente um algoritmo de radiosidade, que inicialmente computa a solução, baseado inteiramente na transferência difusa das radiações (Houser, 1999, p.117). O método radiosidade apresenta um melhor desempenho no cálculo das interreflexões difusa, adequado ao trabalho a ser desenvolvido, pois não foram especificadas superfícies com materiais especulares.

Um dos aspectos positivos do programa Lightscape é que os resultados das simulações podem ser visualizados através de uma listagem dos níveis de iluminação dispostos sobre uma malha de pontos, que pode localizar-se sobre quaisquer planos do modelo em análise, internos ou externos, horizontais, verticais ou inclinados, além de permitir a criação de um plano imaginário (definido como plano de trabalho), que no processamento dos cálculos não é considerado como uma superfície, mas que pode apresentar listagem das iluminâncias sobre aquele plano, figura 3.13.

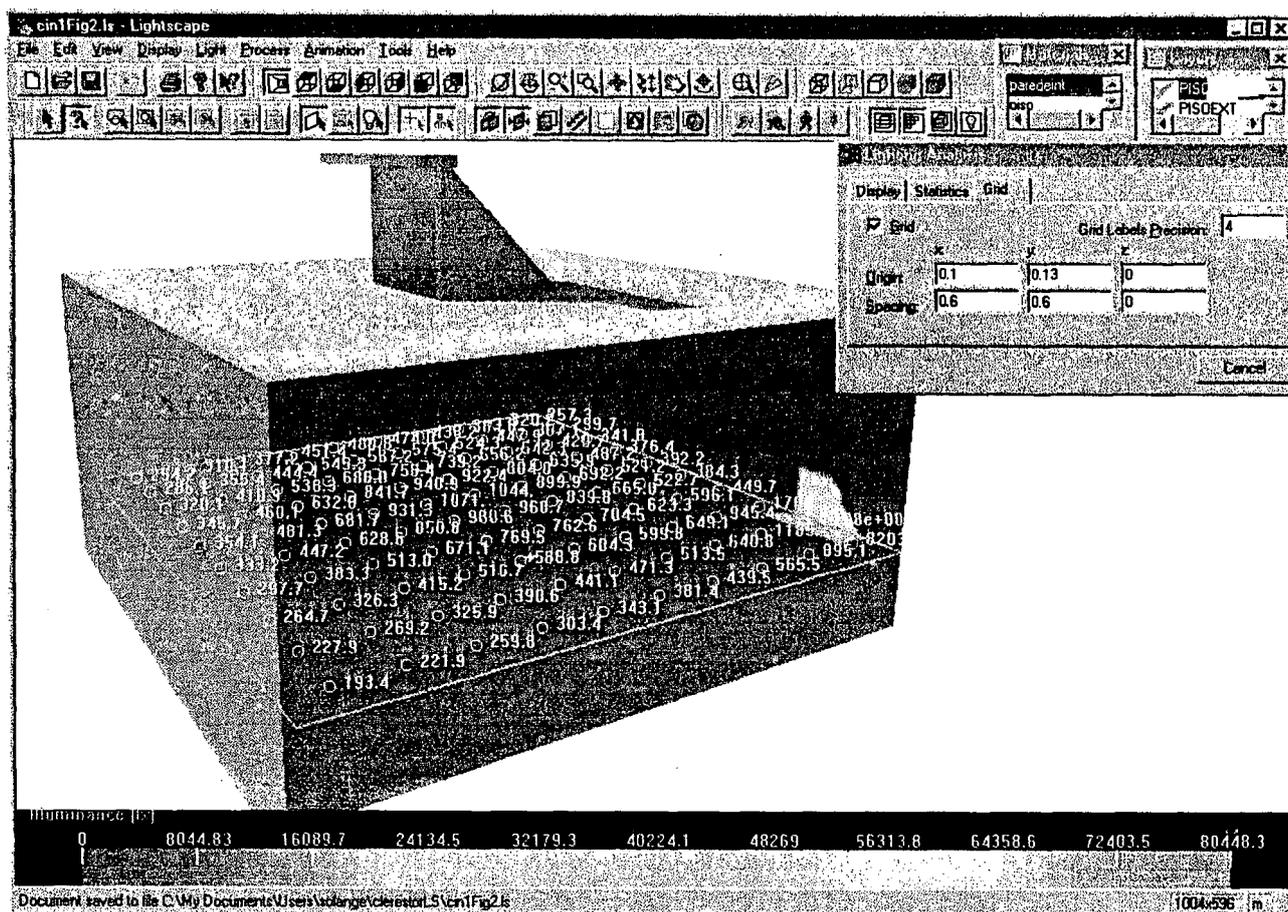


Figura 3.13 - Tela do programa Lightscape ® V3.0 com relação das iluminâncias sobre plano de referência no modelo de estudo

O programa disponibiliza também perspectivas do ambiente simulado, que podem ser visualizadas através de escala de cores ou em tons de cinza, representando os níveis de iluminação encontrados (Manual Lightscape® V3.0).

Finalizada a fase de construção e inserção do modelo de estudo no programa Lightscape, com todas as especificações pertinentes, pode ser iniciado o processo de simulação computacional do comportamento da luz natural. O “software” Lightscape fornece a opção de programação “.bat”, que agiliza o processo de simulação, pois permite que o sistema permaneça operando sem necessitar da presença de um operador. Utilizando-se dessa ferramenta foram realizadas as simulações.

A inserção das variáveis resultou em 24 modelos de estudo, 12 para cada tipologia de abertura, tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Relação das variáveis simuladas

Abertura	Sistema de controle	Época do ano	Condição de céu
Lucernário	Sistema de controle interno Sistema de controle externo Sistema sem controle (base)	Solstício de inverno e Solstício de verão	Céu claro e Céu encoberto
Monitor	Sistema de controle interno Sistema de controle externo Sistema sem controle (base)	Solstício de inverno e Solstício de verão	Céu claro e Céu encoberto

3.3.1 Acesso aos Dados Referentes ao Cálculo da Iluminação Final

Os resultados das simulações, que podem ser apresentados em forma de valores correspondente as iluminâncias, permitem ser visualizados em quaisquer planos do modelo de estudo (horizontal, vertical ou inclinado), assim como, pode-se também optar pela inclusão no modelo de planos imaginários (que não interferem no cálculo da iluminação natural). Para o modelo desenvolvido neste trabalho optou-se pela utilização de um plano imaginário ou plano de referência. Trata-se de um plano horizontal situado a 0,75 m acima do nível do piso, que caracteriza a altura de um posto de trabalho com o usuário sentado. Esse plano de referência foi dividido em uma malha ortogonal de 15 x 15 quadrados, num total de 225 pontos distribuídos proporcionalmente. Para cada ponto é apresentado o nível de iluminação, em lux.

Os resultados das simulações realizadas pelo "software" Lightscape são apresentados de forma direta sobre o modelo de estudo. Para o processamento dos resultados em forma gráfica, os valores devem ser transferidos para uma planilha eletrônica.

Com os valores das iluminâncias foram calculados os níveis médios e determinados os níveis máximos e mínimos para cada condição. Também foram calculados os parâmetros de diversidade e uniformidade e construídos os gráficos de curvas isolux.

3.3.2 Os Parâmetros de Desempenho

A avaliação do desempenho de cada sistema considera dois parâmetros principais: as iluminâncias (valores médios, máximos e mínimos) e a distribuição desses níveis (uniformidade, diversidade e curvas isolux).

O critério de análise sobre as iluminâncias assume a hipótese de que os maiores níveis estão associados a um melhor desempenho do sistema.

A análise sobre a distribuição dos níveis está associada a uniformidade dessa distribuição. Segundo recomendações da CIBSE (1994, p. 29), a diversidade não deve ultrapassar a relação 5:1 e a uniformidade não deve ser inferior a 0,8. Contudo, nem sempre esses indicadores representam adequadamente o melhor desempenho. Ainda que, parâmetros como a diversidade e a uniformidade possam auxiliar na análise sobre a distribuição, as curvas isolux possibilitam uma avaliação mais completa da distribuição.

Para as análises através das curvas isolux adotou-se o método gráfico utilizado por Cábus (1997, p.47), em sua dissertação. O método consiste no mapeamento das iluminâncias encontradas no plano de referência de cada situação simulada. Esse mapeamento é definido por curvas isolux, que delimitam três intervalos que, por sua vez, estão associados ao nível médio encontrado em cada situação.

Segundo recomendação da ABNT (1991), a iluminância em qualquer ponto do campo de trabalho não deve ser inferior a 70% da iluminância média. Seguindo essa recomendação adotou-se que o limite inferior do intervalo principal corresponderia a 70% da iluminância média e, por analogia, o limite superior equivalente a 130% da iluminância média, tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Classificação dos intervalos isolux

Intervalo	Identificação no gráfico	Limites dos intervalos
Insuficiente	região cinza	$E < 70\% E_{m\acute{e}dia}$
Suficiente	região branca	$70\% E_{m\acute{e}dia}$ até $130\% E_{m\acute{e}dia}$
Excessivo	região vermelha	$E > 130\% E_{m\acute{e}dia}$

* Iluminância (E)

O primeiro intervalo, denominado por intervalo insuficiente, compreende todos os pontos com iluminâncias inferiores a 70% da iluminância média. O intervalo denominado suficiente compreende os pontos com iluminâncias maiores que 70% e menores que 130% da iluminância média. O intervalo denominado excessivo compreende os pontos com iluminâncias maiores que 130% da iluminância média.

Seguindo essa classificação estabeleceu-se como parâmetro de desempenho a associação com o intervalo suficiente, quanto maior for a área do intervalo suficiente, melhor será a performance do sistema.

Todos os gráficos são gerados utilizando-se a planilha eletrônica Excel e, posteriormente, finalizados com auxílio do Autocad.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

A parte principal deste capítulo refere-se a análise dos resultados obtidos com a simulação computacional do modelo objeto de estudo dessa pesquisa: as aberturas zenitais, monitor e lucernário, com os elementos de controle da luz solar direta, internos e externos.

A avaliação do desempenho de cada sistema considera dois parâmetros principais: as iluminâncias (valores médios, máximos e mínimos) e a distribuição desses níveis (uniformidade, diversidade e curvas isolux).

O capítulo compreende também algumas análises sobre o estudo piloto utilizando-se modelo em escala reduzida.

4.1 ANÁLISES SOBRE O ESTUDO PILOTO COM MODELO EM ESCALA REDUZIDA

As medições com o modelo em escala reduzida foram realizadas nos dias 06/março com a abertura monitor, e no dia 08/março com a abertura lucernário. Sobre as medições foram observadas e comparadas as iluminâncias e sua distribuição, apresentadas para cada abertura e também foram realizadas algumas comparações com os resultados obtidos com a simulação computacional do modelo em escala reduzida.

A análise sobre as medições em escala reduzida iniciou com os níveis de iluminação medidos no ambiente externo. Em seguida foram analisados os níveis internos. Sobre os níveis internos, três aspectos foram observados: os níveis de iluminação médios, a distribuição dos níveis (uniformidade e diversidade) e o posicionamento dos pontos de máximo e mínimo nível de iluminação.

4.1.1 O Nível de Iluminação Externo

Os níveis externos medidos no dia 06 de março, condição de céu claro, apresentaram-se bastante elevados, dentro do que esperava-se para um dia de verão com céu claro. Durante as medições o céu manteve-se claro durante todo o dia, com a

presença de pequenas nuvens esparsas. No gráfico da figura 4.1, além dos níveis encontrado nas medições com o modelo em escala, encontram-se também os níveis apresentados com a simulação computacional. Os valores apresentam-se próximos, às 10:00 e 10:30 a diferença foi de 16% e 14%, nos outros horários de apenas 5 % a 2 %.

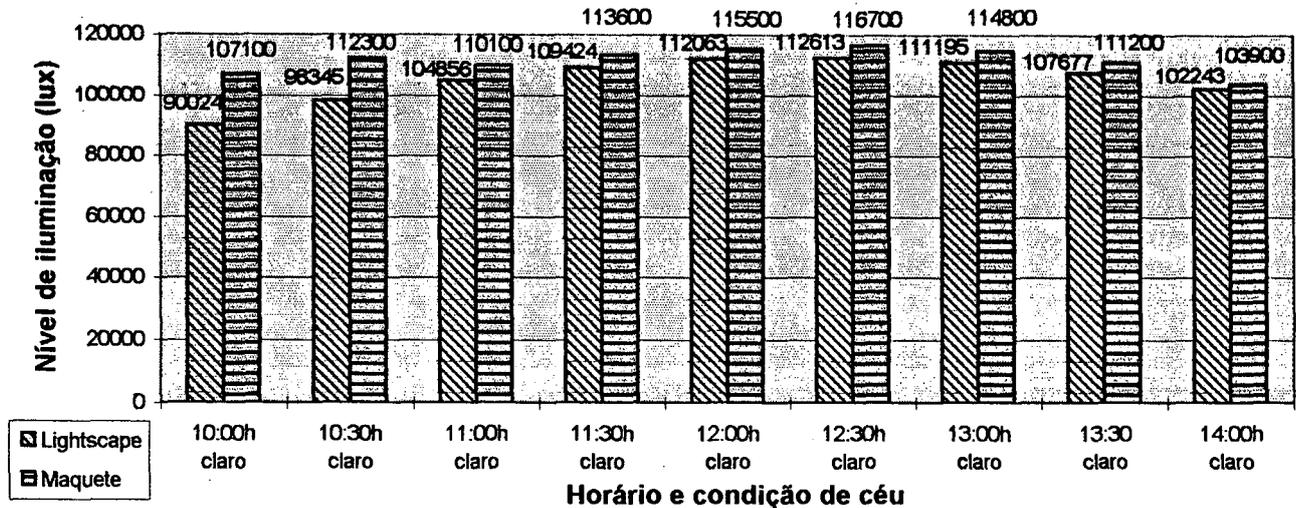


Figura 4.1 - Gráfico com os níveis de iluminação externos em 06/março

Ao contrário do dia 06 a condição do céu no dia 08 de março apresentou-se bastante variável, alternando situações de céu claro, céu encoberto e parcialmente encoberto, o que resultou em grandes variações nos níveis. Na condição de céu claro os valores apresentaram-se altos e próximos daqueles medidos no dia 06. Com o céu encoberto e parcialmente encoberto os valores reduziram significativamente, figura 4.2. Os valores apresentados na simulação computacional com céu claro e céu encoberto apresentam-se próximos, com diferenças de no máximo 20%. Porém, na condição de céu parcialmente encoberto as diferenças são mais significativas, com diferenças em torno de 40%.

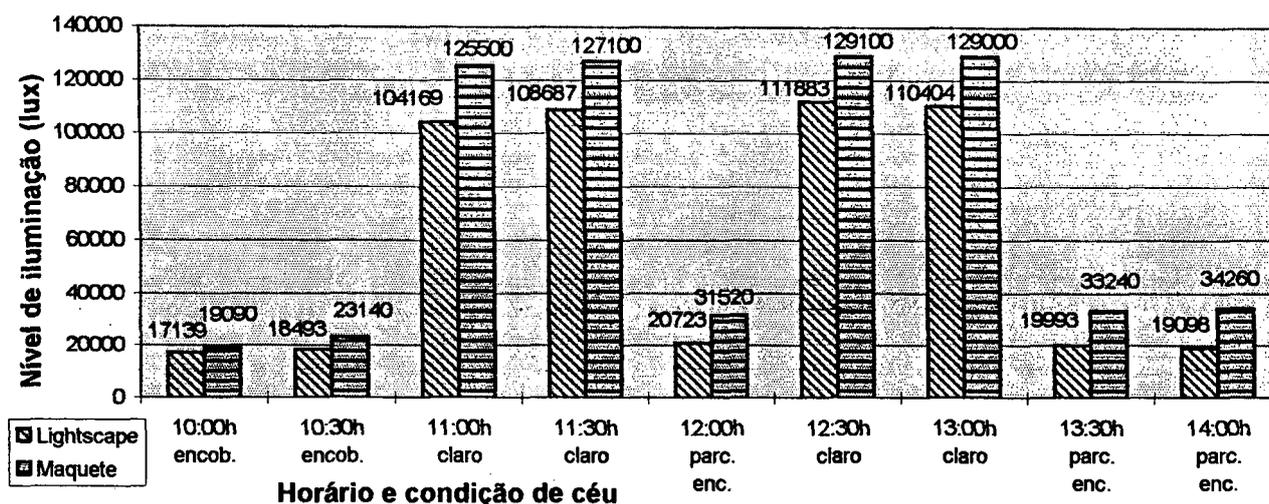


Figura 4.2 - Gráfico com os níveis de iluminação externos em 08/março

Pode-se afirmar que os níveis externos encontrados nos dois métodos são similares, desde que a condição de céu encontrada no modelo em escala (ou seja a condição real) possa ser perfeitamente reproduzida pelo programa Lightscape. Visto que, na condição de céu claro e encoberto os resultados apresentaram-se próximos.

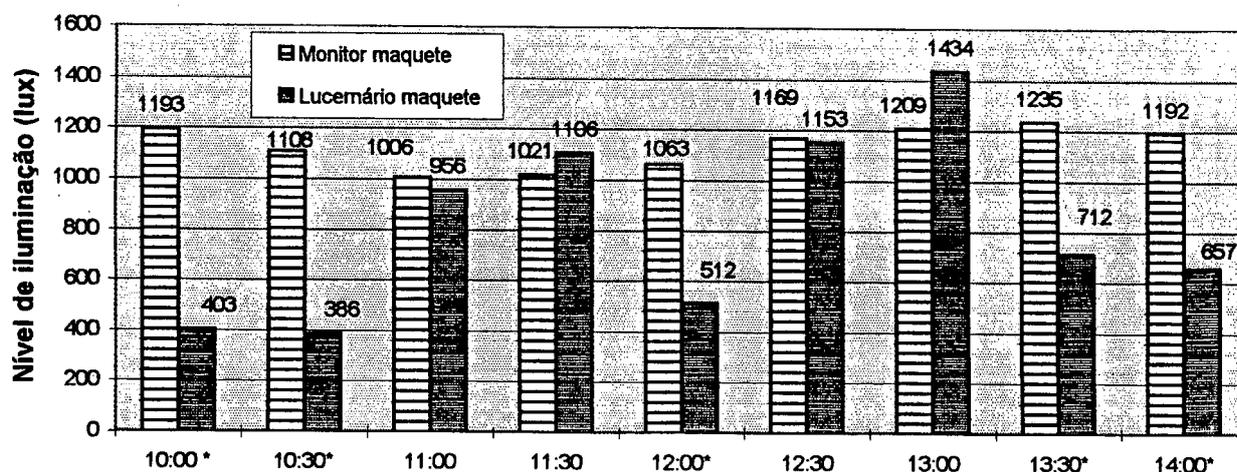
O que também apresenta-se como uma das limitações do programa, que reproduz com bom desempenho apenas as condições de céu claro e céu encoberto, quando estes estão claramente definidos. Houser (1998, p.117), em seu artigo, destaca esta limitação como sendo comum aos programas disponíveis atualmente, a dificuldade de reprodução das características fotométricas da fonte de luz.

4.1.2 Iluminância Média no Ambiente Interno

Com os três níveis de iluminação coletados internamente foram estabelecidas médias que possibilitaram as análises a seguir.

O gráfico da figura 4.3 refere-se a comparação entre as medições do dia 06 e 08 de março com os modelos em escala. Ressalta-se que a comparação entre valores medidos em dias diferentes (disponibilidade de luz natural desigual) conduz a erros significativos, confirmando esta observação, as maiores diferenças entre um sistema e outro foram verificadas nos horários com céu encoberto e parcialmente encoberto no dia 08 (marcados com asterisco no gráfico 4.3), referente ao sistema lucernário. As

diferenças apresentaram-se em torno de 50%. Contudo, na ocorrência de céu claro, nos dois dias, os valores apresentados encontram-se próximos, com variações de 2 a 16%.



* Horários com asterisco referem-se às situações de céu encoberto ou parcialmente encoberto em 08/março, abertura lucernário

Figura 4.3 - Gráfico com a iuminância média nas medições em escala

Ainda que, os níveis externos tenham, em algumas condições de céu, apresentado-se próximos, as iluminâncias internas não apresentaram o mesmo comportamento. As diferenças entre os níveis médios obtidos com o modelo em escala e as simulações computacionais, no dia 06 de março, apresentaram diferenças significativas, figura 4.4, que variam de 58.9 a 69%.

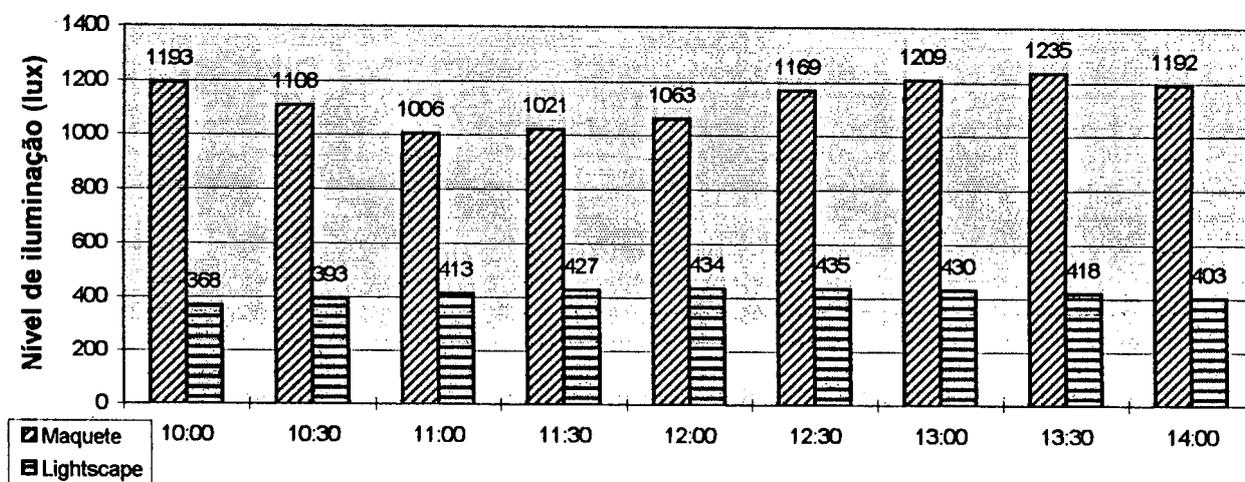


Figura 4.4 - Gráfico comparativo entre a iuminância média, 06/março.

No dia 08 de março, as diferenças apresentaram-se ainda mais acentuadas, variaram de 62,8 a 85,2%, as maiores diferenças estão associadas aos horários em que a condição do céu era parcialmente encoberto.

Essas diferenças significativas, observadas nas médias dos níveis de iluminação nos dois métodos, aparentemente devem-se aos seguintes fatores:

- 1) O modelo de céu simulado pelo programa computacional é um céu padrão, porém, nem sempre o céu natural encontra-se nas mesmas condições, o que, certamente pode produzir grandes diferenças na comparação entre um método e outro. Finalmente, as maiores diferenças foram verificadas nas situações com céu parcialmente encoberto, de difícil reprodução em uma simulação computacional.
- 2) No modelo computacional foi excluída a componente refletida externa. O entorno do modelo em escala reduzida pode ter contribuído para os altos índices internos, já que as paredes do entorno estavam voltadas diretamente para o sol, tornando-se provavelmente uma importante contribuinte de iluminação indireta.
- 3) O papel utilizado no modelo em escala reduzida não era perfeitamente difusor, apresentando característica levemente especular, fato que, pode ter provocado maiores níveis internos em alguns pontos do ambiente. Ao contrário do método utilizado pelo Lightscape, que considera os materiais perfeitamente difusores (a luz que incide sobre uma superfície é uniformemente distribuída em todas as direções).

4.1.3 Comparação entre a Distribuição dos Níveis de Iluminação Internos

Na análise da distribuição dos níveis de iluminação foram observados três itens: a diversidade, a uniformidade e o posicionamento dos pontos de máximo e mínimo nível de iluminação encontrados.

Nos gráficos das figuras 4.5 e 4.6 pode-se observar a diversidade e a uniformidade, obtidas com os dois métodos no dia 06/março, com a abertura monitor. Sobre esses gráficos pode-se observar que os valores do sistema monitor apresentam grande uniformidade na distribuição dos níveis internos. Assim como os valores obtidos com as medições em escala e as simulações computacionais apresentam-se muito próximos.

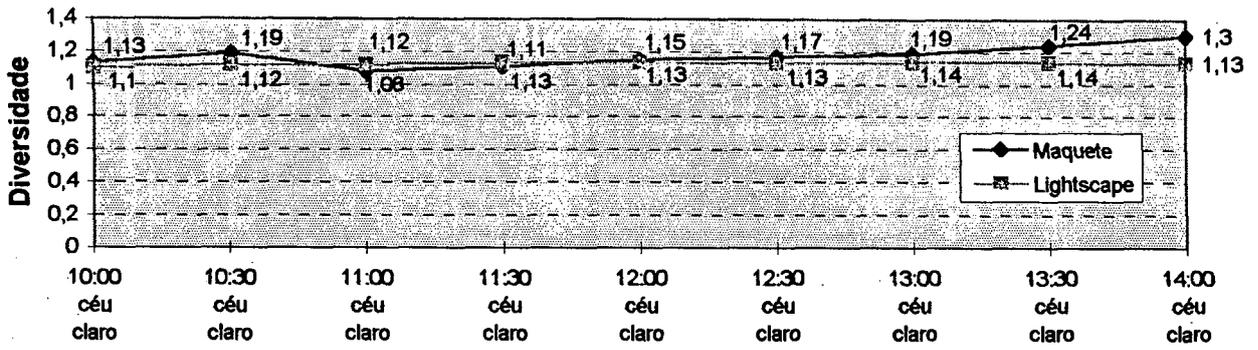


Figura 4.5 - Gráfico comparativo da diversidade 06/março, abertura monitor

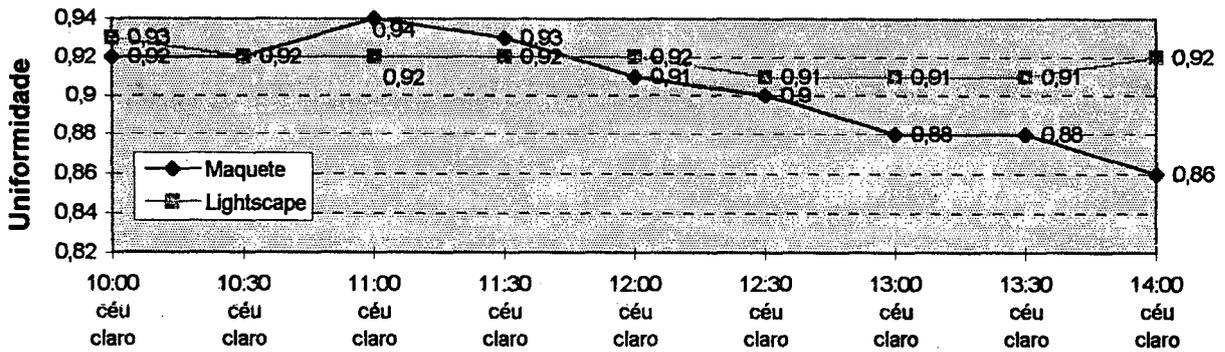


Figura 4.6 - Gráfico comparativo da uniformidade 06/março, abertura monitor

Os gráficos das figuras 4.7 e 4.8 referem-se diversidade e uniformidade, no dia 08/março, com o sistema lucernário. A distribuição dos níveis com o sistema lucernário apresenta-se menos uniforme que aquela com o sistema monitor. Enquanto, os valores obtidos com as medições em escala e as simulações computacionais apresentam-se próximos. Mesmo nas situações onde houve maior diferença observa-se que a curva possui traçado similar. As maiores diferenças ocorreram na condição de céu encoberto.

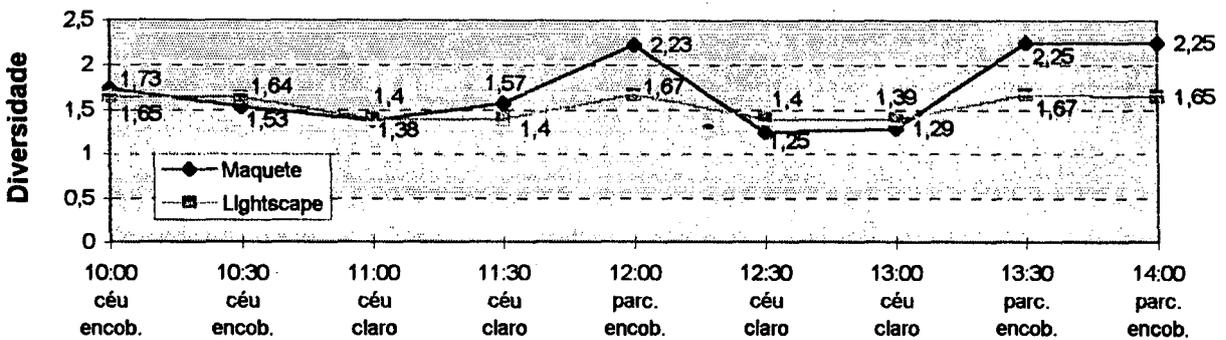


Figura 4.7 - Gráfico comparativo da diversidade 08/março, abertura lucernário

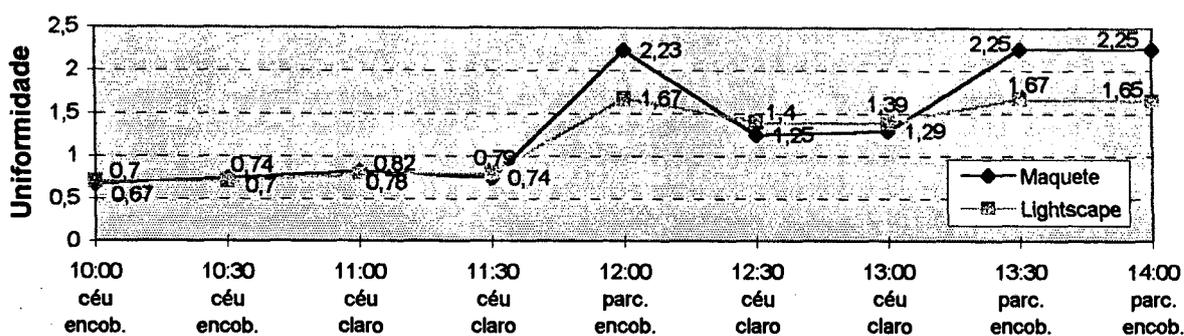


Figura 4.8 - Gráfico comparativo da uniformidade 08/março, abertura lucernário

Comparando-se os valores encontrados para diversidade e uniformidade nas aberturas monitor e lucernário, pode-se afirmar que a abertura monitor apresentou maior uniformidade na distribuição dos seus níveis. Também observou-se que, a comparação da diversidade e uniformidade entre os métodos escala reduzida e simulação computacional apresentou valores similares, portanto, os dois métodos apresentaram o mesmo comportamento da luz natural sob a análise dessas variáveis.

4.1.4 Localização dos Níveis Máximos e Mínimos

Foram utilizados três pontos de medição no modelo em escala, ao reproduzir-se este modelo na simulação computacional o posicionamento dos pontos de medição foram os mesmos. A análise sobre a localização dos níveis de iluminação pretende verificar se o máximo e o mínimo nível registrado em cada método, ocupam a mesma posição. Considerou-se que a localização dos pontos de máximo e mínimo nível de iluminação seria um indicativo do comportamento da luz ao penetrar no ambiente interno simulado. Também pretendia-se verificar com esse método, ainda que, de forma limitada devido ao pequeno número de pontos medidos, a distribuição desses níveis sobre os sistemas zenitais utilizados no modelo, monitor e lucernário.

Foram analisados 9 horários (10:00 às 14:00), com intervalos de 30 minutos, para os dias 06 e 08 de março. No dia 06 de março, abertura monitor, 6 gráficos apresentaram os pontos de máximo e mínimo nível de iluminação localizados na mesma posição, figuras 4.9 a 4.10; 2 gráficos apresentaram apenas mesma localização para o ponto mínimo; e apenas um não apresentou o mesmo posicionamento.

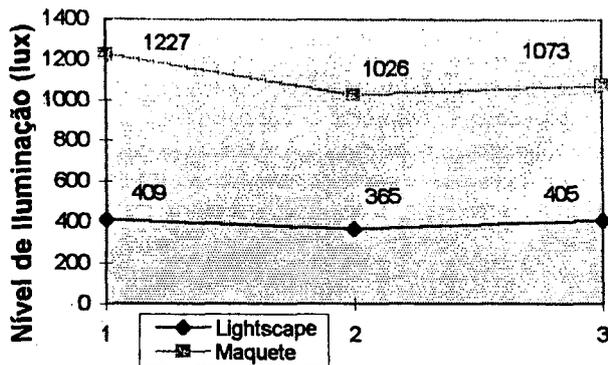


Figura 4.09 - Iluminâncias, monitor/10:30 h

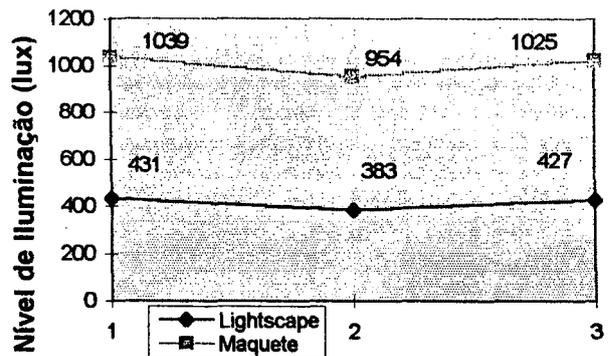


Figura 4.10 - Iluminâncias, monitor/11:00 h

No dia 08 de março, abertura lucernário, dos 9 horários analisados, somente em dois horários ocorre mesma localização dos pontos de máximo e mínimo, figura 4.12, nos gráficos restantes o ponto de mínimo ocupa a mesma localização, mas a simulação computacional apresenta dois valores iguais que correspondem ao seus pontos máximos, figura 4.11.

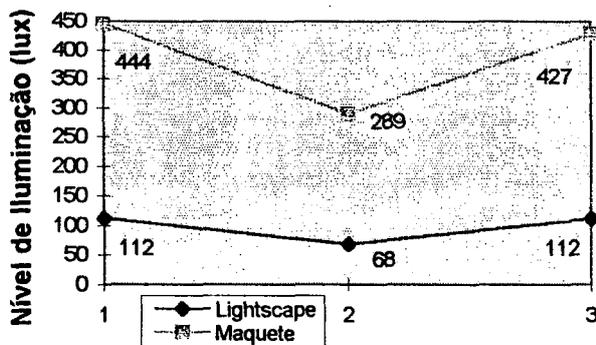


Figura 4.11 - Iluminâncias, lucernário/10:30 h

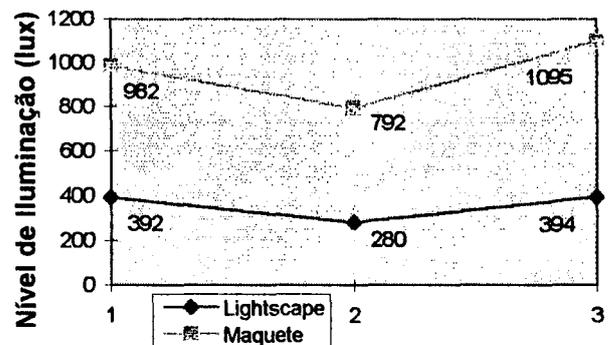


Figura 4.12 - Iluminâncias, lucernário/11:00h

Sobre a distribuição dos níveis no sistema monitor e lucernário, pode-se afirmar que o sistema monitor apresenta uma curva com traçado mais regular que o sistema lucernário. Também, pode-se inferir que o comportamento da luz com o modelo em escala e a simulação computacional mostrou-se muito similar, considerando-se limitações como: o posicionamento do modelo em escala foi realizado apenas com o auxílio de uma bússola dificultando a perfeita orientação do modelo; e também que, nuvens esparsas podem obstruir parte do sol, influenciando as medições em escala e que não são reproduzíveis na simulação computacional.

4.2 ANÁLISE SOBRE A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O MODELO DE ESTUDO

A análise dos resultados obtidos com as simulações computacionais compreende a parte principal deste trabalho. Foram simulados dois sistemas de aberturas zenitais, monitor e lucernário, com os elementos de controle interno e externo. O processo de análise dá-se sobre cada sistema avaliado individualmente, já que não pretendia-se comparar um sistema com o outro, e sim, analisar o comportamento dos sistemas de controle, interno e externo, em cada sistema zenital.

A avaliação do desempenho de cada sistema considera dois parâmetros principais: as iluminâncias (valores médios, máximos e mínimos) e a distribuição desses níveis (uniformidade, diversidade e curvas isolux).

O critério de análise sobre os níveis de iluminação assume a hipótese de que os maiores níveis estão associados a um melhor desempenho do sistema.

A análise sobre a distribuição dos níveis está associada a uniformidade dessa distribuição. Segundo recomendações da CIBSE (1994, p. 29) a diversidade não deve ultrapassar a relação 5:1 e a uniformidade não deve ser inferior a 0,8. Contudo nem sempre esses indicadores representam adequadamente o melhor desempenho. Ainda que parâmetros como a diversidade e a uniformidade possam auxiliar na análise sobre a distribuição, as curvas isolux possibilitam uma avaliação mais completa da distribuição. A construção das curvas isolux para as análises deste trabalho seguiram o método utilizado por Cábus (1997, p. 47), através de intervalos associados à iluminância média. Também foram utilizados na análise com as curvas isolux, algumas perspectivas com a distribuição espacial das iluminâncias através de escala cromática.

4.2.1 Abertura Monitor - Níveis de Iluminação Médios

A abertura monitor em análise apresenta três condições de sistema de controle: controle externo, controle interno e sem controle.

Os maiores valores médios dos níveis de iluminação foram encontrados no sistema sem controle, figura 4.13, seguido pelo sistema com controle interno, e por último, o sistema com controle externo.

O maior nível médio, 792 lux, apresentou-se no solstício de verão (21/12) com céu claro, no sistema sem controle, devido a presença de luz solar direta no ambiente interno. O menor nível médio de iluminação, 27 lux, apresentou-se no solstício de inverno com céu encoberto, no sistema com controle externo.

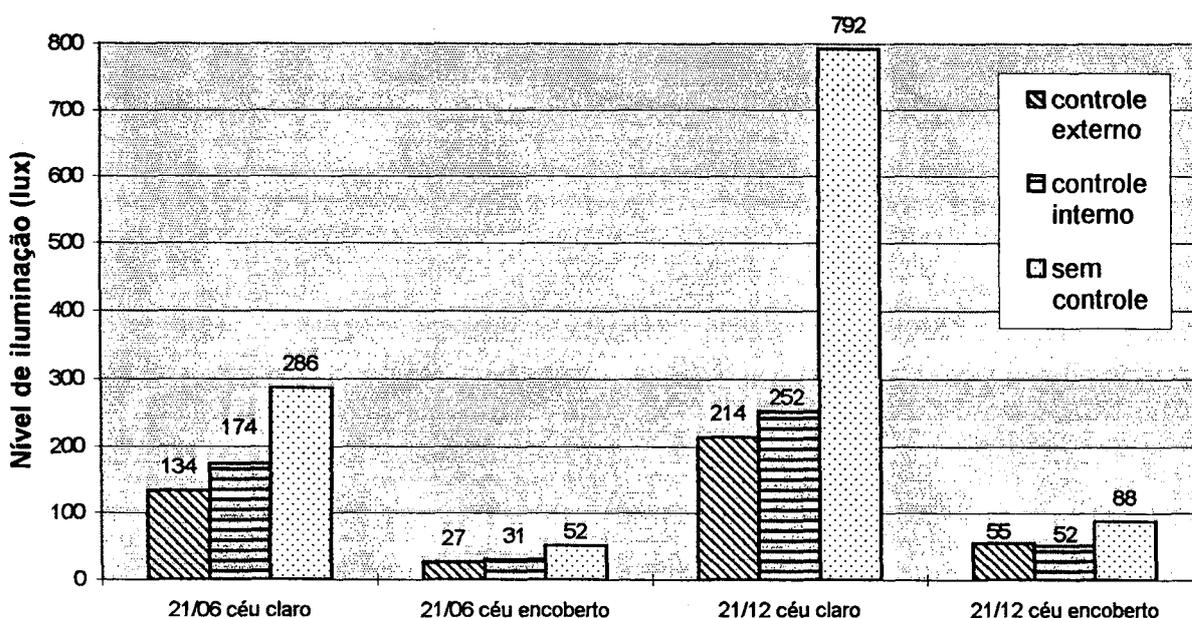


Figura 4.13 - Abertura Monitor - Gráfico da variação na média dos níveis de iluminação

Na tabela 4.1 pode-se observar as diferenças em porcentagem das iluminâncias apresentadas nos sistemas com controle externo e interno comparados ao sistema sem controle. As médias do sistema sem controle foram assumidas como referência. Assim sendo, no solstício de verão com céu claro, onde ocorreu a maior diferença entre os níveis médios encontrados, o sistema interno apresentou um nível médio de iluminação equivalente a 32% do nível médio ocorrido no sistema sem controle, enquanto que o sistema externo apresentou nível médio equivalente a 27% do nível ocorrido no sistema sem controle.

Tabela 4.1 - Abertura monitor - Comparação dos níveis de iluminação médios - Base: sistema sem controle

Tipo de sistema/ data e condição de céu	21/06 céu claro	21/06 céu encob.	21/12 céu claro	21/12 céu encob.
Sistema com controle interno	61%	60%	32%	60%
Sistema com controle externo	47%	50%	27%	63%

No solstício de verão o nível de iluminação médio apresentado no sistema sem elemento de controle é alto, devido a presença de luz solar direta no ambiente interno, razão pela qual a diferença entre o nível médio dos sistemas com controle interno e externo comparado ao sistema sem controle é elevada. Se eliminarmos a componente luz solar direta, o nível médio de iluminação com o sistema sem controle diminui para 283, muito próximo do nível médio apresentado no sistema interno, de 252, e aquele do sistema externo, de 214, e que, corresponderiam respectivamente a 89 e 77% do nível médio do sistema sem controle. Pode-se inferir que os elementos de controle apresentam bom desempenho nos níveis internos na condição de céu claro, principalmente com luz solar direta incidindo sobre a abertura.

Ainda na tabela 4.1 os valores médios dos níveis de iluminação obtidos com o sistema de controle interno, na condição de céu encoberto, são equivalente a 60% daqueles apresentados no sistema sem controle. Enquanto o sistema externo apresentou níveis com 50 e 63% daqueles apresentados no sistema sem controle, na condição de céu encoberto.

Para as condições simuladas, somente no solstício de verão com céu encoberto, o valor médio dos níveis de iluminação no sistema de controle interno apresentou nível médio inferior aquele do sistema de controle externo.

4.2.2 Abertura Monitor - Níveis Máximos e Mínimos

Os máximos níveis de iluminação foram encontrados no sistema sem controle, observar figura 4.14, seguido pelo sistema com controle interno, e por último, o sistema com controle externo.

O máximo nível de iluminação ocorreu no sistema sem controle, 38560 lux (solstício de verão com céu claro), o que significa luz solar direta no ambiente interno.

Entre os máximos níveis de iluminação encontrados o menor deles ocorreu no solstício de inverno, com céu encoberto, no sistema com controle externo, 73 lux.

Os menores níveis de iluminação foram encontrados no sistema com controle externo no solstício de inverno, céu claro e encoberto, e no sistema de controle interno no solstício de verão, céu claro e encoberto, figura 4.13. O menor valor, entre todos, está no sistema de controle externo no solstício de inverno, céu encoberto.

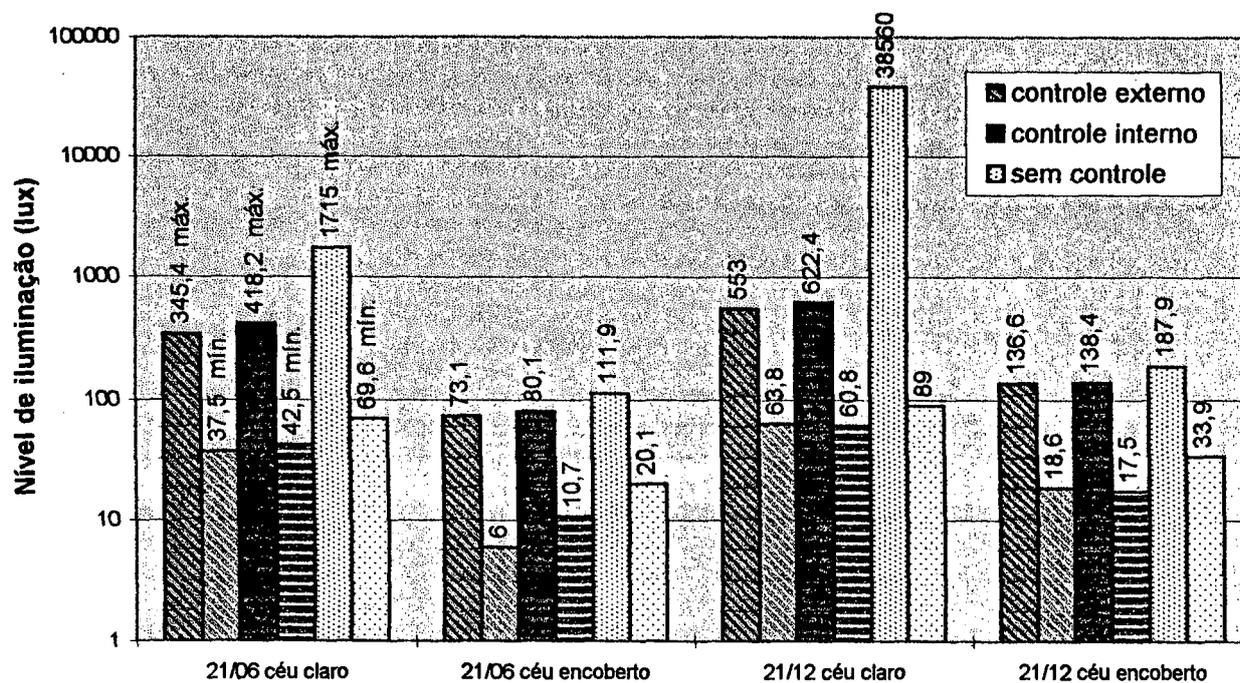


Figura 4.14 - Abertura Monitor - Gráfico da variação dos máximos e mínimos níveis de iluminação

As diferenças em porcentagem dos valores encontrados no sistema sem controle comparado aos sistemas com controle externo e interno, podem ser observadas na tabela 4.2. No solstício de verão com céu claro, ocorreu a maior diferença entre os maiores níveis encontrados.

Tabela 4.2 - Abertura monitor - Comparação dos máximos níveis de iluminação - Base: sistema sem controle

Tipo de sistema/ data e condição de céu	21/06 céu claro	21/06 céu encob.	21/12 céu claro	21/12 céu encob.
Sistema com controle interno	24%	72%	1,6%	74%
Sistema com controle externo	20%	65%	1,4%	73%

Na condição de céu encoberto o sistema interno apresenta os valores mais próximos daqueles apresentados no sistema sem controle, 72 e 74%. Porém, na condição de céu claro as diferenças, tanto para o sistema interno quanto para o externo, são extremamente acentuadas, mas pode-se afirmar que, essas diferenças ocorrem devido aos níveis do sistema sem controle serem excessivos.

As diferenças em porcentagem dos mínimos níveis de iluminação em cada sistema podem ser observados na tabela 4.3. Os valores mínimos apresentam diferenças menos significativas, comparando com aquelas verificadas nos valores máximos.

Tabela 4.3 - Abertura Monitor - Comparação dos mínimos níveis de iluminação - Base: sistema sem controle

Tipo de sistema/ data e condição de céu	21/06 céu claro	21/06 céu encob.	21/12 céu claro	21/12 céu encob.
Sistema com controle interno	61%	53%	68%	52%
Sistema com controle externo	54%	30%	72%	55%

Com céu encoberto o sistema interno apresenta valores correspondentes a 53 e 52% daqueles verificados no sistema sem controle. Enquanto o sistema externo apresenta valores correspondentes a 30 e 55% daqueles verificados no sistema sem controle. O sistema interno, ainda que apresente valores inferiores ao sistema externo no solstício de verão, apresentou homogeneidade nos valores que variaram de 52 a 68% daqueles do sistema sem controle. Já o sistema de controle externo apresentou grande amplitude de variação, de 30 a 72%.

4.2.3 Abertura Lucernário - Níveis de Iluminação Médios

O sistema de abertura lucernário, assim como a abertura monitor, também apresenta três condições de sistema de controle: controle externo, controle interno e sem controle. Os maiores valores médios dos níveis de iluminação foram encontrados no sistema sem controle, figura 4.15, seguido pelo sistema com controle externo, e por último, o sistema com controle interno.

O maior nível médio, 1161 lux, ocorreu no solstício de inverno com céu claro no sistema sem controle, devido a presença de luz solar direta no ambiente interno. O menor

nível médio de iluminação, 23 lux, ocorreu no solstício de inverno com céu encoberto no sistema com controle interno.

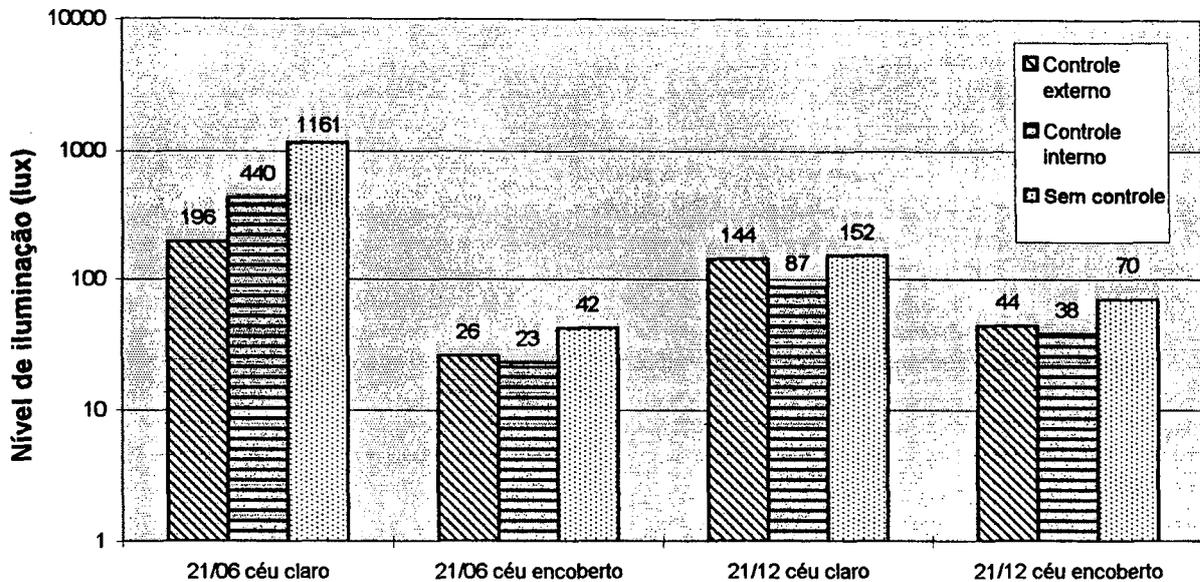


Figura 4.15 - Abertura lucernário - Gráfico da variação na média dos níveis de iluminação

Na tabela 4.4 pode-se observar as diferenças em porcentagem dos valores encontrados no sistema sem controle, comparado aos sistemas com controle externo e interno. No solstício de inverno com céu claro, onde ocorreu a maior diferença entre os níveis médios encontrados, o sistema interno apresentou um nível médio de iluminação equivalente a 38% do nível médio ocorrido no sistema sem controle, enquanto que, o sistema externo apresentou nível médio equivalente a 17% do nível ocorrido no sistema sem controle.

Porém, se eliminarmos a componente luz solar direta presente no ambiente interno no solstício de inverno com céu claro, o nível médio de iluminação com o sistema sem controle diminui para 551, próximo do nível médio apresentado no sistema interno, de 440, e os valores encontrados nos sistemas internos e externos corresponderiam respectivamente a 80 e 36% do nível médio do sistema sem controle.

Tabela 4.4 - Abertura lucernário - Comparação dos níveis de iluminação médios - Base: sistema sem controle

Tipo de sistema/ data e condição de céu	21/06 céu claro	21/06 céu encob.	21/12 céu claro	21/12 céu encob.
Sistema com controle interno	38%	55%	57%	54%
Sistema com controle externo	17%	62%	95%	63%

Com céu encoberto os valores médios dos níveis de iluminação obtidos com o sistema de controle externo são equivalente a 62 e 63% daqueles apresentados no sistema sem controle, enquanto que, no sistema de controle interno os níveis médios equivalem a 55 e 54% daqueles do sistema sem controle.

Na condição de céu claro os níveis médios sofrem variações acentuadas. No solstício de inverno o sistema interno apresenta nível médio superior ao sistema externo e no solstício de verão o sistema externo apresenta nível médio superior ao sistema interno. Essa variação pode estar associada a incidência ou não de luz solar direta sobre o elemento de controle interno, já que no solstício de verão não ocorre radiação solar direta sobre o elemento interno.

4.2.4 Abertura Lucernário - Níveis Máximos e Mínimos

Os máximos níveis de iluminação encontram-se no sistema sem controle, figura 4.15, seguido pelo sistema com controle externo, e por último, o sistema com controle interno. O máximo nível de iluminação ocorreu no sistema sem controle, de 47080 lux, no solstício de inverno com céu claro (presença de luz solar no ambiente interno). Entre os máximos níveis de iluminação encontrados, o menor deles ocorreu no sistema de controle interno, solstício de inverno com céu encoberto, com 62,8 lux.

Os menores níveis de iluminação foram encontrados no sistema de controle interno (exceto no solstício de inverno, céu claro), seguido pelo sistema de controle externo, figura 4.16. O menor valor, entre todos os valores, está no sistema de controle interno, solstício de inverno com céu encoberto, com 5,5 lux. No solstício de verão, céu claro, o sistema com controle externo apresentou seu valor mínimo superior aquele valor mínimo encontrado no sistema sem controle.

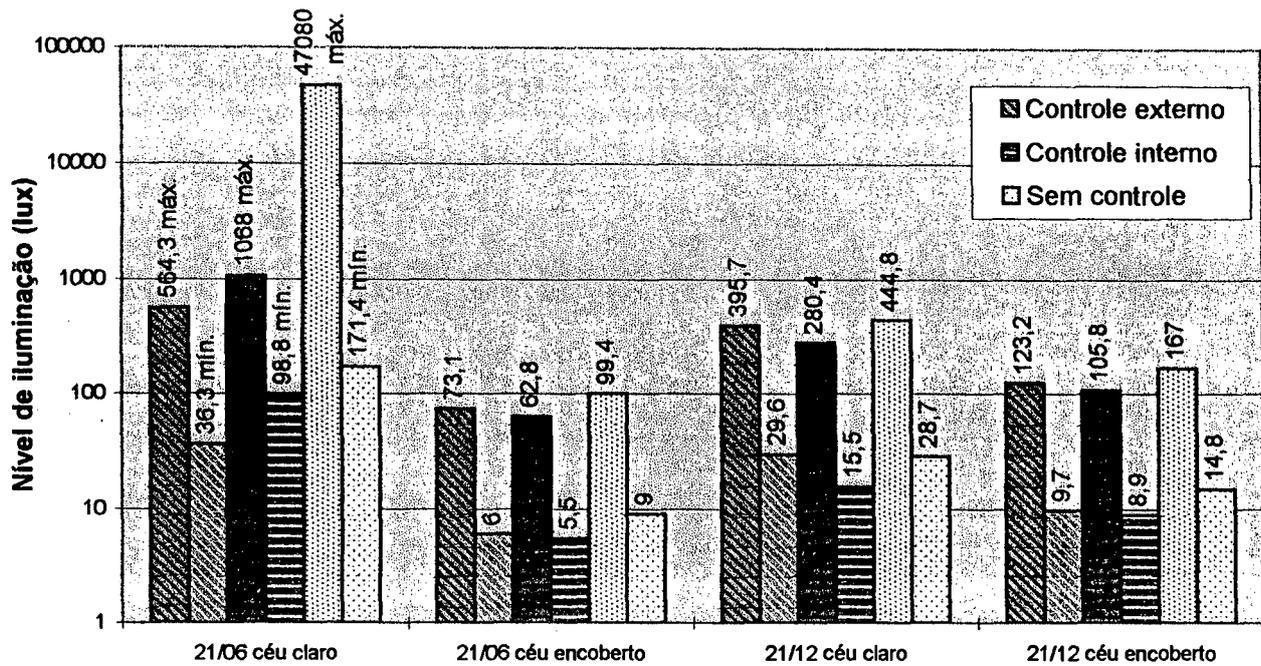


Figura 4.16 - Abertura lucernário

Gráfico da variação dos máximos e mínimos níveis de iluminação

As diferenças em porcentagem dos valores máximos encontrados no sistema sem controle comparado aos sistemas com controle externo e interno podem ser observadas na tabela 4.5. No solstício de inverno com céu claro, ocorreu a maior diferença entre os maiores níveis encontrados, sem dúvida, devido a presença de luz solar direta no ambiente interno com o sistema sem controle. O sistema com controle interno apresentou valor equivalente a 2,3% daquele apresentado no sistema sem controle, enquanto que, o sistema de controle externo apresentou valor equivalente a 1,2% daquele do sistema sem controle.

Na condição de céu encoberto o sistema interno apresentou valores equivalentes a 63% daqueles encontrados no sistema sem controle. Enquanto que o sistema externo apresentou valores equivalentes a 73 e 74% daqueles do sistema sem controle.

Tabela 4.5 - Abertura lucernário - Comparação dos máximos níveis de iluminação - Base: sistema sem controle

Tipo de sistema/ data e condição de céu	21/06 céu claro	21/06 céu encob.	21/12 céu claro	21/12 céu encob.
Sistema com controle interno	2,3%	63%	63%	63%
Sistema com controle externo	1,2%	73%	89%	74%

As diferenças em porcentagem dos mínimos níveis de iluminação em cada sistema podem ser observadas na tabela 4.6. Com céu encoberto o sistema interno apresenta valores correspondentes a 61 e 60% daqueles verificados no sistema sem controle. Enquanto, o sistema externo apresenta valores correspondentes a 67 e 65% daqueles verificados no sistema sem controle. Comparando-se os sistemas externo e interno, o sistema externo apresentou valores superiores.

Tabela 4.6 - Abertura lucernário - Comparação dos mínimos níveis de iluminação - Base: sistema sem controle

Tipo de sistema/ data e condição de céu	21/06 céu claro	21/06 céu encob.	21/12 céu claro	21/12 céu encob.
Sistema com controle interno	58%	61%	54%	60%
Sistema com controle externo	21%	67%	103%	65%

Com céu claro o sistema interno apresentou valores equivalentes a 58 e 54% daqueles verificados no sistema sem controle. No solstício de inverno o sistema externo apresentou valor inferior ao sistema interno, equivalente a 21% daquele encontrado no sistema sem controle, porém, no solstício de verão o sistema externo apresenta valor superior até aquele encontrado no sistema sem controle.

4.2.5 Abertura Monitor - Diversidade e Uniformidade

A diversidade, figura 4.17, oscilou de 7 a 10 no sistema interno; de 7 a 12 no sistema externo e de 6 a 433 no sistema sem controle. Os sistemas interno e externo apresentam menor variação entre seus próprios valores. Já o sistema sem controle, na situação de céu claro, apresenta valores bastante elevados e grande variação entre situações de céu claro para céu encoberto.

O sistema sem controle apresentou a maior diversidade na condição de céu claro, porém apresentou a menor diversidade na condição de céu encoberto.

Comparando-se os sistemas interno e externo, o sistema interno apresentou maior diversidade, exceto no solstício de inverno com céu encoberto.

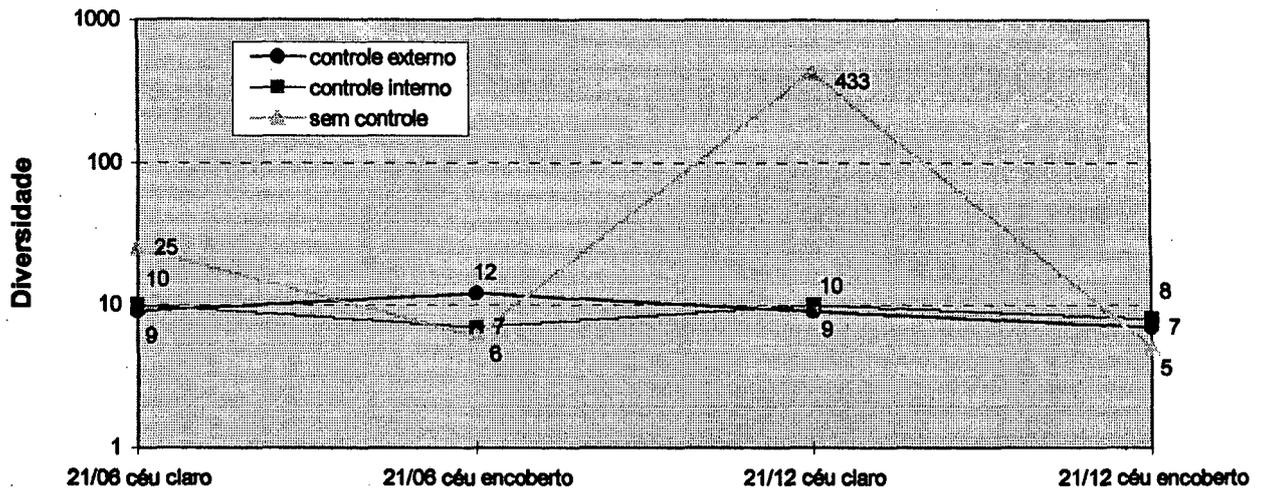


Figura 4.17 - Abertura monitor - Gráfico da diversidade -

A uniformidade com valor próximo de 1 representa uma distribuição dos níveis uniforme. O sistema sem controle apresentou distribuição dos níveis menos uniforme com céu claro, porém, com céu encoberto apresentou a distribuição mais uniforme, figura 4.18.

Comparando-se os sistemas interno e externo, no solstício de inverno o sistema externo apresenta uma distribuição dos níveis mais uniforme com céu claro, enquanto, o sistema interno apresenta distribuição mais uniforme com céu encoberto. No solstício de verão os dois sistemas apresentaram mesma uniformidade.

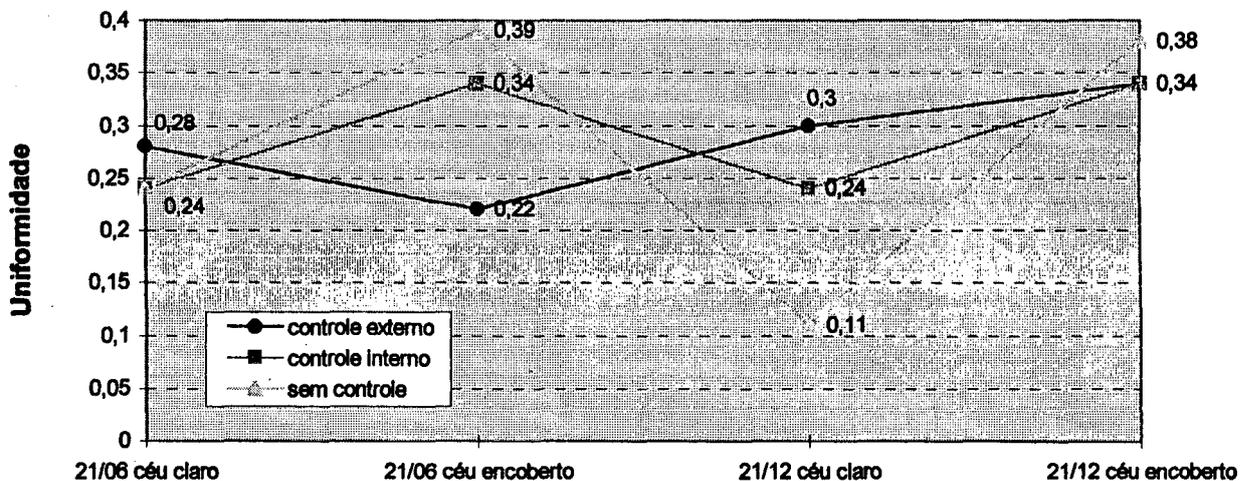


Figura 4.18 - Abertura monitor - Gráfico da uniformidade

Observa-se também que o sistema sem controle apresentou as maiores oscilações nos seus valores da uniformidade, de 0,11 a 0,38. O fator responsável pelas grandes variações ocorridas no sistema sem controle é sem dúvida a presença da luz do sol direta. Os sistemas interno e externo, apresentaram valores de 0,22 a 0,34, sendo esta justamente a maior diferença entre os sistemas interno e externo, que ocorreu no dia 21 de junho com céu encoberto.

4.2.6 Abertura Lucernário - Diversidade e Uniformidade

A diversidade, figura 4.19, oscilou de: 12 a 15 no sistema externo; 11 a 18 no sistema interno e 11 a 275 no sistema sem controle. Os sistemas interno e externo apresentam menor variação entre seus próprios valores. Já o sistema sem controle, na situação de céu claro, apresenta valores bastante elevados, além de apresentar grande variação entre situações de céu claro para céu encoberto.

Na condição de céu encoberto o sistema sem controle apresenta a menor diversidade, porém, apresenta a maior diversidade na condição de céu claro.

Comparando-se os sistemas interno e externo, com céu encoberto o sistema externo apresentou maior diversidade, porém, com céu claro, no solstício de inverno o sistema externo apresentou maior diversidade e no solstício de verão o sistema interno apresentou maior diversidade.

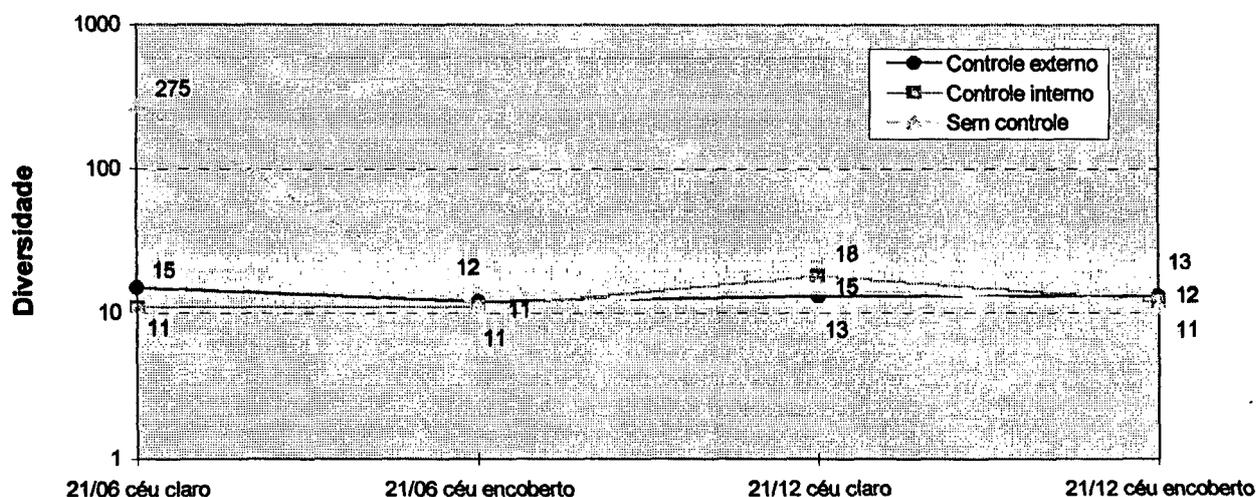


Figura 4.19 - Abertura lucernário - Gráfico da diversidade

Sobre a uniformidade na abertura lucernário, observou-se que o sistema interno apresentou maior uniformidade nos níveis de iluminação, figura 4.20, exceto no solstício de verão com céu claro, onde apresentou o valor mais baixo. Em seguida, o sistema externo apresentou melhor uniformidade. Por último, o sistema sem controle, que apresentou a distribuição menos uniforme, sendo sua situação mais crítica o solstício de inverno com céu claro.

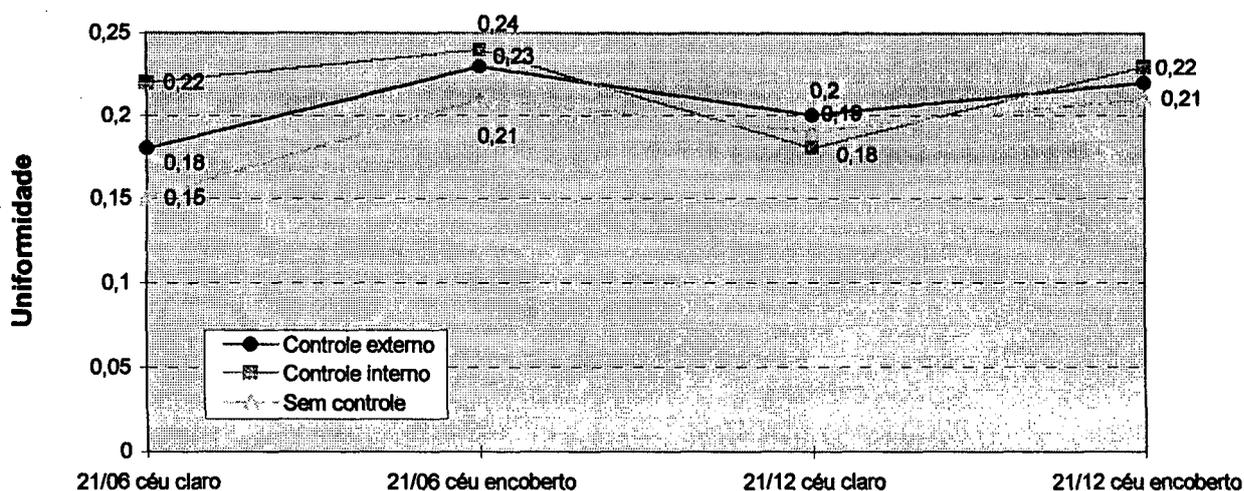


Figura 4.20- Abertura lucernário - Gráfico da uniformidade

4.2.7 Análises sobre as Curvas Isolux

A análise sobre as curvas isolux objetiva verificar a distribuição dos níveis de iluminação. Estabeleceu-se que o nível médio seria o referencial para cada situação. Adotou-se o método gráfico desenvolvido e utilizado por Cábus (1997, p.47), em sua dissertação. O método consiste no mapeamento das iluminâncias encontradas no plano de referência de cada situação simulada. Esse mapeamento é definido por curvas isolux que delimitam três intervalos, tabela 3.2, associados ao nível médio encontrado em cada condição de modelo simulada.

O primeiro intervalo, denominado por intervalo insuficiente, compreende todos os pontos com iluminâncias inferiores a 70% da iluminância média. O intervalo denominado suficiente, compreende os pontos com iluminâncias maiores que 70% e menores que 130% da iluminância média, o intervalo denominado excessivo, compreende os pontos com iluminâncias maiores que 130% da iluminância média.

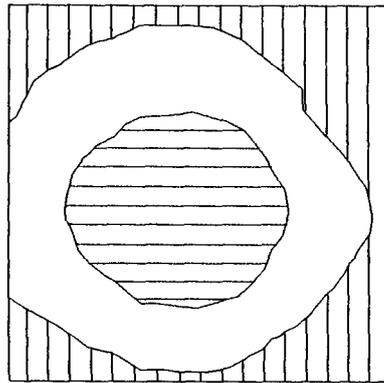
Seguindo essa classificação estabeleceu-se como parâmetro de desempenho a associação com o intervalo suficiente, quanto maior for a área do intervalo suficiente, melhor será a performance do sistema. A legenda que acompanha cada gráfico identifica os níveis e o percentual de área correspondente a cada intervalo.

Também auxiliaram essa fase da análise a utilização de algumas perspectivas com a distribuição espacial das iluminâncias utilizando escala cromática, disponibilizada pelo programa Lightscape.

4.2.7.1 Abertura monitor - Curvas isolux

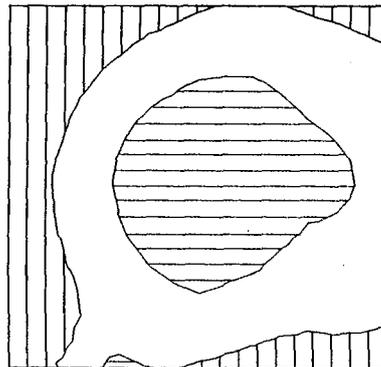
Nas figuras 4.21 a 4.23 pode-se observar as curvas isolux correspondentes ao solstício de inverno, céu claro. Ao sistema de controle interno corresponde o maior percentual de área no intervalo suficiente, de 44%, seguido pelo sistema sem controle, com 43%, e por último o sistema com controle externo, com 38%. No entanto percebe-se que o sistema de controle externo apresenta uma distribuição dos níveis de forma mais regular, mesmo apresentando menores níveis.

Leste



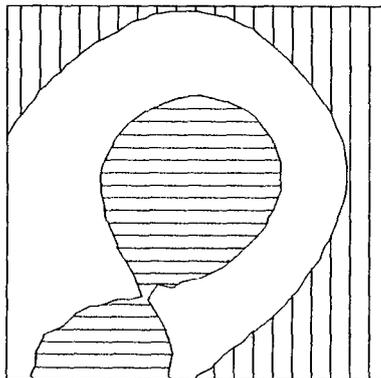
	174-n (lux) - 24% da área
	94-174 (lux) - 38% da área
	0-94 (lux) - 38% da área

Figura 4.21 - Gráfico isoix abertura monitor/control externo - 21/06 céu claro



	226-n (lux) - 24% da área
	122-226(lux) - 44% da área
	0-122 (lux) - 32% da área

Figura 4.22 - Gráfico isolux abertura monitor/control interno - 21/06 céu claro



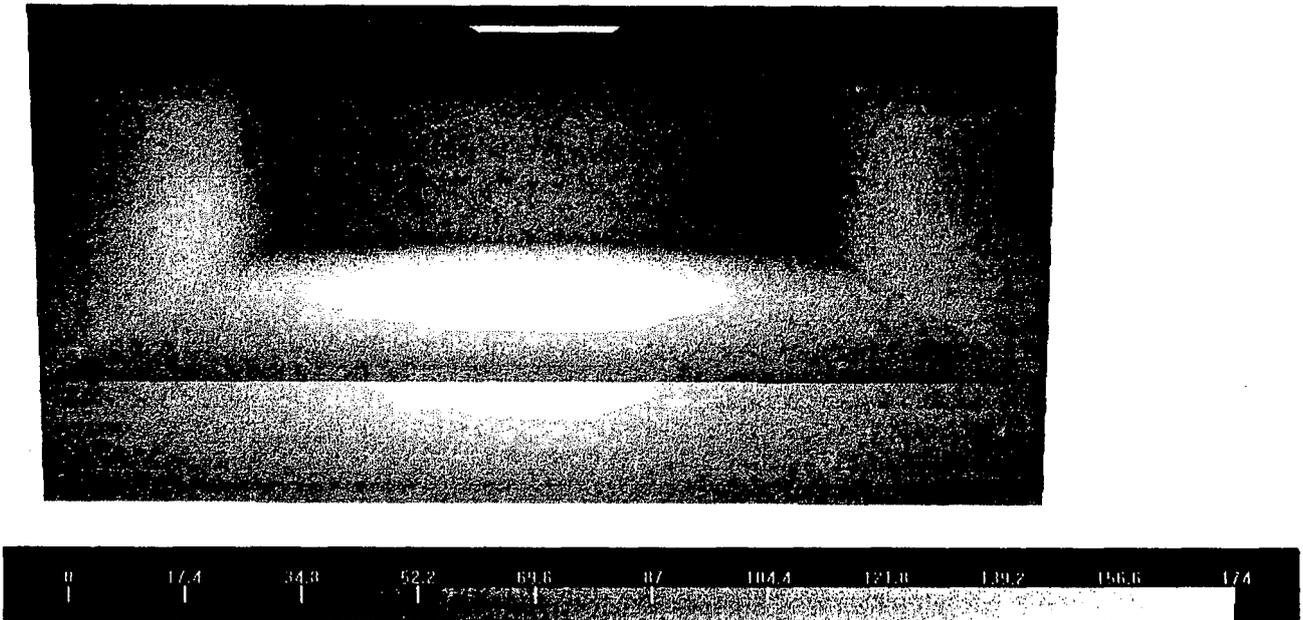
	372-n (lux) - 22% da área
	200-372 (lux) - 43% da área
	0-200 (lux) - 35% da área

Figura 4.23 - Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/06 céu claro

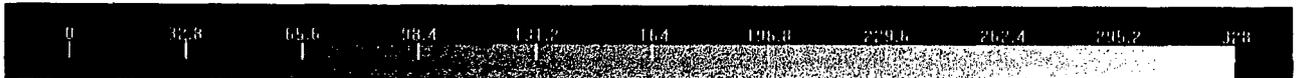
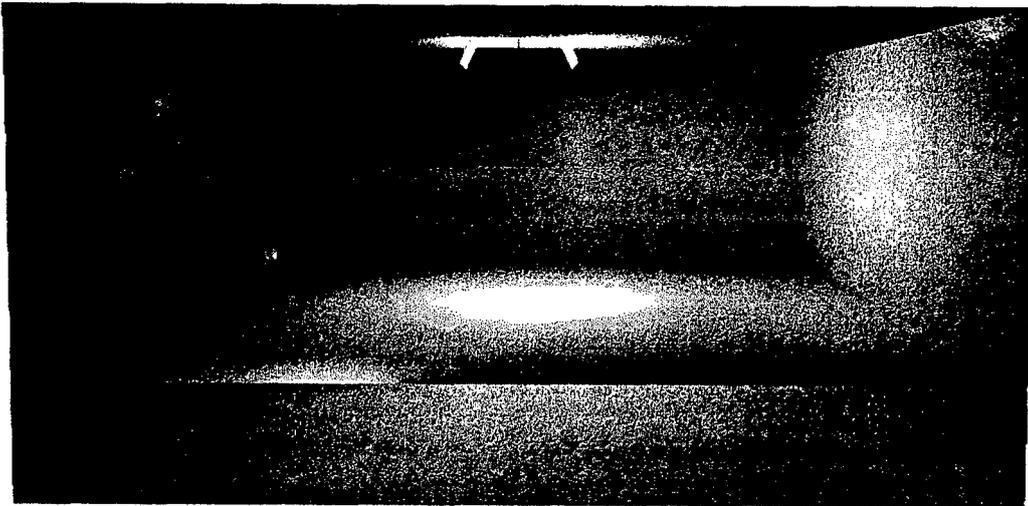
Nas figuras 4.24 a 4.26 são apresentadas algumas perspectivas com a distribuição espacial das iluminâncias. Pode-se perceber na figura 4.24, assim como na figura 4.21, que o sistema externo apresenta um traçado das curvas de forma mais regular comparado ao sistema interno. Ainda que, o sistema interno apresente uma melhor distribuição ou maior área referente ao intervalo suficiente, percebe-se que o sistema interno não exerce um bom controle sobre o fluxo luminoso admitido pela abertura. Este fato também repete-se no solstício de verão com céu claro.

A figura 4.26 refere-se a abertura sem elemento de controle, a perspectiva possibilita um melhor entendimento da figura 4.23. A luz direta do sol não incide diretamente sobre o ambiente interno, mas incide sobre as paredes internas da abertura, parte desse fluxo é refletido para o canto da sala, além desse fato, logo abaixo da abertura há maiores níveis de iluminação, ocorrendo assim, duas áreas com altas iluminâncias, a distribuição e o traçado das curvas neste caso é bastante irregular.

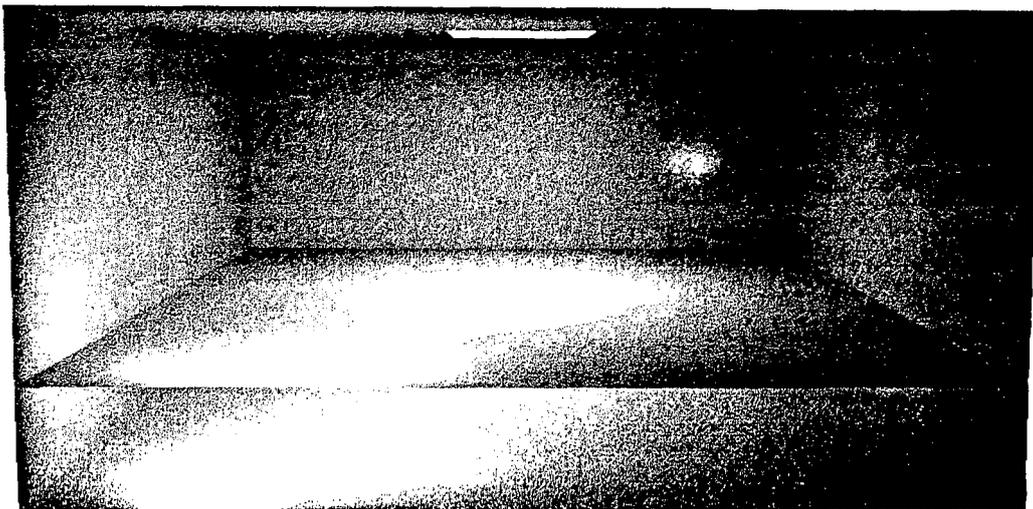
Leste



**Figura 4.24 - Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias
abertura monitor/controlado externo - 21/06 céu claro**



**Figura 4.25 - Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias
abertura monitor/controlado interno - 21/06 céu claro**



**Figura 4.26 - Perspectiva com distribuição espacial das iluminâncias
abertura monitor/sem controle - 21/06 céu claro**

Nas figuras 4.27 a 4.29 observa-se as curvas isolux correspondentes ao solstício de inverno, céu encoberto. Ao sistema sem controle corresponde o maior percentual de área no intervalo 2, de 46%, seguido pelo sistema de controle interno, com 36%, e por último o sistema sem controle, com 29%. Os sistemas interno e sem controle apresentaram traçado das curvas mais regular, enquanto o sistema externo apresentou o traçado mais irregular.

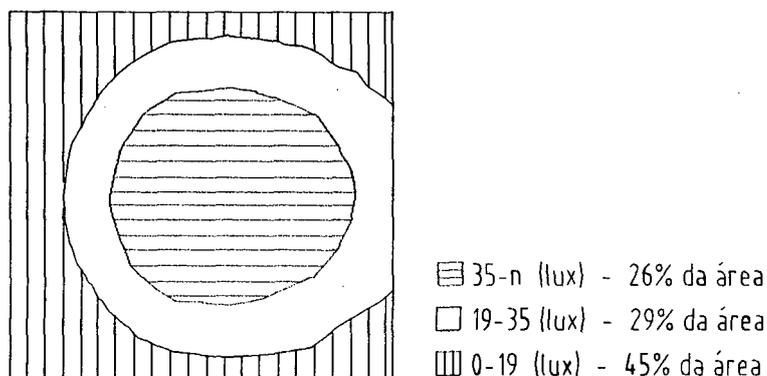


Figura 4.27 - Gráfico isolux abertura monitor/controlado externo - 21/06 céu encoberto

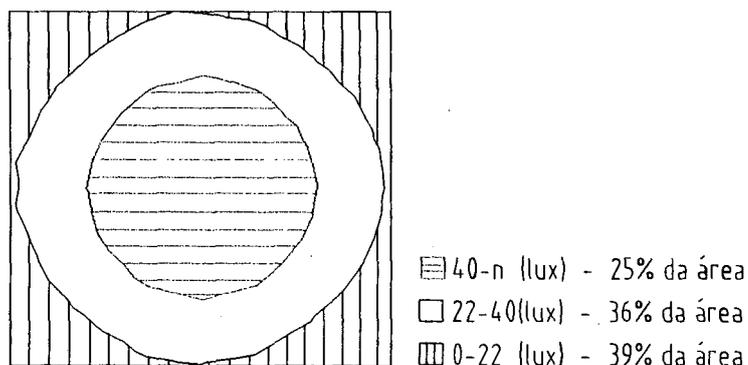


Figura 4.28 - Gráfico isolux abertura monitor/controlado interno - 21/06 céu encoberto

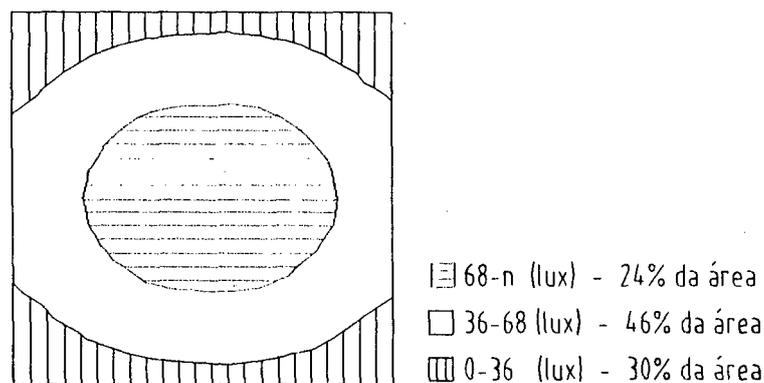


Figura 4.29 - Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/06 céu encoberto

Nas figuras 4.30 a 4.32 pode-se observar as curvas isolux do solstício de verão, céu claro. O maior percentual de área no intervalo 2, encontra-se no sistema interno, de 40%, seguido pelo sistema de controle externo, com 38% (valores muito próximos) e por último o sistema sem controle, com apenas 8% (devido a presença de luz solar direta no ambiente interno). O sistema de controle externo apresentou traçado das curvas isolux mais regular, seguido pelo sistema de controle interno.

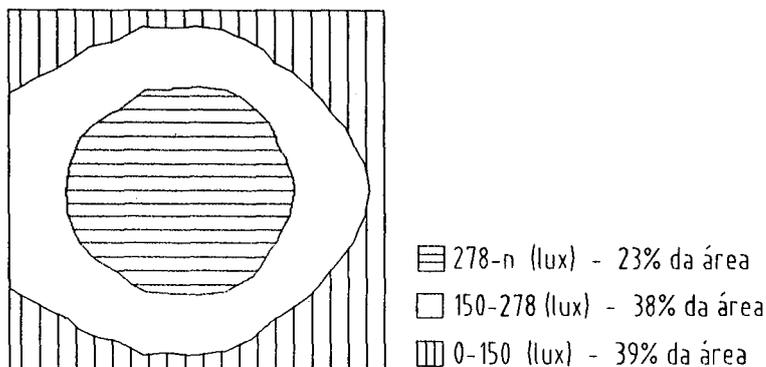


Figura 4.30 - Gráfico isolux abertura monitor/controlado externo - 21/12 céu claro

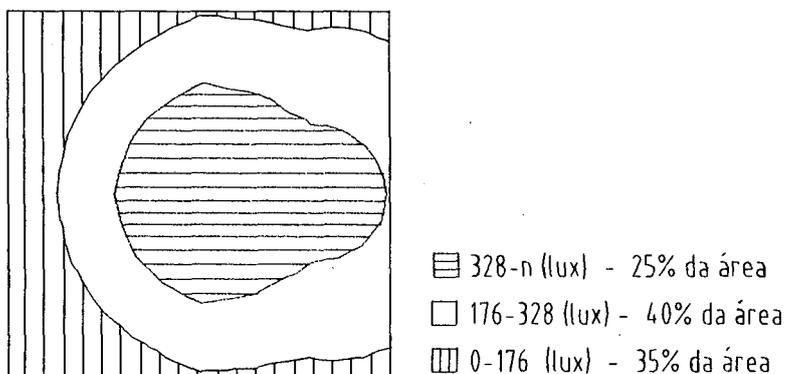


Figura 4.31 - Gráfico isolux abertura monitor/controlado interno- 21/12 céu claro

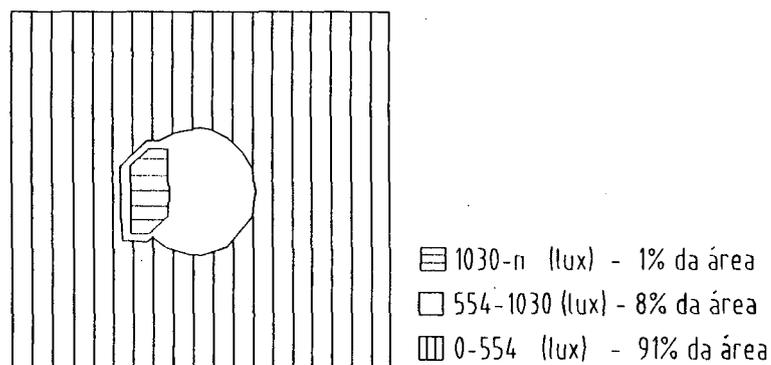


Figura 4.32 - Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/12 céu claro

Nas figuras 4.33 a 4.35 pode-se observar as curvas isolux correspondentes ao solstício de verão, céu encoberto. O sistema sem controle apresentou maior percentual de área no intervalo 2, de 45%, seguido pelo sistema de controle externo com 41%, por último o sistema de controle interno com 38%, que também apresentou traçado das curvas isolux mais regular.

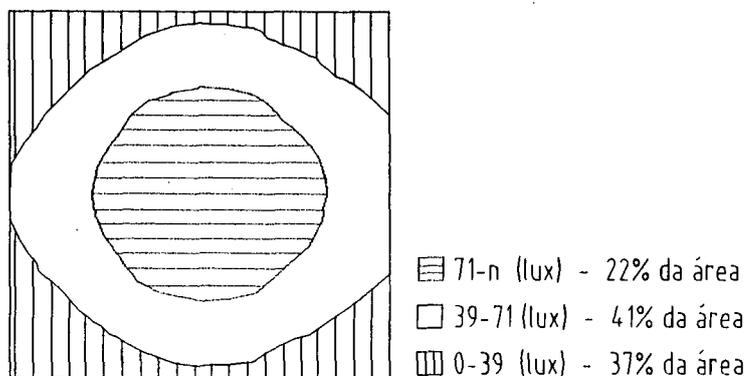


Figura 4.33 - Gráfico isolux abertura monitor/controlado externo - 21/12 céu encoberto

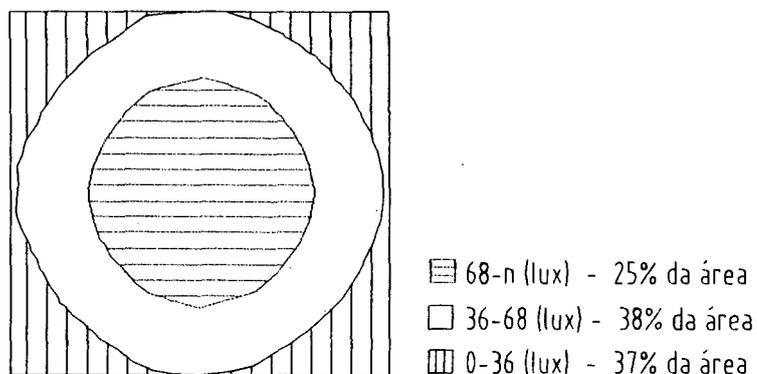


Figura 4.34 - Gráfico isolux abertura monitor/controlado interno - 21/12 céu encoberto

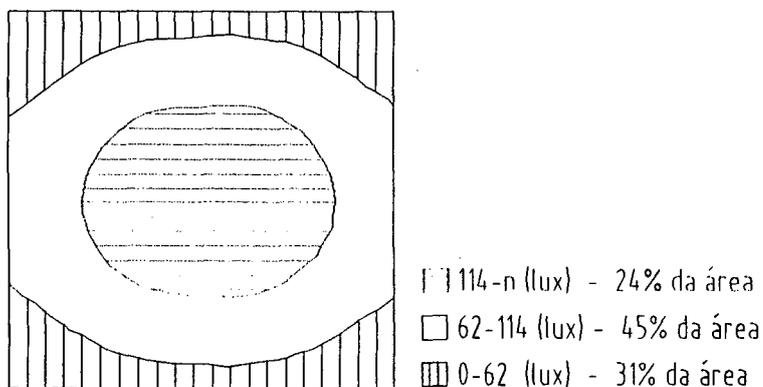


Figura 4.35 - Gráfico isolux abertura monitor/sem controle - 21/12 céu encoberto

4.2.7.2 Abertura Lucernário - Curvas isolux

A análise sobre as curvas isolux com a abertura lucernário segue o mesmo procedimento de análise adotado para a abertura monitor. As figuras 4.36 a 4.38 referem-se ao dia 21/06, céu claro. O sistema com controle interno apresentou maior percentual de área no intervalo 2, com 39%, seguido pelo sistema de controle externo, com 28%. O sistema sem controle apresentou a distribuição mais crítica, com apenas 15%.

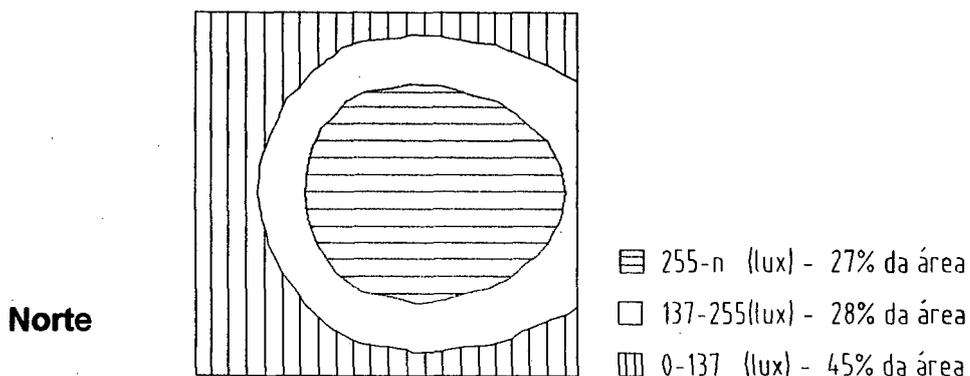


Figura 4.36 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado externo - 21/06 céu claro

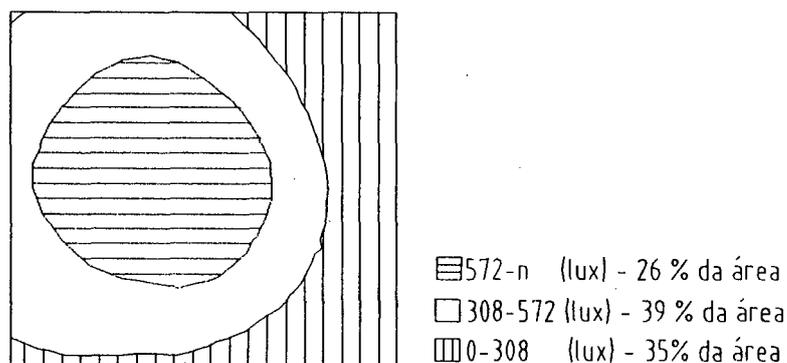


Figura 4.37 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado interno - 21/06 céu claro

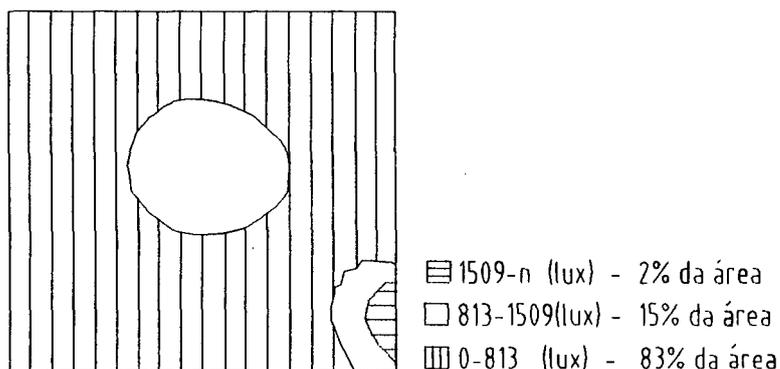
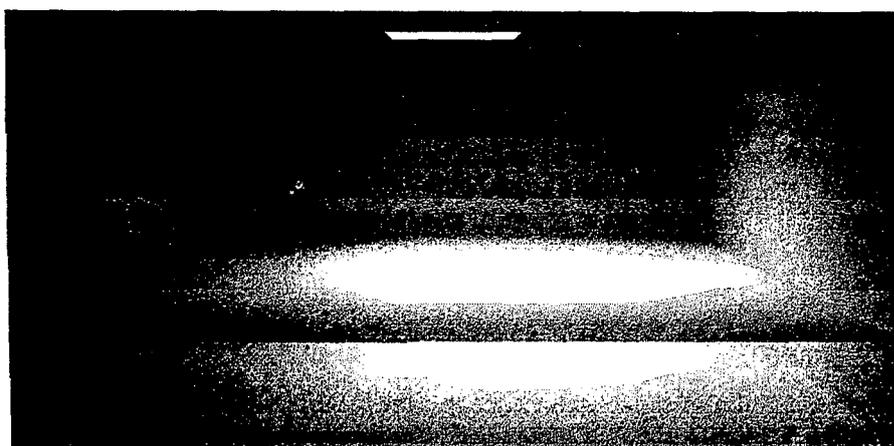


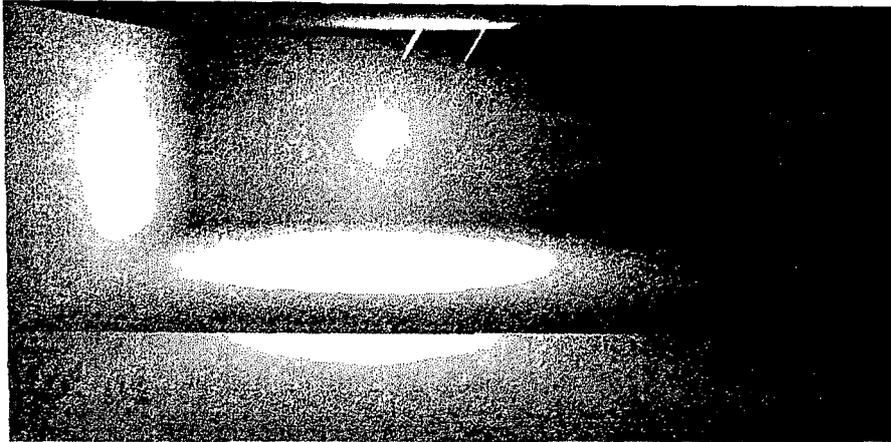
Figura 4.38 - Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/06 céu claro

As figuras 4.39 a 4.41 referem-se a algumas perspectivas com a distribuição espacial das iluminâncias no ambiente interno. No sistema sem elemento de controle há presença de luz solar direta no interior, as maiores iluminâncias concentram-se uma pequena área do ambiente interno. No sistema de controle externo ocorre uma melhor distribuição dos níveis, enquanto, no sistema interno pode-se perceber um redirecionamento da luz para um canto do ambiente, observado também na figura 4.37. Este redirecionamento da luz com o elemento interno repete-se em todas as outras condições observadas de céu claro e encoberto.

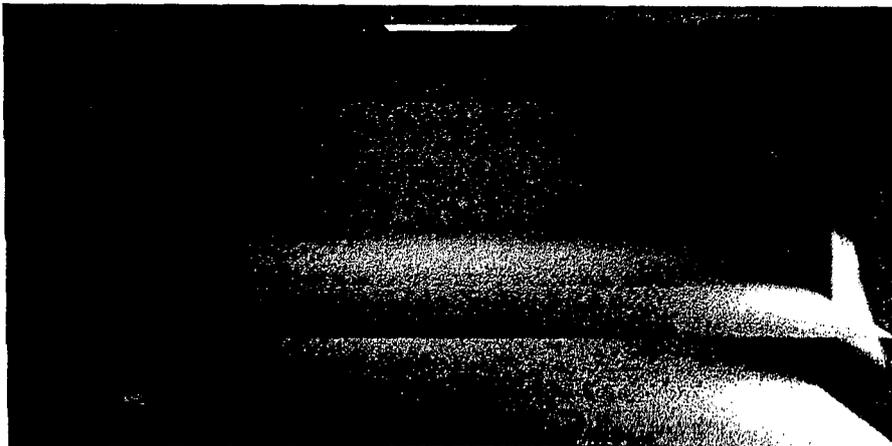
Norte



**Figura 4.39 - Perspectiva com a distribuição espacial das iluminâncias
abertura lucernário/controlado externo - 21/06 céu claro**



**Figura 4.40 - Perspectiva com a distribuição espacial das iluminâncias
abertura lucernário/controlado interno - 21/06 céu claro**



**Figura 4.41 - Perspectiva com a distribuição espacial das iluminâncias
abertura lucernário/sem controle - 21/06 céu claro**

As figuras 4.42 a 4.44 correspondem as curvas isolux referentes ao solstício de inverno, céu encoberto. O sistema com controle interno apresentou maior percentual de área no intervalo 2, com 36%, seguido pelo sistema sem controle, com 33%, e por último o sistema com controle externo, com 31%. Pode-se perceber que o sistema de controle interno apresentou um redirecionamento da luz comparando aos outros sistemas que apresentaram traçado bastante similar.

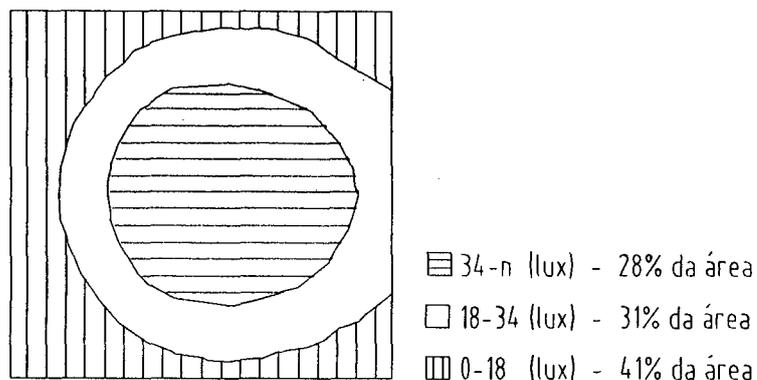


Figura 4.42 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado externo - 21/06 céu encoberto

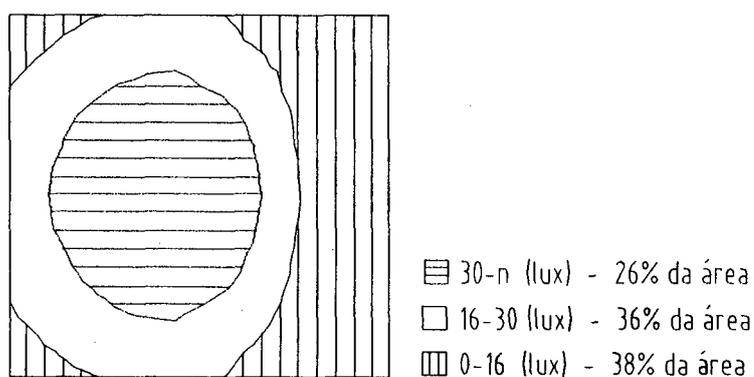


Figura 4.43 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado interno - 21/06 céu encoberto

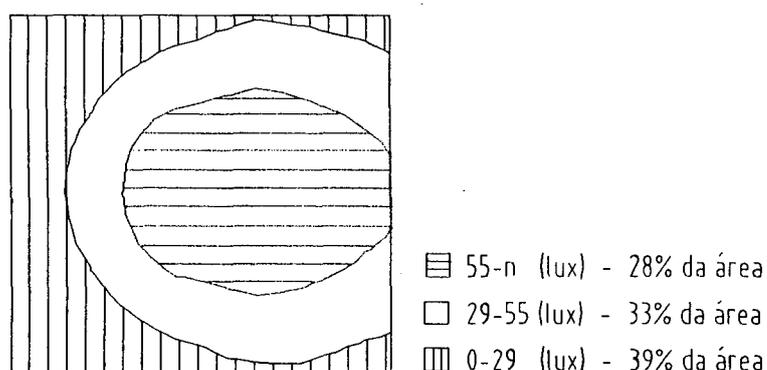


Figura 4.44 - Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/06 céu encoberto

As figuras 4.45 a 4.47 correspondem as curvas isolux referentes ao solstício de verão, céu claro. O sistema com controle interno apresentou maior percentual de área no intervalo 2, de 31%, seguido pelo sistema com controle externo, com 30% (muito próximos), seguidos pelo sistema sem controle, com 28%. Os sistemas de controle externo e sem controle apresentaram traçado das curvas isolux muito similar, enquanto o sistema interno apresentou um redirecionamento da luz.

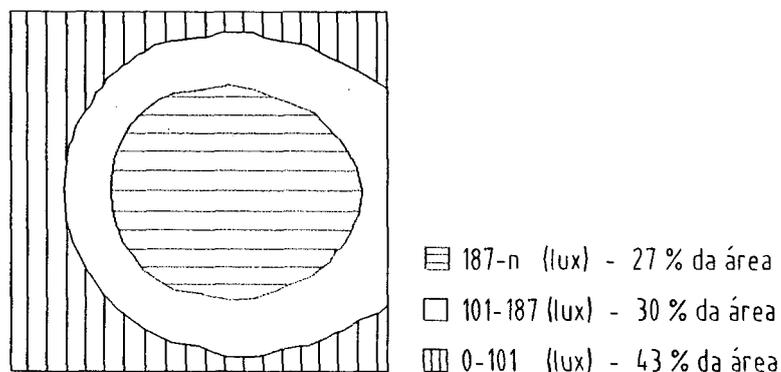


Figura 4.45 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado externo - 21/12 céu claro

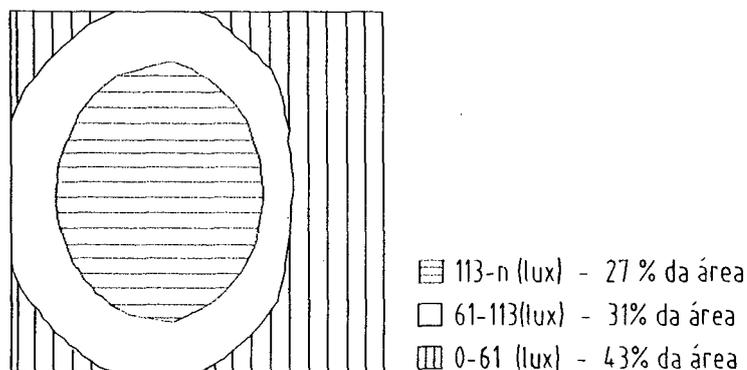


Figura 4.46 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado interno - 21/12 céu claro

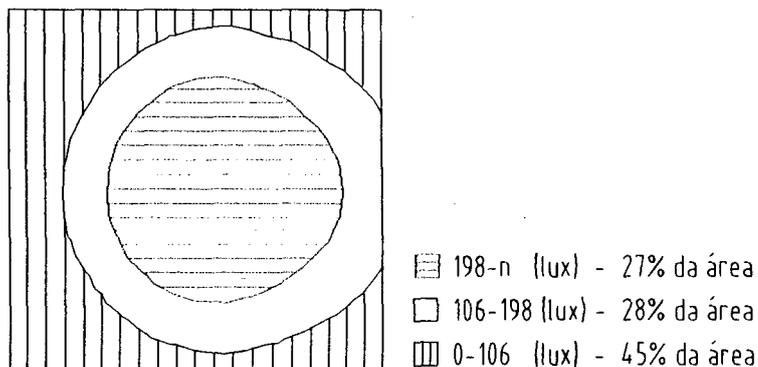


Figura 4.47 - Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/12 céu claro

As figuras 4.48 a 4.50 referem-se ao solstício de verão, céu encoberto. O sistema com controle interno apresentou maior percentual de área no intervalo 2, com 35%, seguido pelo sistema sem controle, com 32%, e por último o sistema com controle externo, com 28,5%. Novamente perceber-se semelhança no traçado das curvas dos sistemas sem controle e controle externo, e redirecionamento da luz no sistema interno.

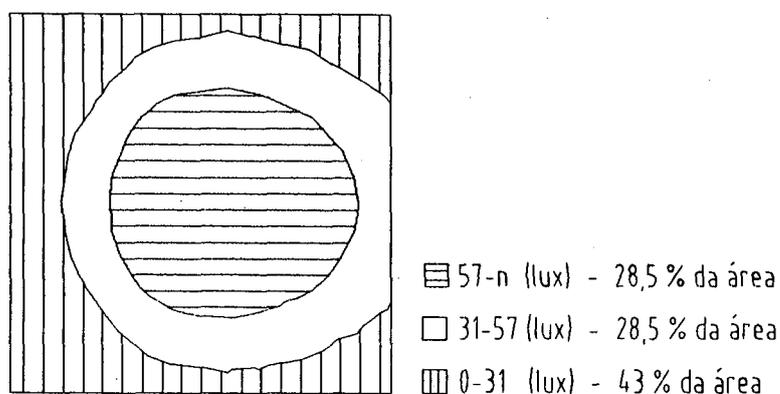


Figura 4.48 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado externo - 21/12 céu encoberto

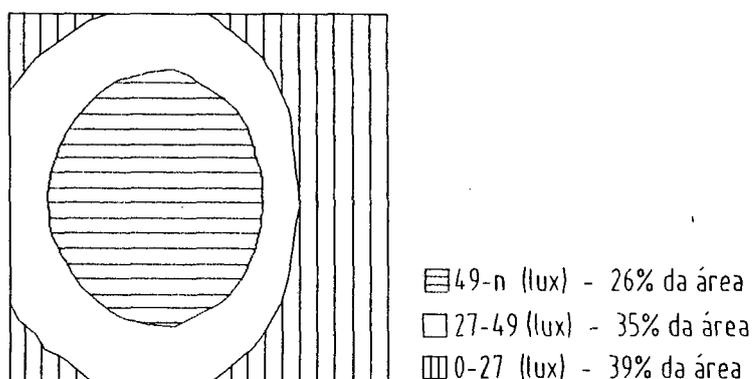


Figura 4.49 - Gráfico isolux abertura lucernário/controlado interno - 21/12 céu encoberto

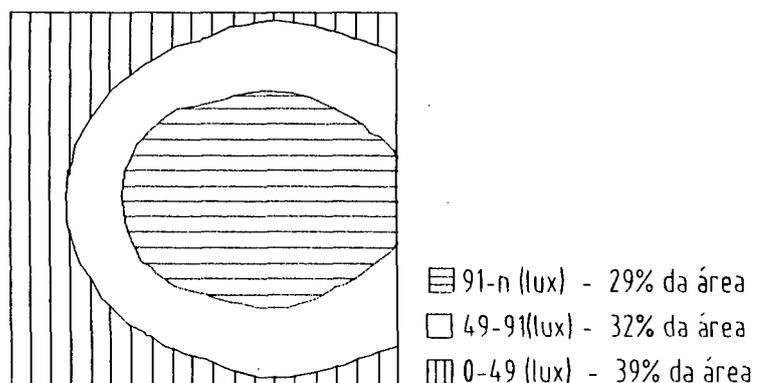


Figura 4.50 - Gráfico isolux abertura lucernário/sem controle - 21/12 céu encoberto

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A utilização da iluminação natural como fonte de luz nos ambientes internos a partir da década de 70 passou a ser tratada com grande interesse, justificando-se principalmente na necessidade de economia energética. Mas além da economia de energia, a luz natural pode trazer outras vantagens ao ambiente interno em forma de benefícios físicos e psicológicos aos usuários. Neste contexto acredita-se que uma das formas de ampliar o uso da luz natural é acrescentar informações sobre os sistemas de iluminação natural.

O objetivo principal do presente trabalho é a análise do comportamento da luz natural, admitida em ambientes internos através de aberturas zenitais, em conjunto com elementos internos e externos de controle da luz solar direta.

As análises realizaram-se sobre as iluminâncias e a sua distribuição espacial no ambiente interno, tendo como variáveis: a tipologia da abertura, monitor e lucernário; o elemento de controle, interno e externo; a estação do ano, solstício de inverno e verão e a condição de céu, encoberto e claro.

O trabalho consistiu na proposição de quatro modelos de estudo com as aberturas zenitais e os elementos de controle, que, posteriormente foram simulados utilizando-se o programa computacional Lightscape®. Também foi realizado um estudo piloto com algumas medições em escala reduzida. Sobre os resultados obtidos com as simulações computacionais foram realizadas as análises e conclusões desta dissertação.

5.1 CONCLUSÕES

A etapa experimental com o estudo piloto utilizando medições em escala reduzida, possibilitou maior interação com o modelo de estudo que naquele momento encontrava-se em fase de definição final. Ressalta-se que nesta etapa não foram analisados os elementos de controle. Essa fase inicial possibilitou também uma interação com os parâmetros de análise escolhidos para o desenvolvimento das análises, que são as

iluminâncias internas e a distribuição espacial dessas iluminâncias. Por último a realização de simulação computacional reproduzindo as condições do modelo em escala reduzida, permitiu algumas comparações entre os dois métodos, e principalmente, melhorar a interface com o programa Lightscape® através dessas primeiras simulações experimentais.

O programa Lightscape®, utilizado nas simulações computacionais, mostrou-se adequado, possibilitando as análises pretendidas sobre as iluminâncias, assim como as análises sobre sua distribuição espacial. Ressaltando-se que as perspectivas com as iluminâncias, apresentadas em escala cinza ou cores, permite fácil visualização e entendimento do comportamento da luz no ambiente simulado. Como aspecto negativo do programa utilizado, ressalta-se que o mesmo não apresenta interface com programas de tratamento de dados.

Os resultados obtidos nas simulações demonstraram que o sistema de controle da luz solar desempenhou sua principal função de excluir a luz direta do sol, e como esperado, as aberturas sem elementos de controle, apresentaram os maiores níveis médios de iluminação.

Na condição de céu encoberto as iluminâncias internas apresentaram-se mais constantes. Para a abertura monitor, o sistema interno apresentou iluminância média equivalente a 60 % daquela apresentada pelo sistema sem controle. Com a abertura lucernário o sistema externo apresentou iluminância média equivalente a 62 e 63 % daquela apresentada no sistema sem controle.

As maiores diferenças nos níveis de iluminação, referentes aos sistemas de controle interno e externo e ao sistema sem elemento de controle, encontram-se nas situações onde ocorreu luz solar direta no ambiente interno. Porém, excluindo-se a componente da luz solar direta ocorre uma grande redução no nível médio de iluminação do sistema sem controle e paralelamente ocorre uma aproximação com os níveis apresentados nos sistemas interno e externo; por exemplo: a iluminância média com o elemento interno na abertura monitor em 21/12 (céu claro) passa de 32 % para 89 % daquela apresentada com o elemento sem controle.

Comparando-se a iluminância média apresentada nas simulações para os sistemas de controle interno e externo, com a abertura monitor, o elemento de controle

interno apresentou maiores níveis que aqueles com o elemento de controle externo, exceto no verão na condição de céu encoberto. Enquanto que com a abertura lucernário, o elemento de controle externo apresentou maiores níveis que aqueles com o elemento de controle interno, exceto no inverno com céu claro.

Considerando-se a média de ocorrências, a observação acima sobre a abertura monitor, confirma a hipótese de que elementos internos apresentam maiores iluminâncias internas. Porém sobre a abertura lucernário não pode-se afirmar o mesmo, no entanto, acredita-se que o elemento de controle interno desenvolvido para a abertura lucernário não apresentou geometria que favorecesse a uniformidade na distribuição dos níveis internos, inclusive contribuindo até para a redução das iluminâncias em alguns pontos do ambiente interno. Com a constatação desse fato, pode-se afirmar que a geometria do elemento pode ser mais determinante nos resultados que o posicionamento interno ou externo.

Ainda sobre a hipótese de maiores iluminâncias com elementos internos, ressalta-se que, as situações onde o elemento de controle interno apresentou menores iluminâncias que o elemento de controle externo coincidiu com aqueles onde a luz solar não incide diretamente sobre o elemento de controle interno. Por exemplo na abertura lucernário, que está orientada para o norte, no verão os raios do sol encontram-se quase paralelamente à abertura, o sistema de controle externo recebe raios solares diretos mas o sistema interno não, os níveis apresentados no ambiente interno com os elementos externos são maiores que aqueles dos elementos internos. Sendo assim, pode-se afirmar que, na ocorrência de luz solar direta sobre os elementos de controle interno e externo, os elementos de controle interno apresentam maiores iluminâncias internas que aquelas apresentadas com o elemento externo.

A análise com os níveis máximos e mínimos confirma as afirmações feitas sobre os níveis médios, ou seja, os máximos níveis ocorreram no sistema que havia apresentado a maior média, assim como, os mínimos níveis ocorreram no sistema que apresentou a menor média.

Após a análise sobre a distribuição dos níveis de iluminação, através da diversidade e da uniformidade, pode-se afirmar que os elementos de controle contribuem para uma distribuição mais uniforme na situação de céu claro, porém, apresentando

limitações na condição de céu encoberto. Ressalta-se que, para a abertura monitor, com céu encoberto, os elementos de controle não favoreceram a uniformidade na distribuição, mas com a abertura lucernário, céu encoberto, os elementos de controle apresentaram melhor desempenho, fato que provavelmente associa-se à geometria da abertura.

Analisando os parâmetros uniformidade e diversidade, observou-se que, com a abertura lucernário o sistema interno apresentou desempenho melhor que o sistema externo. Porém com a abertura monitor, o elemento de controle externo apresentou um desempenho pouco melhor que o sistema interno. O que não confirma a hipótese de que elementos internos apresentariam melhor distribuição dos níveis de iluminação internos.

Contudo, na análise sobre as curvas isolux através dos intervalos associados ao nível médio, as aberturas com elemento de controle interno apresentaram melhor desempenho na distribuição dos níveis, ou, apresentaram maior número de pontos com níveis de iluminação considerados satisfatórios, assim como apresentaram menor número de pontos com níveis de iluminação considerados insuficientes.

Um dos propósitos do método de análise sobre as curvas associadas à iluminância média, é identificar possíveis áreas em um ambiente interno que necessitariam de iluminação suplementar. Neste caso as aberturas com o sistema interno teriam menor necessidade de iluminação suplementar que os sistemas sem controle e sistema externo, confirmando, neste contexto, a hipótese de que elementos internos proporcionam uma melhor distribuição das iluminâncias se comparado com aquela produzida pelos elementos externos.

Entretanto, as análises sobre as curvas isolux também demonstraram que os elementos internos desenvolvidos para as análises desse trabalho apresentaram limitações como: um traçado de curvas mais irregular que o sistema externo, na condição de céu claro, com a abertura monitor e, com a abertura lucernário apresentaram redirecionamento da luz de forma que um canto do ambiente apresentasse baixas iluminâncias.

5.2 RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

Sobre as conclusões realizadas neste trabalho pôde-se elaborar uma listagem com algumas recomendações de projeto de aberturas zenitais e elementos de controle.

1. A utilização de aberturas voltadas para o zênite permitem maior controle sobre a luz solar direta quando o sol está alto. Cuidados devem ser tomados com aberturas voltadas diretamente para o zênite pois admitem mais luz solar direta no verão quando o sol apresenta-se em maiores altitudes e admitem menos luz solar no inverno quando o sol está baixo, ainda que apresente maiores iluminâncias na condição de céu encoberto.
2. A orientação norte para a abertura lucernário e leste-oeste para a abertura monitor com a utilização de elementos de controle, apresenta-se como uma boa solução de projeto; apresenta altas iluminâncias internas e a abertura está protegida da luz solar direta através do elemento de controle, porém permite a entrada da luz refletida e da luz solar direta em baixas altitudes, o que pode contribuir para o aquecimento do edifício em períodos de inverno.
3. Sobre os elementos analisados neste trabalho, sua utilização pode contribuir muito na melhora da distribuição das iluminâncias, principalmente na condição de céu claro. Contudo as limitações apresentadas na condição de céu encoberto devem ser consideradas na tentativa de encontrar uma melhor opção. Pode-se, por exemplo, adotar elementos semi-fixos que apresentem duas posições, uma para céu claro outra para céu encoberto.
4. Deve-se considerar como fator relevante a tipologia da abertura adotada. Cada tipologia de abertura apresenta um comportamento diferenciado em relação a admissão e distribuição da luz incidente sobre a mesma, sendo assim, o elemento de controle deverá estar perfeitamente integrado à abertura, sua atuação deve ser sempre melhorando as deficiências apresentadas na abertura.
5. A geometria do elemento de controle também é fator preponderante. Deve-se cuidar para que o mesmo apresente a melhor performance, considerando-se sua orientação em relação ao sol nas diversas épocas do ano e principalmente qual será seu comportamento frente a incidência do fluxo luminoso sobre o mesmo.

6. A utilização de materiais diferenciados em um mesmo sistema de controle pode apresentar bons resultados. Recomenda-se a utilização além de elementos opacos, materiais especulares, translúcidos e transparentes (superfícies opacas com pequenas perfurações podem apresentar bons resultados).
7. Ainda sobre os elementos de controle, a utilização de superfícies inclinadas e curvas e a possibilidade de múltiplas reflexões entre o elemento e a abertura, pode conduzir a bons resultados. A utilização de menores aberturas espaçadas regularmente e proporcionalmente à dimensão do ambiente, é melhor que grandes aberturas. Vidros claros com elementos de controle podem apresentar melhor performance que a abertura apenas com vidros translúcidos.
8. Deve-se evitar problemas com ofuscamento, os elementos de controle apresentam-se normalmente como uma boa solução, mas seu projeto deve avaliar cuidadosamente esse parâmetro.
9. Elementos internos, apesar de apresentarem maiores iluminâncias internas e melhor distribuição em algumas situações, podem apresentar desconforto térmico. Cuidados adicionais devem ser tomados neste sentido, a utilização de esquadria móvel que permita uma boa ventilação pode melhorar esse problema. Contudo, sobre a contribuição térmica, ressalta-se a necessidade de maiores investigações.
10. Por último, recomenda-se a utilização dos métodos de cálculo e simulação do comportamento da iluminação natural como importante ferramenta na definição de um sistema de abertura com elementos de controle. Uma análise sobre a relação custo e benefício deverá auxiliar a definição do melhor método a ser empregado.

5.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

As principais limitações observadas no desenvolvimento deste trabalho referem-se, principalmente, à não realização de análises sobre a contribuição térmica, assim como, não foram analisados aspectos relativos ao ofuscamento. Também são fatores que limitaram esse trabalho a análise sobre apenas um horário do dia e sobre somente duas épocas do ano.

5.4 SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros recomenda-se maiores estudos comparativos entre simulações computacionais e métodos em escala reduzida ou real, permitindo uma consolidação dos métodos computacionais como alternativa rápida e simplificada à simulação da luz natural.

Recomenda-se também, estudos com a utilização de elementos de controle compostos de materiais especulares e translúcidos; investigações sobre a influência da geometria dos elementos de controle nos níveis de iluminação internos e sua distribuição; variações nas dimensões da abertura e dos elementos de controle e maior número de horários e estações do ano.

Embora, não abordada neste trabalho, a contribuição térmica de elementos internos deve sem dúvida ser investigada em trabalhos futuros. Sabe-se que sistemas de controle externos são mais eficientes pois grande parte do calor é dissipado externamente, ao mesmo tempo que sistemas internos apresentam vantagens como facilidade de manutenção e proteção a intempéries. Qualquer parecer enfatizando qualidades de um sistema sobre o outro deveria, sem dúvida, levar em consideração também os aspectos térmicos.

Não obstante, ressalta-se que os estudos desenvolvidos neste trabalho proporcionam alguns fundamentos importantes para a realização de trabalhos futuros.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT. **Iluminação natural - parte 2 : Procedimentos de cálculo para a disponibilidade de luz natural**, projeto 02:135.02-002. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT. **Iluminância de interiores**. NB - 57. Rio de Janeiro, 1991.
- AIZLEWOOD, M.E. Innovative daylighting systems: An experimental evaluation. **Lighting Research and Technology**, London, v.25, n.4, p.141-152, 1993.
- ANDRADE, Cyro F. O perigo está no ar. **Qualidade na construção**, São Paulo, n.15, p.34-39, 1999.
- BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K.. **Daylighting in architecture : A european reference book**. London : James & James, 1993.
- BASSO, Admir. Avaliação do desempenho de sistemas de controle de insolação e sua interferência na iluminação natural. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (1997:Salvador). Anais. Salvador: FAUFBA/LACAM, ANTAC, 1997. p.315 - 318.
- BELTRÁN, L.O.; LEE, E.S.; SELKOWITZ, S.E. Advanced optical daylighting systems: Light Shelves and Light pipes. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, New York, p.91-106, winter 1997
- BOYCE, P. R. Lighting research and lighting design bridging the gap. **Lighting Design + Application**, New York, p.10-12/50-51, may 1987.
- BOUCHET, B.; FONTOYNONT, M. Daylighting of underground spaces: design rules. **Energy and Building**, Berkeley, CA, v.23, n.3, p.293-298, 1996.

CABEZA, J.M.; LOPEZ-DE-ASIAIN, J.; MORENO, V. Scientific design of classrooms in the new Faculty of Engineering. In: **PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE** (1998: Lisbon). **Environmentally Friendly Cities**. London : James & James, 1998. p.261-264.

CABÚS, Ricardo. **Análise do desempenho luminoso de sistemas de iluminação zenital em função da distribuição de iluminâncias** Florianópolis, 1997. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina.

CIBSE - The Chartered Institution of Building Services Engineers. **Code for interior Lighting**. London, 1994.

CRISP, V.; LITTLEFAIR, P.J. et al. **Daylighting as a Passive Solar Energy Option: na Assessment of its potential in non-domestic buildings**. London, 1988.

CIBSE - The Chartered Institution of Building Services Engineers. **Window Design - Applications Manual**. London, 1987.

CORRÊA, Sílvia R.M. **Luz natural y luz artificial**. Catalunya, 1997. Tese doctoral - Universitat Politècnica de Catalunya.

DEHOFF, Peter. Integrated Solutions for Modern Lighting Design. In: **LUX EUROPA Anais**. 1993. p.341-342.

DORDAI, Philippe. Integrated solutions for daylighting. **Architectural Lighting**, San Francisco, v.11, n.2, p.64-66, april/may 1997.

Energy Research Group. **Daylighting in buildings**. Dublin : School of Architecture, University College Dublin, 1994.

FONSECA, Marçal P.. **Desenho Solar**. São Paulo : Projeto Editores Associados, 1982.

- HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação natural**. Lisboa : Calouste Gulbenkian, 1966.
- HOUSER, K.W.; et al. Toward the accuracy of lighting simulations in physically based computer graphics software. **Journal of the Illuminating Engineering Society**. New York, v.28, n.1, p.117-129, winter 1999.
- IESNA - Illuminating Engineering Society of Northern America. **Lighting Handbook**. New York : IESNA, 1993.
- IESNA, Illuminating Engineering Society of Northern America.. 1997 IESNA software survey. **Lighting Design + Application**. New York, v.27, n.7, p.41-50, julho 1997.
- KRISTENSEN, P. Daylighting design of european buildings. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ENERGY PERFORMANCE AND INDOOR CLIMATE IN BUILDINGS (1994: Lyon-France). Anais. Lyon: 1994. p.587-596.
- LAM, William M.C. **Sunlighting** : as formgiver for architecture. New York : Van Nostrand Reinhold, 1986.
- LEDER, S. M.; PEREIRA, F.O.R. Análise de proposta inovativa para uso da iluminação natural: estudo de caso. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: Qualidade no Processo Construtivo (1998:Florianópolis). Anais. Florianópolis. ANTAC, 27 a 30 abril de 1998. p.421-427.
- LIDA, Itiro. **Ergonomia** : projeto e produção. São Paulo : Edgard Blucher, 1990.
- Lightscape Visualization System User's Guide Version 3. 1996. San Jose, CA:Lightscape Technologies, Inc.
- Lightscape Visualization System Getting Started Version 3. 1996. San Jose, CA:Lightscape Technologies, Inc.

- LOMONACO, C.; MILLER, D. Confort and control in the workplace. **Ashrae journal**. Atlanta, v.39, n.9, p.50-56, september 1997.
- LUDLOW, A. M. The functions of windows in buildings. **Lighting Research & Tecnology**. London, v.8, n.2, p.57-68, 1976.
- MOORE, Fuller. **Concepts and practice of architectural daylighting**. New York : Van Nostrand Reinhold, 1985.
- MURRAY, Peter. **Arquitectura del renacimiento**. Spain : Aguilar, 1972.
- NAVVAB, Mojtaba. Daylight system design and evaluation of the museum of contemporary art in Chicago. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, New York, p.160-173, summer 1998.
- OLGYAY, V. **Design with climate**. Princeton : Princenton University, 1973.
- PEREIRA, Fernando O. Ruttkay. Luz solar direta: tecnologia para melhoria do ambiente lumínico e economia de energia na edificação. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (2.: 1993: Florianópolis). Anais Florianópolis: 1993. p.257-267.
- PEREIRA, Fernando Oscar R. **Curso de iluminação natural no ambiente construído**. III Encontro Nacional e I Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Gramado, 1995.
- PEVSNER, Nicolau. **Historia de las tipologias arquitectonicas**. Barcelona : Gustavo Gili, 1979.
- PILOTTO NETO, Egydio. **Cor e Iluminação nos ambientes de trabalho**. São Paulo : Ciência e Tecnologia, 1980.
- REA, M. **IES lighting handbook**. New York : Illuminating Engineering Society, 1993.

- ROBBINS, Claude L. **Daylighting** : design and analysis. New York : Van Nostrand Reinhold, 1986.
- ROMERO, M.A.; TORRES, C. A utilização do software "Lumem Micro 5" no projeto de iluminação artificial: o caso do edifício da companhia São Paulo. In: SEMINÁRIO MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES (1995: São Paulo). Anais. São Paulo: 1995. p.31-40.
- RUDOLFSKY, Bernard. **Architecture without architects**. London : Academy Editions, 1981.
- SCARAZZATO, Paulo Sérgio. DLN. Software preditivo da disponibilidade de luz natural em planos horizontais e verticais externos às edificações. In: SEMINÁRIO MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES (1995: São Paulo). Anais. São Paulo: 1995. p.269-273.
- SHARP, Dennis. **Historia en imágenes de la arquitectura dei siglo XX**. Barcelona : Gustavo Gili, 1973.
- SCHILER, Marc. **Simulation daylight with architectural models**. Los Angeles, DNNA (Daylighting Network of North America) and the University of Southern California, San Diego. 1987.
- SOUZA, Roberta V. G. **Iluminação natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas desenvolvimento de ferramenta simplificada e sua aplicação à legislação construtiva**. Florianópolis, 1997. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina
- TEBBITT, Peter. **Paris en 160 photos**. Hachette/Guides bleus 1986.
- THERMIE programme, Energy Research Group. **Daylighting in Buildings**. Dublin : The European Commission Directorate General for Energy (DGXVII), School of Architecture, University College Dublin, 1994.

TRAVERSO, G.; VIGHY, P. Daylight control system for a new pavilion for modern art exhibition in the Biennale of Venice. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (1998: Lisbon). **Environmetally Friendly Cities**. London : James & James, 1998. p.441-444.