Dimas Bertolotti

Iluminação natural em projetos de escolas:

uma proposta de metodologia para melhorar a qualidade da
iluminação e conservar energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Scarazzato

FAUUSP

São Paulo
2007

Dimas Bertolotti

Iluminação natural em projetos de escolas:

uma proposta de metodologia para melhorar a qualidade da
iluminação e conservar energia

Dissertação apresentada à Comissão de
pós-graduação da Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade
de São Paulo como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração:
Tecnologia da Arquitetura

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Sérgio Scarazzato

São Paulo

2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

ASSINATURA:

E-MAIL: dimas@bertolotti.arq.br

Bertolotti, Dimas
B546i Iluminação natural em projetos de escolas: uma proposta de
metodologia para melhorar a qualidade da iluminação e conservar
energia
/ Dimas Bertolotti. --São Paulo, 2007.
144 p. : il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Tecnologia
da Arquitetura) - FAUUSP.

Orientador: Paulo Sérgio Scarazzato

1. Iluminação natural 2. Escolas (Arquitetura) 3. Conservação
de energia I. Título

CDU 628.92

Ao Lucas e à Luisa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Scarazzato, pelo apoio e a atenção dedicada.

Ao LABAUT, pelo apoio e pelo empréstimo dos equipamentos para a realização dessa pesquisa.

Aos amigos e colegas da pós-graduação, Daniela Laudares, Norberto Moura, Marcos Yamanaka e Sandra Regina, pela força e estímulo mútuo.

Fábula de um arquiteto

A arquitetura como construir portas
de abrir; ou como construir o aberto;
construir, não como ilhar e prender,
nem construir como fechar secretos;
construir portas abertas, em portas;
casas exclusivamente portas e teto.
O arquiteto: o que abre para o homem
(tudo se sanearia desde casas abertas)
portas por-onde, jamais portas-contra;
por onde, livres: ar luz razão certa.

Até que, tantos livres o amedrontando,
renegou dar a viver no claro e aberto.
Onde vãos de abrir, ele foi amurando
opacos de fechar; onde vidro, concreto;
até refechar o homem: na capela útero,
com confortos de matriz, outra vez feto.

(João Cabral de Melo Neto)

RESUMO

BERTOLOTI, DIMAS. **Iluminação natural em projetos de escolas**: uma proposta de metodologia para melhorar a qualidade da iluminação e conservar energia. 2007. 150 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Este trabalho tem como objetivo analisar estratégias de iluminação natural utilizadas nos estágios iniciais do projeto de arquitetura capazes de aumentar a qualidade da iluminação e a conservação de energia nos edifícios escolares. Essas estratégias têm sido aplicadas com sucesso em edifícios escolares em vários países, melhorando o desempenho e o bem-estar dos estudantes e conservando energia.

Entre essas estratégias, o autor selecionou um dispositivo zenital para iluminação natural com seleção angular e difusores opacos, realizou um ensaio experimental em um modelo físico reduzido de uma sala de aula padrão, sob condições de céu real e analisou comparativamente os resultados.

O estudo mostrou que a adoção de uma metodologia para utilizar estratégias como a analisada neste trabalho pode conseguir um adequado controle da radiação solar para evitar a incidência direta da luz do Sol, evitar o ofuscamento e o aquecimento excessivo de ambientes de salas de aula em climas quentes e, ao mesmo tempo, aproveitar a iluminação natural, tanto difusa quanto direta refletida, para obter maior conforto visual e economizar energia.

Palavras-chave: iluminação natural, escolas sustentáveis, arquitetura escolar, conservação de energia, ofuscamento, dispositivo zenital com seleção angular.

ABSTRACT

BERTOLOTTI, DIMAS. **Daylighting in schools projects:** a proposition of a methodology to enhance lighting quality and energy savings. 2007. 150 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

This work aims to analyse daylighting strategies applied in early stages of architectural design as to improve lighting quality and energy savings in school buildings. Similar strategies have already been successfully applied in many countries around the world, enhancing student's performance and well being while helping to save energy.

Among the strategies studied, the author describes an experiment under real sky conditions using a physical scale model of a standard classroom equipped with a roof monitor combined with an overhang and interior vertical diffusing baffles as a way to check its influence in interior lighting conditions.

The experiment has shown that the use of daylighting strategies can promote an adequate control of solar radiation, avoiding direct sunlight penetration inside the classrooms, limiting glare problems and excessive heat of hot climates. At the same time, such strategies optimise both direct and diffuse use of daylight to improve visual comfort and energy savings.

Keywords: daylighting, sustainable schools, school building design, energy savings, glare, roof monitor with diffusing baffles.

LISTA DE FIGURAS

Capa	– Em cima, à esquerda: Escola Apollo. Fonte: Hertzberger, 1996.	
	– Em cima, à direita: Four Corners School. Fonte: Boora Architects, 2005.	
	– Embaixo, à esquerda: Foto do interior do modelo. Fonte: Autor.	
	– Embaixo, à direita: Simulação no programa Ecotect. Fonte: Autor.	
Figura 1 – A:	A luz influencia na liberação da melatonina no organismo.	
	Fonte: www.universe-review.ca	11
Figura 1 – B:	Gráfico da variação da temperatura do corpo no ciclo dia / noite.	
	Fonte: www.hhmi.org	11
Figura 2 –	Espectro eletromagnético da radiação solar. Fonte: www.squ1.com	14
Figura 3 –	Paimio Sanatorium, Finlândia, projeto do arquiteto Alvar Aalto. Fonte:	
	www.landliving.com	16
Figura 4 –	Algumas estratégias para a iluminação natural das “green schools” americanas: (A) Iluminação zenital com defletores para evitar ofuscamento; (B) “Light pipe” para conduzir luz natural para os espaços internos; (C) Prateleiras de luz para conduzir a luz mais profundamente nas aberturas laterais. Fontes: (A) Innovative Design, (B) www.solatube.com , (C) Daylight dividends – Case studies – Innovative design, 2004	26
Figura 5 – A:	Refletâncias recomendadas para superfícies e mobiliário da sala de aula. Fonte: IESNA, 2000.	31
Figura 5 – B:	Proporção entre a luminância da tarefa visual e a luminância das superfícies mais significativas de uma sala de aula. Fonte: IESNA, 2000	31
Figura 6 –	A iluminação natural deve ser adequada às atividades que se desenvolvem nos diferentes ambientes de uma escola: Sala de artes, Universidade da Califórnia (A); ginásio de esportes da Lincoln High School, Califórnia. Fonte: Boora Architects, 2006	32
Figura 7 –	Uma das principais recomendações para a iluminação de salas de aula é evitar a radiação solar direta (A) e utilizar luz natural difusa, direta e refletida (B). Fonte: Square One - www.squ1.com	34

Figura 8 – Distribuição uniforme e suave da luz natural e integração com iluminação artificial em salas de aula. Roy Lee Walker Intermediate School. Fonte: DesignShare, 2006.	35
Figura 9 – Reflexão especular: brilho intenso impede a visão da escala na régua de metal (A); ofuscamento desabilitador: brilho intenso no campo visual impede a realização da tarefa (efeito de véu). Fonte: Tregenza e Loe, 1998.	54
Figura 10 – Fontes de ofuscamento em uma sala de aula devido ao tamanho e ao posicionamento das aberturas. Fonte: Autor da pesquisa.	58
Figura 11 – À medida que diminuem as aberturas, aumenta o contraste destas com o teto, a parede frontal e as paredes laterais, aumento a probabilidade de ofuscamento. Fonte: www.londonmet.ac.uk	59
Figura 12 – Aspecto da iluminação natural de um espaço interno com 2% (A) e 5% (B) de FLD. Fonte: www.londonmet.ac.uk	62
Figura 13 – Relação entre a variação das refletâncias das superfícies internas e a variação do FLD. Fonte: www.londonmet.ac.uk	63
Figura 14 – Foto da sala de aula padrão FDE. Fonte: ArcoWeb, 2005	68
Figura 15 – Desenho em planta de sala de aula padrão FDE. Fonte: FDE, 2003 ...	68
Figura 16 – Projeto do modelo físico em escala reduzida de uma sala de aula padrão. Fonte: Autor da pesquisa.	69
Figura 17 – Carta solar para o cálculo do protetor solar para a orientação Norte. Fonte: Autor da pesquisa.	71
Figura 18 – Quebra-sol horizontal no modelo (A) e projetado no programa SolarTool (B). Fonte: Autor da pesquisa.	71
Figura 19 – Carta solar para o cálculo do protetor solar orientação Sul. Fonte: Autor da pesquisa.	72
Figura 20 – Quebra-sol vertical no modelo (A) e projetado no programa SolarTool (B). Fonte: Autor da pesquisa.	72
Figura 21 – Mount Airy Library, Carolina do Norte, projeto de Eward Mazria. Fonte: www.mazria.com	74
Figura 22 – Desenho de Mazria para a Mount Airy Library. Fonte: Moore, 1985. ...	76
Figura 23 – Foto do modelo e esquema gráfico do dispositivo zenital orientado para Norte. Fonte: Autor da pesquisa.	77

Figura 24 – Foto do modelo e esquema gráfico do dispositivo zenital orientado para Sul. Fonte: Autor da pesquisa.	77
Figura 25 – Vistas internas do projeto do modelo com os difusores. Fonte: Autor da pesquisa.	77
Figura 26 – Foto aérea do local do ensaio. Fonte: Google Hearth www.aondefica.com	78
Figura 27 – Fotos do local do ensaio. Fonte: Autor da pesquisa.	79
Figura 28 – Fotocélulas LI-COR, modelo LI-210SA. Fonte: LABAUT-FAUUSP.	80
Figura 29 – Níveis para fotocélulas LI-COR. Fonte: Autor da pesquisa.	80
Figura 30 – Datalogger ELE International, modelo MM900 (A) conectado a um microcomputador (B). Fonte: LABAUT-FAUUSP (A) e Autor da pesquisa (B).	80
Figura 31 – Anel para sombreamento da fotocélula externa marca Kipp and Zonen, modelo CM121. Fonte: Foto do autor da pesquisa e desenho do catálogo do fabricante.	81
Figura 32 – Luxímetro digital Homis, modelo 824. Fonte: LABAUT-FAUUSP	81
Figura 33 – Nível de bolha e bússola. Fonte: Autor.	81
Figura 34 – Câmera digital marca Nikon Coolpix 4500. Fonte: www.nikon.com	81
Figura 35 – Lente hemisférica Nikon FC-E8. Fonte: www.nikon.com	81
Figura 36 – Câmera digital Cybershot DSCW7, 7.2 megapixels, marca Sony com lente conversora grande angular VCL-DH 0730 para câmera digital, marca Sony, com 30mm de diâmetro de filtro. Fonte: www.sony.com .	82
Figura 37- Malha dos sensores para a medição dos pontos internos de iluminância. Fonte: Autor da pesquisa.	83
Figura 38 – Principais resultados da 1ª série de medições. Fonte: Autor da pesquisa.	93
Figura 39 – Principais resultados da 2ª série de medições. Fonte: Autor	94
Figura 40 – Principais resultados da 3ª série de medições. Fonte: Autor	95
Figura 41 – Principais resultados da 4ª série de medições. Fonte: Autor	96
Figura 42 – Principais resultados da 5ª série de medições. Fonte: Autor	97
Figura 43 – Brises padronizados pela CONESP. Fonte: CONESP, 1977.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de resumo dos índices de iluminação por ambiente. Fonte: FDE.	44
Tabela 2 – Resumo das médias de iluminância nos pontos para as diversas tipologias. Fonte: Autor da pesquisa.....	86
Tabela 3 – Variáveis de análise qualitativa para as diversas tipologias. Fonte: Autor da pesquisa.	87
Tabela 4 – Cálculo do FLD nos pontos para as diversas tipologias. Fonte: Autor da pesquisa.	88
Tabela 5 – Cálculo do FLD médio para as diversas tipologias de abertura. Fonte: Autor da pesquisa.....	88
Tabela 6 – Cálculo do FLD pra a condição de céu encoberto nos pontos medidos. Fonte: Autor da pesquisa.....	101
Tabela 7 – Projeção dos níveis mínimos de iluminância durante o ano. Fonte: Autor da pesquisa.	102
Tabela 8 – Potencial de conservação de energia com controle de iluminação. Fonte: Autor da pesquisa.....	103
Tabela 9 – Potencial de conservação de energia sem controle de iluminação. Fonte: Autor da pesquisa.....	104
Tabela 10 – 1ª série de medições realizadas pelo datalogger. Fonte: Autor da pesquisa.	105
Tabela 11 – 2ª série de medições realizada pelo datalogger. Fonte: Autor da pesquisa.	105
Tabela 12 – 3ª série de medições realizadas pelo datalogger. Fonte: Autor da pesquisa.	105
Tabela 13 – 4ª série de medições realizadas pelo datalogger. Fonte: Autor da pesquisa.	105
Tabela 14 – 5ª série de medições realizadas pelo datalogger. Fonte: Autor da pesquisa.	105

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Aumento do número de problemas de saúde em função da distância das janelas. Fonte: Çakir e Çakir, 1998.....	18
Gráfico 2– Condições de iluminação nas escolas estaduais de São Paulo. Fonte: Ornstein, Borelli, 1995.	43
Gráfico 3– Problemas de conforto luminoso. Fonte: Ornstein, Borelli, 1995.	43
Gráfico 4– Relação entre iluminância e acuidade visual (A). Relação entre iluminância e desempenho visual (B). Fonte:	49
Gráfico 5– Gráfico de disponibilidade de luz natural do software DLN. Fonte: Scarazzato, 1995.....	87
Gráfico 6– Modelo de sala de aula: janela lateral voltada para o Norte. Fonte: Autor da pesquisa.	91
Gráfico 7– Modelo de sala de aula: janela lateral voltada para o Norte. Fonte: Autor da pesquisa.	92
Gráfico 8– Modelo de sala de aula: janela lateral com brises horizontais para o Norte e difusores para Sul. Fonte: Autor da pesquisa.....	92
Gráfico 9– Modelo de sala de aula: janela lateral com brises verticais para Sul e difusores para Norte: Fonte: Autor da pesquisa.	92
Gráfico 10– Modelo de sala de aula: janela lateral vedada e difusores orientados para Oeste. Fonte: Autor da pesquisa.....	93
Gráfico 12– Simulação no programa Ecotect. Fonte: Autor da pesquisa.	93
Gráfico 13– Valores de disponibilidade de luz natural para o solstício de verão em São Paulo. Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.....	93
Gráfico 14– Valores de disponibilidade de luz natural para o solstício de inverno em São Paulo. Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.....	93
Gráfico 15– Valores de disponibilidade de luz natural para o equinócio de outono em São Paulo. Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.....	93
Gráfico 16– Valores de disponibilidade de luz natural para o equinócio de primavera em São Paulo. Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.....	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Níveis de iluminação para ambientes escolares. Fonte: Resumo extraído da NB – 57.....	29
Quadro 2– Resumo das normas e recomendações para iluminação de salas de aula durante vários períodos na Grã-Bretanha. Fonte: Wei, 2003.	30
Quadro 3 – Relação entre o FLD e o aspecto da iluminação de um espaço interno. Fonte: Tregenza e Loe, 1998.	63
Quadro 4 – Resumo do levantamento das condições de iluminação natural feito pela Escola de Engenharia de São Carlos. Fonte: LIMA, 2002.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABILUX	Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
BRE	British Research Establishment
CHPS	Collaborative for High Performance Schools
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CIE	Commission Internationale d'Éclairage
CONESP	Companhia de Construções Escolares de São Paulo
CSTC	Centre Scientifique et Technique de la Construction
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLN	Disponibilidade de luz natural
DOE	United States Department of Energy
ENCAC	Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
FDE	Fundação para o Desenvolvimento da Educação
FLD	Fator de luz do dia
HPS	High Performance Schools
IEA	International Energy Agency
IES	Illuminating Engineering Society
IESD	Institute of Energy and Sustainable Development
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
LABAUT	Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MEC	Ministério da Educação e Cultura
NBR	Normas Brasileiras
NUTAU	Núcleo de Pesquisa de Arquitetura e Urbanismo
OSPI	Office of Superintendent of Public Instruction - Washington
WSS	Washington Sustainable Schools

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	IV
AGRADECIMENTOS	V
EPÍGRAFE	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE GRÁFICOS.....	XIII
LISTA DE QUADROS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XV
1. INTRODUÇÃO	01
1.1 Colocação do problema.....	01
1.2 Justificativa da pesquisa.....	04
1.3 Objeto de estudo	06
1.4 Objetivos da dissertação	06
1.5 Estrutura da dissertação.....	07
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	09
2.1 OS EFEITOS DA ILUMINAÇÃO NATURAL SOBRE A SAÚDE E O DESEMPENHO HUMANOS	09
2.1.1 O ritmo circadiano	09
2.1.2 O efeito sobre a saúde	12
2.1.3 O efeito da luz como radiação.....	13
2.1.4 O efeito sobre o sistema visual	16
2.2 ILUMINAÇÃO NATURAL E PROJETOS DE ESCOLAS	19
2.2.1 Breve histórico do estudo da iluminação natural em escolas.....	19
2.2.2 As recomendações de luz natural para escolas: principais referências	27
2.2.2.1 As recomendações da IESNA.....	28
2.2.2.2 As recomendações do Departamento de Energia dos Estados Unidos	32
2.2.2.3 CHPS e o protocolo de Washington	36

2.2.2.4 As recomendações do MEC.....	39
2.2.2.5 As recomendações da FDE.....	40
2.3 A QUALIDADE DA ILUMINAÇÃO NATURAL – PRINCIPAIS CONCEITOS.....	46
2.3.1 Iluminância	47
2.3.2 Luminância.....	49
2.3.3 Uniformidade e diversidade.....	50
2.3.4 Contraste.....	51
2.3.5 Ofuscamento	53
2.3.5.1 Índices de ofuscamento.....	54
2.3.6 O fator de luz do dia	59
2.3.6.1 O fator de luz do dia médio	60
2.3.6.2 Relação entre FLD e refletância.....	63
3. METODOLOGIA.....	64
3.1 Definição do ensaio.....	64
3.2 Definição do modelo.....	65
3.2.1 Critério de seleção	68
4. ENSAIO E LEVANTAMENTO DE DADOS.....	69
4.1 Descrição do modelo.....	69
4.1.1 Definição dos protetores solares	70
4.1.2 Definição do elemento zenital com seleção angular	73
4.1.2.1 Dimensionamento dos difusores	74
4.1.2.2 Desenho dos difusores.....	76
4.2 Descrição do ensaio.....	78
4.2.1 Descrição dos equipamentos	79
4.2.2 Metodologia das medições.....	82
4.3 Descrição dos dados e resultados obtidos.....	84
4.3.1 Iluminância	84
4.3.1.1 Normalização dos dados	84
4.3.2 Comparação dos resultados obtidos	86
4.3.2.1 Gráficos de gradientes de iluminância.....	89
4.3.2.2 Diagramas de curvas isolux	92
4.3.2.3 Penetração solar	99

4.4 Estimativa do potencial de conservação de energia	100
5. CONCLUSÕES	105
5.1 Considerações finais	106
5.2 Limitações encontradas.....	106
5.3 Perspectivas para futuras pesquisas.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	114
SITES DE INTERESSE RELACIONADOS AO ASSUNTO.....	117
GLOSSÁRIO	124
APÊNDICES	
APÊNDICE A – Alguns exemplos das HPS americanas	127
APÊNDICE B – Séries de medições realizadas pelo datalogger	134
ANEXOS	
ANEXO A – Brises padronizados pela CONESP	138
ANEXO B – Resumo do levantamento feito pela Escola de Engenharia de São Carlos	140
ANEXO C – Disponibilidade de luz natural para São Paulo	142

1. INTRODUÇÃO

1.1 Colocação do Problema

A luz é parte integrante do processo de aprendizado escolar. A luz é essencial para o mecanismo da visão e sem ela não conseguimos ver. É fundamental também para todos os processos que tornam possível ao cérebro relacionar-se com o meio ambiente. Nas últimas décadas, a ênfase no desempenho de atividades de trabalho tem se deslocado da força física para o sistema visual e para as funções moto-sensoras. O sistema visual transformou-se, assim, na principal ferramenta de trabalho para milhões de pessoas, que recebem boa parte das informações por meio da visão. Da mesma forma, entre os muitos fatores que influenciam os processos de aprendizagem, aqueles relacionados com as condições ambientais têm um papel importante. Boas condições de iluminação, portanto, favorecem o desempenho visual, otimizando o processo de aprendizado.

Para Rennhackkamp (1964), “uma vez que a função primordial de um edifício escolar é estimular o processo educacional no seu sentido mais amplo, todos os esforços deveriam ser feitos para fornecer aos estudantes um ambiente educacional adequado e estimulante. Neste sentido, a importância de uma boa iluminação para o desenvolvimento da criança, preservando sua visão, não deve ser subestimado”. Em linhas gerais, o sistema visual terá um desempenho mais rápido e mais apurado quanto maior for o campo visual, maior o contraste de luminâncias, melhor a diferenciação de cores, produzindo uma melhor imagem na retina e quanto maior for a iluminação na retina, mais rápido e mais refinado será o desempenho do sistema visual. “A luz não só ajuda a criança a ver e a reconhecer objetos, como também prepara seu corpo e sua mente para responder à ação, adaptando-se a qualquer tarefa que for solicitada a executar. Quanto melhores as condições de iluminação, mais fácil e mais rápida a tarefa será realizada e menor será o esforço para os olhos” (RENNHACKKAMP, 1964, p.1).

A qualidade da luz é também importante para os olhos das crianças. Os olhos coletam e convertem, através dos nervos óticos, a luz visível em impulsos elétricos direcionados ao cérebro. Estudos de laboratório sugerem que fontes de luz com espectros¹ mais amplos fornecem mais luz utilizável pelos olhos. A luz natural fornece o mais rico espectro de luz, atenuando o esforço implícito nas tarefas visuais. A luz natural, pela ampla composição e abrangência de seu espectro, é mais favorável à identificação de contrastes e diferenciação de cores e à percepção de formas tridimensionais do que a iluminação artificial (EDWARDS, TORCELLINI, 2002). No longo prazo, más condições de iluminação para longos períodos de atividades visuais, principalmente leitura, pode levar à fadiga visual e a problemas de visão.

Pesquisas atuais, como as conduzidas por Figueiro (2002) e Rea (2002) do Lighting Research Center², têm-se concentrado também sobre os efeitos biológicos da luz sobre a saúde geral e o desempenho das pessoas. A Organização Mundial da Saúde define saúde como um estado de completo bem estar físico, mental e social e não somente a ausência de enfermidades e doenças. Para os limites deste texto, se tentará evidenciar a influência da luz nos aspectos de bem estar físico e mental. A luz natural tem sido associada a atitudes e a estados de espírito positivos, redução de faltas ao trabalho e na escola, aumento do desempenho de estudantes, maior produtividade, diminuição de cansaço e fadiga visual, diminuição de erros e defeitos na produção. Por outro lado, a ausência de luz natural por longos períodos de tempo tem sido apontada como um catalisador de doenças como raquitismo e osteomalacia³ e a alguns tipos de depressão (EDWARDS, TORCELLINI, 2002).

¹ Função que caracteriza a distribuição de energia numa onda, ou num feixe de partículas, e que exprime essa distribuição em termos de variáveis apropriadas (comprimentos de ondas, frequências, etc.).

² Lighting Research Center do Rensselaer Polytechnic Institute do estado de Nova York, USA.

³ Doença dos ossos caracterizada por deficiência de calcificação da matriz óssea, e que determina o amolecimento do esqueleto, facilitando a ocorrência de deformidade e de fratura.

Outro aspecto a ser considerado é que a presença de luz natural quase sempre está associada a uma ligação visual dos ambientes internos com o exterior. A variação da luz natural nas diferentes horas do dia, condições climáticas e estações do ano é importante para marcar os ritmos biológicos e psicológicos das pessoas (ROBBINS, 1986). Como a luz natural é importante para a saúde, pode influenciar a capacidade e a disposição em aprender. Em um estudo apresentado por Plympton (2000) para o National Renewable Energy⁴, foi divulgado o resultado de uma pesquisa feita por Heschong Mahone (1999), com um universo de vinte e um mil estudantes de vários estados norte-americanos, que demonstrou que os estudantes que freqüentavam escolas com iluminação natural adequada progrediram 20% mais em Matemática e obtiveram 26% melhores resultados em testes de leitura do que estudantes de outras escolas.

A utilização de iluminação natural como fonte principal de luz em edifícios escolares também tem um potencial enorme de conservação de energia. Edifícios escolares têm tipicamente seu principal consumo de energia representado pela iluminação artificial. Romero (1994) verificou que o sistema de iluminação da Universidade de São Paulo, por exemplo, era responsável por 65,5% do consumo de eletricidade total do campus. Em sua dissertação de mestrado, Ghisi (1997) avaliou as condições de iluminação natural em salas de aula do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina com o intuito de determinar o potencial de conservação de energia elétrica. Sua conclusão foi que os 9 % de economia possíveis de serem gerados com a redução da utilização da iluminação artificial obedecendo aos níveis mínimos estipulados em norma representavam uma economia de 0,9 GWh/ano, equivalentes a R\$ 86.650,00 ao ano. A correta utilização da iluminação natural poderia prover níveis de iluminação satisfatórios para o desenvolvimento das tarefas visuais com o mínimo de desperdício de energia. Nos Estados Unidos, onde os gastos com energia em escolas incluem despesas com ar condicionado e calefação, NICKLAS e BAILEY (2002) compararam três novas escolas construídas no estado da Carolina do Norte, projetadas para

⁴ Laboratório Nacional de Energia Renovável do Departamento de Energia do governo americano.

permitir o uso sustentável da iluminação natural, com as já existentes no estado. Eles concluíram que o potencial de redução dos gastos com energia foi de 22% a 64% nas novas unidades.

Nas escolas brasileiras, segundo a ABILUX⁵ (1995), a iluminação artificial pode ser responsável por até 90% do consumo de eletricidade. Com a otimização dos projetos de edifícios escolares para o aproveitamento do potencial de iluminação natural disponível no país, é possível reduzir o uso de energia elétrica para a geração de iluminação artificial. Quando se leva em conta que a rede de ensino do estado de São Paulo é formada por cerca de 7000 escolas, pode-se ter uma idéia da significativa economia que a correta utilização dos recursos naturais de iluminação poderia proporcionar.

1.2 Justificativa da pesquisa

Dados preliminares do censo escolar de 2005, realizado pelo INEP⁶ revelam que existem cerca de 56,5 milhões de alunos matriculados, 85% destes em escolas da rede pública de ensino. Desse total, quase cinco milhões são representados pelos alunos que todo ano se matriculam nas escolas públicas estaduais do estado de São Paulo. O edifício escolar é o meio físico construído que viabiliza a toda essa parcela da população o acesso à educação fundamental.

As janelas das escolas do Estado de São Paulo normalmente não possuem controles adequados da radiação solar direta, ou então utilizam protetores mal dimensionados como persianas, cortinas e cobogós,⁷ extremamente obstrutivos. Mesmo quando existe a utilização de protetores solares, como o “brise soleil”⁸, estes são projetados tendo em vista somente a obstrução da penetração dos raios solares e reduzem drasticamente a luz natural, fazendo com que a

⁵ Associação Brasileira da Indústria de Iluminação.

⁶ Instituto Nacional de Estudo e Pesquisas Educacionais do Ministério de Educação e Cultura.

⁷ Elemento vazado, de cerâmica ou de cimento, empregado na construção de paredes perfuradas, para proporcionar a entrada de luz natural e ventilação.

⁸ Conjunto de chapas que se põe nas fachadas expostas ao sol para evitar o aquecimento excessivo.

iluminação elétrica permaneça acesa durante a maior parte do dia. No intuito de otimizar o aproveitamento da luz natural, essa pesquisa propõe um sistema de iluminação zenital compatível com as tipologias de projeto da FDE⁹. Desta forma, o sistema proposto pode ser aplicado tanto em edifícios existentes como em novos projetos. O sistema zenital é composto por dispositivos com seleção angular, difusores opacos que promovem um adequado controle da radiação solar para evitar a incidência direta da luz do Sol, evitando o ofuscamento e aquecimento dos ambientes de salas de aula em climas quentes, ao mesmo tempo que permite aproveitar a iluminação natural, tanto difusa quanto direta refletida, proporcionando maior conforto visual, térmico e economia de energia.

Como esse universo de escolas se constitui em uma diversidade muito grande de concepções arquitetônicas, programas e padrões construtivos, uma abordagem estatística convencional não ajudaria a aprofundar a análise da iluminação natural. Optou-se então em delimitar como objeto de estudo as salas de aula de padrão modular da FDE porque representam uma tendência atual para construções escolares onde a maior parte dos elementos construtivos já está pré-determinada, sobressaindo a importância da definição das janelas nos vedos para iluminação natural e dos dispositivos de sombreamento.

As informações acerca dos projetos e construções escolares da rede pública de ensino do Estado de São Paulo estão concentradas em um banco de dados no arquivo técnico da FDE. Além disso, os ambientes que formam as unidades escolares são todos sistematizados em programas, dimensões e requisitos técnicos e ambientais, se constituindo em padrões repetidos por todo o estado (FDE, 2003). Essa uniformização permite a avaliação dos ambientes pelos processos analíticos e computacionais e a sua comparação, possibilitando a generalização dos resultados.

⁹ Fundação para o Desenvolvimento da Educação, órgão da Secretaria de Educação do Estado de São Paulo.

1.3 Objeto de Estudo

O objeto de estudo da pesquisa é analisar as estratégias de iluminação natural utilizadas nos estágios iniciais do projeto de arquitetura capazes de promover qualidade de iluminação e conservação de energia nos projetos de edifícios escolares.

1.4 Objetivos da dissertação

1.4.1 Objetivo geral

Determinar a influência das decisões tomadas nos estágios iniciais do projeto arquitetônico na iluminação natural, na qualidade dessa iluminação nos diversos ambientes, na forma da sua arquitetura e na conservação de energia do edifício escolar.

1.4.2 Objetivos específicos

Com a análise da iluminação natural em ambientes nas escolas da rede pública de ensino do Estado de São Paulo, no universo delimitado pela pesquisa, pretende-se delinear orientações acerca da implantação, aberturas e dispositivos de sombreamento, de forma a fornecer informações para a otimização de projetos para edifícios escolares do ponto de vista da qualidade da iluminação natural e da conservação de energia.

A intenção é fornecer elementos de análise para a tomada de decisões acerca da iluminação natural nos estágios iniciais do projeto arquitetônico, decisões estas que influenciam as fases seguintes de projeto e a definição final do edifício. Não estão incluídas as análises das outras fases de projeto, que envolvem tecnologia de equipamentos, seu dimensionamento e especificações.

Nesta dissertação parte-se da hipótese, referenciada no embasamento teórico e na bibliografia apresentada, de que a utilização da

iluminação natural pode proporcionar ambientes mais saudáveis e agradáveis, que contribuem para a saúde, o bem-estar dos ocupantes do edifício e para o bom desempenho das finalidades educacionais. Portanto, não se tentará demonstrar esta hipótese, o que só seria possível com o aprofundamento de um estudo acerca da psicologia e da fisiologia humanas – conhecimentos fora do escopo central da área desta pesquisa.

Embora seja de extrema relevância para o projeto de arquitetura, a questão da luz natural como geradora de significados simbólicos e estéticos nos edifícios não será abordada no presente trabalho porque o embasamento teórico e a metodologia para estudos de casos se diferenciam dos adotados para esta pesquisa.

1.5 Estrutura da dissertação

Após uma introdução no primeiro capítulo, no qual foi exposta a atualidade da discussão sobre iluminação natural e sua importância como parâmetro a ser levado em consideração na concepção de projetos arquitetônicos, é apresentada a colocação do problema da iluminação natural para o projeto de edifícios escolares, delimitando-se o objeto e o objetivo desta dissertação.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos principais textos acerca da iluminação natural em edifícios escolares, estabelecendo o nível atual da pesquisa neste campo, base da fundamentação teórica para o desenvolvimento desta pesquisa. São apresentados também os conceitos e definições principais relacionados à iluminação natural que serão utilizados no decorrer da dissertação, com o intuito de delimitar o universo conceitual em que se pretende trabalhar.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada para a realização da parte experimental da pesquisa.

O quarto capítulo descreve o ensaio experimental realizado para demonstrar uma das estratégias possíveis da utilização da iluminação natural em edifícios escolares na obtenção de qualidade da iluminação e conservação de energia. São descritas as medições de iluminação realizadas em modelo em escala reduzida de sala de aula padrão e as modelagens feitas com programas computacionais para a verificação do comportamento de diversas aberturas e elementos de sombreamento na iluminação natural dos ambientes estudados.

No quinto capítulo são apresentadas conclusões com base em uma comparação entre os dados obtidos na pesquisa, comentando-se possibilidades e perspectivas para futuras pesquisas.

Após a referência bibliográfica, o trabalho se encerra com a apresentação dos anexos e apêndices onde estão documentados os dados das medições realizadas, gráficos com resultados comparativos, fotografias para avaliação visual e ilustrações que auxiliam a compreensão do que está descrito no texto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os efeitos da iluminação natural sobre a saúde e o desempenho humanos

“Design” é a ciência e a arte de fazer coisas úteis à humanidade e o “lighting design” é a aplicação da iluminação – incluindo a iluminação natural, quando é especificamente usada como fonte de luz – para espaços humanos. Assim como a arquitetura, a engenharia e outras profissões de “design”, a iluminação está baseada na combinação de princípios científicos específicos, normas e convenções e um certo número de fatores estéticos, culturais e humanos aplicados de maneira artística (BENYA et al., 2003). Existem três grandes áreas em que a iluminação interage com os seres humanos, afetando o seu desempenho: visibilidade, saúde e estado de espírito. Nesta primeira parte da revisão bibliográfica são descritas as principais pesquisas que vêm sendo feitas sobre a importância dos efeitos da iluminação natural na saúde e no desempenho humanos. Apesar de essa não ser uma área específica de estudos da arquitetura, considerou-se importante a sua inclusão como referência para entender as recentes pesquisas que estão sendo feitas sobre iluminação natural em escolas, descritas no item seguinte.

2.1.1 O ritmo circadiano

Estudos mostraram que todos os organismos vivos, vegetais e animais, inclusive os seres humanos, obedecem a um ciclo de vinte e quatro horas chamado de ciclo circadiano¹⁰, durante o qual as funções vitais alternam entre um ritmo decrescente durante a noite e crescente durante o dia (GAETANO et al., 2002,

¹⁰ Do latim circa – cerca de, e die – dia. Relógio biológico.

p.13). Trata-se de uma espécie de “sistema operacional” que atua para representar fisiologicamente as condições de dia e de noite e informar ao corpo quais funções adotar durante cada período. De acordo com BOYCE (1998, p.2), essas funções vitais podem ser medidas por variáveis fisiológicas como a temperatura corporal interna, os níveis de melatonina¹¹, a atividade do córtex cerebral e o estado de atenção. O sistema circadiano humano envolve três componentes básicos: um interno (endógeno) localizado no núcleo supraciasmático no hipotálamo¹² do cérebro, um externo (exógeno) que recebe as informações do meio ambiente através da retina, cujo veículo é a luz, e a melatonina, um hormônio mensageiro que transmite a informação do “tempo interno” para todas as partes do corpo através da corrente sanguínea (BOYCE et al, 2003, p. 19).

Segundo BOYCE (1998, p.1), a exposição à luz é o mais poderoso estímulo para a sincronização do ritmo dia-noite em vinte e quatro horas. Quando o estímulo luminoso recebido através da retina é transformado em estímulo nervoso e atinge o núcleo supraciasmático, este ativa a glândula pineal¹³ que produz o hormônio melatonina. A secreção da melatonina pela glândula pineal induz ao sono, modifica o humor e a agilidade mental e interfere no sistema reprodutivo. É seguida pela secreção do cortisol ou hidrocortisona¹⁴, também conhecido como o hormônio do stress, que afeta a quebra das moléculas de carboidratos, proteínas e gordura, o desenvolvimento de células brancas no sangue, a atividade do sistema nervoso e a pressão arterial (BRYAN apud EDWARDS, TORCELLINI, 2002, p.6). Esse hormônio é responsável pelo estado de alerta e atenção, pelo stress, aumenta a produção de adrenalina e hidrocortisona que, por sua vez, produzem enzimas capazes de destruir o aminoácido triptofano¹⁵, inibindo a produção da melatonina e

¹¹ Hormônio produzido pela glândula pineal cuja secreção aumenta por exposição à luz.

¹² Porção do diencefalo, que forma o soalho e parte das paredes laterais do terceiro ventrículo, exercendo os núcleos hipotalâmicos controle sobre atividades das mais importantes do organismo, tais como sono, metabolismo da água, temperatura corporal, etc.

¹³ Glândula endócrina em forma de pinha.

¹⁴ Hormônio esteróide de córtex supra-renal.

¹⁵ Aminoácido essencial ao organismo, cristalino, que se pode considerar um derivado do indol.

da serotonina¹⁶. A luz, portanto, tem influência na regulação da química do corpo e o estado de ânimo de uma pessoa:

[...] Melatonina é normalmente secretada pela glândula pituitária na ausência de luz e onde a iluminação natural e artificial no interior dos edifícios é inadequada, a natural supressão da produção da melatonina durante o dia é falha e é acompanhada por sentimentos de depressão (WURTMAN, 1975; LIBERMAN 1985; LEVY 1985 apud EDWARDS, TORCELLINI, 2002).

Entendido que a luz que atinge a retina é a grande responsável pelo bom funcionamento do relógio biológico, a questão seguinte é saber quanto de luz é necessário. Conforme FIGUEIRO et al. (2002), os níveis de iluminação para inibir a produção da melatonina são maiores do que os normalmente definidos para tarefas visuais em iluminação de interiores. A iluminação para tarefas visuais geralmente é fixada pelas normas em torno de 300 a 500 lux¹⁷ no plano de trabalho. Mas o sistema circadiano só é levemente atingido por esses níveis. Por isso é preciso janelas que forneçam luz suficiente para ajustar o sistema circadiano de pessoas no interior dos edifícios.

Figura 1 – O mecanismo da luz influencia a liberação da melatonina no organismo (A) que regula o ciclo dia e noite de funcionamento do corpo (B). Fontes: www.universe-review.ca (A) e www.hhmi.org (B)

¹⁶ Substância cristalina, derivada da triptamina, encontrada em pequena quantidade no cérebro, que é um neurotransmissor e tem ação vasoconstritora.

¹⁷ Unidade de iluminância no Sistema internacional de Medidas.

2.1.2 O efeito sobre a saúde

A luz influencia a saúde e o estado de ânimo das pessoas. Conhecida desde o ano 400 A.C. e definitivamente equacionada no ano 2000, a SAD – seasonal affective disorder – uma forma particular de depressão, é uma das mais pesquisadas áreas de doenças influenciadas pela luz. De ocorrência mais freqüente nos países do hemisfério norte, está relacionada com a quantidade de luz disponível para o indivíduo e com a disponibilidade de luz natural externa no inverno. Também conhecida como “depressão de inverno”, pois durante essa época do ano, com noites mais longas e dias mais curtos, a ausência de luz provoca nos indivíduos um aumento nos sentimentos de depressão, melancolia e redução de interesse na maioria das atividades cotidianas, como também sintomas atípicos como aumento da necessidade de sono, aumento da irritabilidade, aumento de apetite, principalmente por carboidratos e conseqüente aumento de peso (TERMAN et al., apud EDWARDS, TORCELLINI, 2002, p. 8). As causas para a SAD ainda não foram devidamente comprovadas. Algumas explicações baseiam-se em distúrbios do sistema circadiano, concentração de melatonina e regulação do hormônio serotonina. Mas, como afirmam BOYCE et al. (2003, p.48), embora com os seus mecanismos ainda não inteiramente desvendados, a SAD é uma forma de depressão sazonal que pode ter seus sintomas aliviados com a exposição à luz intensa.

Outra forma de influência da luz sobre a saúde pode ser vista no ciclo do sono, durante o qual o corpo se recupera durante a noite para estar disposto e ativo durante o dia. Durante o sono uma verdadeira operação de restabelecimento do corpo entra em ação com a diminuição da produção de hidro cortisona e adrenalina, com o objetivo de restaurar as moléculas de DNA danificadas. Recentemente foi descoberta uma enzima chamada proteasoma que é ativada pela presença da luz e inibe a produção de melatonina e seu efeito regenerador, causando a sensação de uma noite mal dormida (BOYCE et al. 2003, P. 47-48). Estudos têm demonstrado que a exposição à luz intensa durante o dia pode ajudar a regular o ciclo do sono. Aparentemente, uma exposição de cerca de

10.000 lux imediatamente após o despertar ajuda aos que têm dificuldade para acordar e uma exposição à luz intensa de cerca de 4.000 lux no final da tarde pode ajudar aos que têm a fase de dormir adiantada e, inclusive, melhorar a qualidade do seu sono (CZEISLER et al., CAMPBELL et al., DAWSON, FOLEY et al., LACK E SCHUMAKER, apud EDWARDS, TORCELLINI, 2002). Estes estudos indicam que a luz natural, utilizada em horários e quantidades apropriadas, pode auxiliar no tratamento de distúrbios do sono porque fornece os altos níveis de iluminância necessários para manter o sistema circadiano em operação.

2.1.3 O efeito da luz como radiação

Independente de seu efeito de estimular a visão e o sistema circadiano, a luz também afeta o ser humano como radiação eletromagnética. O espectro solar é composto de ondas eletromagnéticas de comprimento de onda variáveis de acordo com cada tipo de radiação (Figura 2). Entre elas a radiação na faixa do ultravioleta é capaz de quebrar as ligações químicas de tecidos biológicos. Segundo BOYCE et al. (2003, p. 38-39), prolongadas exposições a grandes quantidades de radiação ultravioleta de ondas curtas podem causar danos aos olhos e doenças como cataratas. Uma exposição contínua no decorrer dos anos pode causar o envelhecimento precoce da pele e ser causa de câncer de pele. Por outro lado, a exposição contínua a pequenas quantidades de radiação ultravioleta acarreta a migração de pigmentos à superfície da pele e um novo pigmento mais escuro aparece, endurecendo a camada mais externa, levando ao decréscimo da sensibilidade da pele à radiação ultravioleta nos comprimentos de onda abaixo dos 290 nanômetros¹⁸ (FAAR, DIFFEY, 1985, apud BOYCE et al., 2003, p.39).

Nos espaços interiores dos edifícios, os malefícios da radiação solar direta podem ser evitados para a maioria das pessoas, pois as radiações ultravioletas de comprimento de onda curto e comprimento de onda longa são eliminadas através dos vidros convencionais. Além dos níveis internos de radiação

Figura 2. Espectro eletromagnético da radiação solar. Fonte: www.squ1.com.

solar representarem apenas de 0,5 a 5% dos níveis externos, um vidro de 6 mm equivale a um FPS¹⁹ - fator de proteção solar 30 (National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd., 2001, apud Daylight Dividends: www.lrc.rpi.edu) e vidros especiais coloridos ou com películas representam um fator de proteção ainda maior. Como consequência, os níveis de radiação ultravioleta no interior dos edifícios são reduzidos a 0,01 a 0,2% dos níveis externos, equivalentes ao uso de protetores solares com fator de proteção solar entre 500 e 10.000.

Entretanto, a exposição moderada à radiação ultravioleta de comprimento de onda curto é benéfica e necessária à saúde porque a luz que incide sobre a pele produz efeitos como a produção de vitamina D, a coloração da pele e a dissociação da bilirrubina²⁰. Podem ocorrer desordens fisiológicas se a pele não for exposta à radiação solar, direta ou indireta, por longos períodos de tempo (DANZIG, LAZAREV, SOKOLOV, apud EDWARDS, TORCELLINI, 2002, p. 5). Desde a virada do século XIX para o XX, de 1890 a 1919, a luz do sol foi determinada como a chave para evitar o raquitismo. Segundo NEER e HOLLICK (apud EDWARDS, TORCELLINI, 2002, p. 7), a radiação ultravioleta na faixa de 290 a 315 nanômetros ao atingir a pele induz o desenvolvimento de vitamina D, que pode prevenir ou ajudar na cura do raquitismo. Este mecanismo foi descrito por LIBERMAN:

¹⁸ Submúltiplo do metro: 1 nm = 10⁻⁹ m.

¹⁹ FPS - fator de proteção solar: é o índice que determina quanto tempo uma pessoa pode ficar exposta ao sol sem produzir eritema; número que indica o nível de proteção que um dado produto oferece contra os raios UV,

²⁰ Pigmento vermelho, presente na biliar, cuja estrutura contém quatro anéis pirrólicos, sem que estes, porém, formem um macrociclo.

Uma das mais importantes descobertas fototerápicas de 1890 foi que o raquitismo, uma doença caracterizada pela deformação no desenvolvimento dos ossos em crianças pequenas, poderia ser curado pela luz do sol. Embora a razão dessa eficiência da luz do sol não fosse imediatamente entendida, descobriu-se posteriormente que a luz do sol atingindo a pele iniciava uma série de reações no corpo, levando à produção de vitamina D, um elemento necessário para a absorção de cálcio e outros minerais providos da alimentação. Na ausência de vitamina D o corpo não absorve o cálcio necessário para o crescimento e normal desenvolvimento dos ossos. Essa deficiência conduz à condição chamada de raquitismo nas crianças e osteomalacia nos adultos a qual é caracterizada por um esqueleto fraco, poroso e mal-formado. É sabido que tanto o desenvolvimento quanto a manutenção de ossos saudáveis depende da habilidade do corpo em absorver cálcio e fósforo (apud EDWARDS, TORCELLINI, 2002, p.8) (tradução nossa).

A radiação ultravioleta em níveis moderados tem também uma função germicida sobre a pele. Segundo CICARDO (apud BITTENCOURT, 2004, p. 13), as pesquisas de FINER demonstraram que ‘os raios ultravioletas eram mais eficazes para destruir bactérias do que a luz visível’, sendo que ‘os raios de mais de 3.000 Å²¹ são relativamente ineficazes, aumentando progressivamente a ação bactericida até 2.600 Å, onde alcança um máximo e depois decresce outra vez aos 2.300 Å’. Este “efeito curativo dos raios ultravioleta sobre as feridas é atribuído à ação germicida e a uma ação direta sobre os tecidos. As células impregnadas pela radiação liberariam substâncias que estimulariam o crescimento, a respiração e glicólise de outras células” (BITTENCOURT, 2004, p.13). A luz artificial que tem o espectro próximo ao da luz natural também pode estimular os processos metabólicos, mas como afirma WIENKE (2005, p. 181), “a quantidade de radiação ultravioleta emitida por uma fonte artificial é tão pequena que oito horas de exposição a 1100 lux equivale a cerca de três minutos transcorridos a céu aberto num dia de sol” (Tradução nossa).

Segundo EGAN e OLGAY (2002, p. 44), bactérias, fungos e vírus são afetados pela radiação entre 180 e 700 nm, sendo mais efetivo entre 220 e 300

²¹ Angström – unidade de medida de comprimento de onda equivalente a 10⁻¹⁰ m.

nm que representam as ondas ultravioletas. Ainda segundo os autores, ciente destes efeitos, Alvar Aalto projetou o sanatório de Paimio, na Finlândia (Figura 2), de forma a que fosse naturalmente saneado com uma combinação da orientação do edifício e pátios voltados para o Sul ²² onde os pacientes pudessem usufruir os benefícios dos raios solares.

Figura 3. Paimio Sanatorium, Finlândia, projeto do arquiteto Alvar Aalto. Fonte: www.landliving.com

2.1.4 O efeito sobre o sistema visual

A luz é essencial para o processo de visão e fundamental para todos os processos de relacionamento dos mecanismos cerebrais com o meio ambiente. Em linhas gerais, o sistema visual terá um desempenho mais apurado quanto maior for o campo visual, maior o contraste de luminâncias²³, maior a diferenciação de cores, produzindo uma melhor imagem na retina e quanto maior for a iluminação na retina, mais rápido e mais refinado será o desempenho do sistema visual. Condições precárias de iluminação em tarefas que requerem alto nível de desempenho visual são percebidas como desconfortáveis, assim como fontes de luz que levem à distração da tarefa, como por exemplo, ofuscamento ou pulsação intermitente.

O principal efeito das más condições de iluminação sobre a saúde do sistema visual é a fadiga visual. Os sintomas mais comuns são olhos congestionados, visão embaçada, lacrimejar constante, dificuldade de visão e dor de cabeça. Esses sintomas são temporários, mas se repetidos constantemente trazem perturbações à saúde e ao desempenho das pessoas. Esses sintomas podem ser causados por níveis inadequados de iluminação, tanto naturais como artificiais, pelas condições das tarefas a serem executadas e seu entorno ambiental e por problemas no sistema visual do indivíduo. Condições ou tarefas que requerem o olhar fixo por longos períodos podem afetar o sistema muscular que controla a fixação, a acomodação, a convergência e o tamanho da abertura da pupila.

Conforme relatam ÇAKIR e ÇAKIR (1998), durante quinze anos o Ergonomic Institute de Berlim desenvolveu uma pesquisa com o objetivo de identificar a concepção mais favorável de iluminação para ambientes de trabalho em escritórios, levando em consideração também o design do espaço como um todo, pois seus autores acreditavam que um bom projeto de iluminação não poderia desconsiderar esse item. Os pesquisadores identificaram quais itens ambientais poderiam causar incômodos aos indivíduos e representar algum grau de estresse e os compararam aos que poderiam ser causados pelo sistema de iluminação. A intenção inicial dos autores foi verificar as condições de iluminação artificial de ambientes de trabalho, mas no decorrer dos trabalhos ficou evidente a importância e a influência da iluminação natural, que quando mal projetada pode também ser uma fonte de incômodo para as pessoas. Outra demonstração dos dados da pesquisa é a influência do tamanho do ambiente, principalmente de sua profundidade, no desconforto causado aos indivíduos: quanto maior e mais profundo o ambiente, maior é a tendência a existir um grande número de postos de trabalho afastados das janelas e maiores são os danos causados à saúde dos indivíduos, conforme mostram os dados do Gráfico 1.

²² Para o hemisfério Norte (N.A).

²³ Brilho.

Gráfico 1: Aumento dos problemas de saúde em relação à distância das janelas na pesquisa do Ergonomic Institute de Berlim. Fonte: adaptado de Çakir e Çakir, 1998.

2.2 Iluminação natural e projeto de escolas

2.2.1 Breve histórico do estudo da iluminação natural em escolas

O estudo da iluminação natural sempre foi uma preocupação em projetos de edifícios escolares. Em um livro publicado em 1874 sobre arquitetura escolar, Robson (apud WEI, 2003, p. 112) já enfatizava que os projetos de escolas deveriam levar em consideração a saúde, o conforto e o aprendizado das crianças. Robson acreditava que a iluminação natural nas salas de aula era um fator importante para se atingir esses objetivos, chegando a delinear instruções práticas acerca da orientação e aberturas de forma a aproveitar melhor a luz do sol na orientação Norte e evitar o ofuscamento nas orientações Sul e Oeste (para o hemisfério Norte), recomendando a área total de janelas em 20% em relação à área do piso. Suas recomendações foram adotadas no Reino Unido e no mundo ocidental até o final do século XIX.

A substituição do sol pela iluminação artificial no ambiente construído não se deu imediatamente após a invenção da lâmpada elétrica incandescente de Edson. O marco foi a invenção da lâmpada fluorescente, antes da Segunda Guerra Mundial. A iluminação artificial passou então a ser aplicada em larga escala a partir de 1955, com o barateamento do processo de produção das lâmpadas fluorescentes. Sua invenção forneceu níveis de iluminância suficientes - e a um custo acessível - para que as atividades humanas dentro dos edifícios pudessem se desenvolver independentemente da luz natural. O trabalho pôde então se estender além do ciclo dia / noite. Também se tornou possível projetar e construir vastos locais de trabalho até então inexistentes, como grandes depósitos de mercadorias e linhas de produção industrial, que prescindem de uma ligação direta com o ambiente externo por janelas.

Até os anos 30 prevaleceram as idéias do movimento chamado “open-air school”, que preconizava edifícios escolares com portas e janelas que

fossem totalmente abertas para uma área ao ar livre, em oposição aos escuros edifícios da Revolução Industrial. Essa forma evoluiu para implantações mais abertas, com varandas e iluminação bilateral, de forma a obter iluminação natural, ventilação cruzada e penetração dos raios de sol durante uma parte do dia (WEI, 2003, p. 112). Em 1913 Waldram (apud WEI, 2003, p. 113), em um artigo onde faz um balanço desse movimento, aborda questões fundamentais sobre o projeto de salas de aula iluminadas naturalmente, como a viabilidade de um método prático para medir e prever a luz natural, o nível mínimo de luz natural necessário para fins didáticos e a discussão sobre a recomendação de refletâncias²⁴ mínimas para paredes e teto. Com base nas observações de Waldram, a IES²⁵ do Reino Unido reconheceu que “paredes e tetos com alta refletância poderiam incrementar a iluminação natural e zenital, que são ótimas fontes de iluminação para a leitura e a escrita em salas de aula” (WEI, 2003, p. 113). Como princípio geral adotou-se que a área das janelas deveria representar um quinto da área do piso.

A influência das idéias do movimento “open-air school” sobre a importância do ar e da luz nos prédios escolares durou até o período posterior à Segunda Guerra Mundial. Nessa época regulamentou-se que a iluminação natural deveria ser a principal fonte de luz em escolas com um fator de luz diurna²⁶ de mínimo de 2%, sendo recomendável 5% onde fosse possível. Estas determinações fizeram com que janelas fossem construídas na maior dimensão possível na maioria das escolas, causando problemas de ofuscamento, desconforto e aquecimento excessivo no verão. Como forma de contornar esses efeitos, a partir de 1954, adotou-se a iluminação artificial. Posteriormente, mudanças nas concepções didáticas levaram a que as escolas não tivessem necessariamente o tradicional arranjo de sala de aula e edifícios mais compactos e com janelas menores passaram a ser projetados (WEI, 2003, p.114). Essa tendência aprofundou-se a

²⁴ Relação entre o fluxo luminoso refletido por uma superfície e aquele que incide sobre ela (MOORE, 1985).

²⁵ Illuminating Engineering Society.

²⁶ FLD: relação entre a iluminação diurna total em um ponto no interior do local excluída a luz solar direta e a iluminação exterior simultânea sobre um plano horizontal iluminado pelo total da abóbada celeste de um céu encoberto normal (MOORE, 1985).

partir da década de 60 nos Estados Unidos com base na afirmação de que janelas menores reduziram o ofuscamento, a distração dos estudantes e o vandalismo (FOX, 2001, p.16). Defensores de escolas sem janelas propunham um “ambiente controlado” com ventilação mecânica e iluminação elétrica como forma de eficiência energética e redução de custos (ROBINS, 1986, p. 9).

Conforme Heschong Mahone Group (1999) as salas de aula construídas na Califórnia na década de 50 e no começo da década de 60, antes da prevalência da lâmpada elétrica, eram “excelentes exemplos de prática da iluminação natural”. Eram muito comuns as implantações de blocos separados de salas de aula com janelas nos dois lados (HESCHONG, 1999, p.4). Durante o transcorrer da década de 60 esse postulado foi posto em dúvida. As objeções eram muitas: janelas menores reduziram as cargas térmicas para o ar condicionado, janelas numerosas e de grandes dimensões teriam maior custo de instalação e manutenção, blocos agrupados de salas aula sem restrições da orientação solar permitiriam um melhor aproveitamento do terreno, janelas e iluminação zenital ofereceriam riscos à segurança, etc. Como consequência, o projeto de salas com iluminação bilateral foi abandonado e muitas salas de aula nessa época foram construídas com dimensões reduzidas para iluminação natural, muitas possuíam vidros escuros e, muitas, inclusive, foram construídas sem janela alguma (HESCHONG, 1999, p.5).

Durante a década de 70, com a crise do petróleo, a preocupação com a conservação de energia começou a se esboçar nos projetos de escolas. Inicialmente essa preocupação se concentrava na redução da carga térmica para o ar condicionado, e uma forma de atingir esse objetivo era reduzindo a área das aberturas. Muitas escolas sem janelas começaram a ser construídas nos Estados Unidos, chegando o estado da Flórida a promulgar uma lei determinando que todas as escolas fossem equipadas com ar-condicionado e sem janelas (WEI, 2003, p. 114).

A discussão sobre as vantagens da utilização da iluminação natural voltou à tona na década de 80, ainda relacionada com a questão da necessidade da economia de energia. Nesse campo, a iluminação natural tem uma ampla vantagem sobre a artificial, dependente da energia elétrica. Com a perspectiva do esgotamento

das fontes de energia não renováveis num futuro não muito distante, tornou-se evidente as vantagens da utilização de uma energia farta, barata e praticamente inesgotável, como a luz do sol. Com o aumento e a divulgação internacional das preocupações ecológicas nas décadas seguintes, tornou-se evidente uma outra vantagem da iluminação natural, a de ser uma forma de energia que não interfere no meio ambiente.

A partir dos anos 90, uma série de pesquisas começou a ser desenvolvida para tentar determinar a influência da iluminação na saúde e no desempenho dos estudantes. No Canadá, Hathaway (2000) elaborou uma pesquisa desenvolvida a partir das conclusões de uma revisão bibliográfica realizada pelo autor e para replicar os resultados de estudos feitos anteriormente de Wohlfarth em 1986 e de Hargreaves e Thompson em 1989 sobre os efeitos não visuais da iluminação em salas de aula. Durante dois anos o autor acompanhou o desenvolvimento de 327 alunos em cinco escolas diferentes em salas de aula com quatro tipos de lâmpadas, entre elas lâmpadas tipo “full spectrum”, que tentam simular a ampla gama do espectro eletromagnético da luz natural. Embora a pesquisa tenha sido feita com iluminação artificial, o autor faz comparações com a iluminação natural. Concluiu que a radiação ultravioleta presente nas lâmpadas favorecia a saúde dos estudantes porque estimulava a produção de vitamina D, diminuindo a incidência de cáries e contribuindo para o crescimento. Segundo o autor, o efeito profilático da radiação ultravioleta e a produção de vitamina D também estariam associados à menor taxa de ausências e à saúde dos estudantes:

“Os sistemas de iluminação, na maioria das vezes, são projetados tendo-se em vista a sua eficiência, sendo seu objetivo o de obter o máximo possível de lumens²⁷ por watt. Parece que pouca atenção é dedicada aos efeitos não visuais que a luz pode ter sobre os usuários dos sistemas de iluminação. Esse estudo aponta claramente para a simples conclusão de que os sistemas de iluminação, não importando o quão eficientes eles sejam, não são neutros em relação aos seus efeitos nas pessoas. De fato, parece ser o caso de que exista uma série de efeitos não visuais associados com os vários tipos de iluminação. Esse estudo identificou um certo número desses efeitos – diferenças na taxa de desenvolvimento de cáries, diferença nas taxas de frequência, diferenças em peso, altura e ganho de

²⁷ Lúmen é a unidade de fluxo luminoso, que é a quantidade de luz que irradia por segundo uma fonte de luz (VIANNA e GONÇALVES, 2001).

gordura, e diferenças de aproveitamento escolar. Pode-se concluir desses achados que a luz natural é importante para o desenvolvimento e o bem estar das pessoas e que aprisioná-las em espaços artificialmente iluminados projetados para ser só eficientes representa uma usurpação” (HATHAWAY, 2000, p.24) (tradução nossa).

Incentivados pelo estudo de Hathaway, Nicklas e Bailey (1997) tomaram a iniciativa de pesquisar o desempenho dos estudantes em três escolas projetadas por seu próprio escritório no estado americano da Carolina do Norte durante a primeira metade da década de 90, onde foi adotada como estratégia de iluminação a disponibilidade de luz solar nos principais espaços ocupados das escolas e a instalação de iluminação zenital voltada para o sul, que foi projetada para fornecer uma iluminância de 700 lux durante dois terços do tempo em que os espaços seriam utilizados.

A intenção da pesquisa de Nicklas e Bailey (1997) era comparar os resultados obtidos pelos estudantes das três escolas projetadas com iluminação natural em testes padrões de desempenho aplicados pelas autoridades educacionais com os resultados obtidos pelos estudantes de escolas de toda a região (16 escolas elementares e 8 escolas médias). Como existem diferenças de aproveitamento e de capacidade entre estudantes e professores das várias escolas, procurou-se estabelecer uma relação entre os percentuais de incremento ao longo do tempo e não nos valores absolutos obtidos nos testes de desempenho, para evitar uma falsa comparação. A conclusão a que os autores chegaram foi que, “embora existam muitas variáveis que afetem o desempenho escolar, estudantes que freqüentam escolas com iluminação natural parecem ser beneficiados por estarem em um ambiente educacional superior, naturalmente iluminado” (NICKLAS, BAILEY, 1997) (tradução nossa).

Uma das maiores pesquisas sobre iluminação natural em escolas até agora realizada foi feita em 1999 pelo Heschong Mahone Group nos Estados Unidos (WEI, 2003). O estudo, que abrangeu 2000 salas de aula e cerca de 21.0000 alunos, analisou dados de desempenho escolar de estudantes de três distritos escolares de ensino fundamental, tentando estabelecer uma relação com a

quantidade de luz natural disponível nas salas de aula em que estudavam. A metodologia empregada no estudo procurou abarcar uma amostra de estudantes do ciclo fundamental porque estes tendem a passar a maior parte do seu período escolar na mesma sala de aula com o mesmo professor. Além disso, estes alunos têm um currículo mais padronizado, o que facilita a aplicação de testes de desempenho escolar mais homogênea. Também as salas de aula do ensino fundamental tendem a seguir uma padronização em seu projeto, com dimensões regulares. A intenção era comparar resultados em testes de leitura e matemática dos alunos dos três distritos escolares com as condições de iluminação das suas salas de aula.

Dois conjuntos de dados foram então sistematizados: os resultados obtidos nos testes pelos estudantes fornecidos pelos distritos e outro conjunto com as informações das salas de aula quanto a suas dimensões de janelas, presença ou não de iluminação zenital²⁸ e dados sobre iluminação natural. Procurou-se caracterizar as salas de aula quanto a suas dimensões, as dimensões da escola, a data de sua construção, a tipologia das salas e a presença, as dimensões e geometria das janelas e da iluminação zenital. Quanto à iluminação natural, devido ao grande número de salas a serem analisadas e como as condições de iluminação são extremamente variáveis, modificando-se durante o dia e o ano escolar, o número de medições a serem realizadas e o número de combinações das variáveis era imenso, o que poderia comprometer o andamento da coleta de dados. Procurou-se então criar um padrão que identificasse as “oportunidades” de luz natural durante o ano. Segundo seus autores, o estudo começou sem a certeza de que seriam encontrados resultados que confirmassem uma correlação entre iluminação natural e desempenho escolar. Ao final do trabalho puderam chegar às seguintes conclusões:

[...] “encontramos uma uniformemente positiva e altamente significativa correlação entre a presença de luz natural e o desempenho dos estudantes nos três distritos estudados. Concluímos que a iluminação natural, fornecida por elementos zenitais, portanto distinta de todos os outros atributos associados

²⁸ Iluminação por dispositivos transparentes colocadas no teto de um ambiente.

com as janelas, têm um efeito positivo. Concluímos que a utilização de uma grande base de dados previamente coletados, pode ser uma ferramenta poderosa para investigar os efeitos do meio ambiente físico no desempenho humano” (HESCHONG MAHONE GROUP, 1999, p.57) (tradução nossa).

Um dos mais recentes desenvolvimentos em iluminação natural para escolas é representado pela consciência ambiental, como as “green schools” dos Estados Unidos, com ênfase não só na conservação de energia, mas também em níveis satisfatórios de conforto e bem estar (WEI, 2003, p.117). Embora exemplos de escolas projetadas e construídas com ênfase na iluminação natural existam em vários países, é nos Estados Unidos que identificamos um esforço organizado e centralizado em implementar essa política em escolas e de divulgar amplamente tanto os resultados das pesquisas como orientações práticas por companhias estatais, comitês, organizações não governamentais, laboratórios e universidades.

O conceito de “High Performance Schools” - HPS, ou “Green Schools”, está relacionado não só a prédios escolares que economizam energia, mas também que forneçam ambientes saudáveis, confortáveis e bem iluminados onde o aprendizado possa se desenvolver adequadamente. Nesse conceito geralmente estão incluídos ambientes com luz natural em quantidade adequada, um requisito imprescindível para assegurar a sua boa qualidade. Segundo Wei (2003), das estratégias para o projeto das HPS, a iluminação natural pode ser a mais significativa na arquitetura e a mais desafiadora. “A iluminação natural tem demonstrado ser uma das melhores estratégias de conservação de energia em edifícios escolares e a decisão de utilizar iluminação natural em um projeto de uma escola terá influência nas decisões sobre os outros sistemas desse edifício” (HESCHONG, 2001).

Para atingir esses objetivos, os projetos da HPS utilizam várias estratégias para otimizar o uso da luz natural, fazendo a luz difusa adentrar mais profundamente nos espaços internos, barrando a incidência direta dos raios solares, utilizando a reflexão indireta da luz do sol e evitando o ofuscamento (Figura 4). No apêndice A são mostrados alguns exemplos das HPS americanas.

A – Iluminação zenital com defletores internos para evitar ofuscamento. Fonte: Innovative Design.

B – “Light pipe” para conduzir luz natural aos espaços internos. Fonte: www.solatube.com.

C – Prateleiras de luz para conduzir a luz mais profundamente nas aberturas laterais. Fonte: Daylighting Dividends - Case study. Innovative Design, 2004.

Figura 4 – Algumas estratégias para a iluminação natural nas “green schools” americanas.

2.2.2 As recomendações de luz natural para escolas: principais referências

De maneira geral, existem três fatores básicos de desempenho que devem ser levados em consideração em relação às condições de iluminação em ambientes educacionais:

- níveis mínimos de iluminância: quantidade mínima de luz no plano de trabalho que possibilite a realização das atividades pretendidas com esforço visual que não comprometa a saúde . Esses níveis estão estabelecidos na norma NBR 5413 “Iluminâncias de interiores – Especificação” da ABNT (1991), para cada ambiente em que se desenvolvem atividades educacionais, tais como salas de aula, bibliotecas, laboratórios, áreas esportivas (ver Quadro 2).
- boa uniformidade da luz no ambiente: ou seja, da distribuição uniforme dos níveis mínimos de iluminância pelo ambiente; depende basicamente da forma, dimensões e posição das janelas;
- ausência de ofuscamento: em relação à iluminação natural está relacionado a evitar a incidência de luz solar direta nos planos de trabalho, como lousas, carteiras, brinquedos e monitores de computadores. Em relação à iluminação artificial, geralmente está associada ao excesso, à inadequação e à pulsação intermitente da fonte de luz. Ofuscamento pode ser causa de distração e desconforto, prejudicando as tarefas visuais.

Esses fatores estão expressos em recomendações, leis e manuais para orientação do projeto de ambientes escolares que, de certa forma, refletem o estado em que se encontram as pesquisas em iluminação natural em projetos escolares, conforme descritas no item 2.2.1. A seguir são apresentadas as principais referências de normas e recomendações para a utilização da iluminação natural em escolas. Nos países onde a pesquisa da iluminação natural em escolas tem avançado, essas normas apresentam orientações mais detalhadas de sua aplicação no projeto de edifícios escolares.

AMBIENTES ESCOLARES	ILUMINÂNCIAS RECOMENDADAS (em lux)
Salas de aula	300 - 500
Quadro negro /lousa	500 - 750
Sala de trabalhos manuais	300 - 500
Laboratórios	200 - 300
Salas de desenho	500 - 700
Salas de reunião	200 - 300
Biblioteca:	
Sala de leitura	500 - 750
Recinto das estantes	300 - 500
fichário	300 - 500
Esportes:	
Local de jogos	300-500
Locais recreativos de treinamentos	150 - 200
Ginástica	200 - 300
Quadra	200 - 300
Atividades administrativas	500
Auditório - platéia	200 - 300
Auditório - tribuna	500 - 750

Quadro 2 - Níveis de iluminação para ambientes escolares.Fonte: Resumo extraído da NB-57.

2.2.2.1 As recomendações da IESNA²⁹

A literatura mostra que as pesquisas em iluminação natural em escolas nos anos recentes têm se deslocado da necessidade de apenas encontrar um nível quantitativo ao desempenho das tarefas visuais para o entendimento dos aspectos qualitativos da iluminação. Esses avanços geralmente estão expressos em normas e regulamentações publicadas por governos ou entidades da área. Segundo WEI (2003) as regulamentações e normas na Grã-Bretanha evoluíram no sentido de exigir níveis cada vez mais altos de iluminância, com o incremento da exigência de aspectos qualitativos (Quadro 3). Nos Estados Unidos os níveis de iluminação exigidos são maiores. A IESNA nos anos 80 recomendava 538 lux para as tarefas normais em salas de aula e 1076 lux para atividades na lousa, estabelecendo que no mínimo uma janela do ambiente educacional deveria atender critérios de qualidade. Na sua última edição, o manual da IESNA (2000) indica que

²⁹ Illuminating Engineering Society of North America.

Código	Recomendações de iluminação natural para salas de aula
The London Building Acts, 1894	Área envidraçada de 1/10 da área do piso para iluminação vertical e 1/12 para zenital, para escolas: 1/5. Iluminâncias recomendadas para salas de aula de 91 lux
British Standards Code of Practice, 1945	Mínimo de 2% de "fator de céu" * de luz natural em salas de aula e 5% de fator de céu onde for possível na sala de aula
IES Lighting Code, 1955	Em todos os espaços de ensino e cozinhas o nível de iluminância e o fator de luz do dia no plano apropriado na área de uso normal, não deve ser menos do que 100 lux e 2% respectivamente
CIBS Lighting Code, 1977	O nível de iluminância e o fator de luz do dia nas salas de aula deve ser não menos do que 100 lux e 2% respectivamente
(School Premises) Regulations, 1981	Para a iluminância da luz natural ser adequada à tarefa, é necessário que atinja um nível de não menos do que 300 lux. Quando a iluminação de um espaço é obtida com a combinação de luz natural e artificial, a norma insiste em nível mínimo de iluminância de 350 lux
CIBSE Code for Interior Lighting, 1984	O mesmo que o The Education (School Premises) Regulations de 1981. O nível de iluminância recomendado para salas de aula é 300 lux
CIBSE Code for Interior Lighting, 1994	O mesmo que o The Education (School Premises) Regulations de 1981. O nível de iluminância recomendado para salas de aula é 300 lux
Environmental Design in School, 1997	Iluminância recomendada em salas de aula não devem ser menos do que 300 lux no plano de trabalho. Sempre que possível, um espaço iluminado naturalmente deve ter um fator de luz do dia médio entre 4% e 5%
* Fator de céu é a componente celeste do FLD quando o céu tem uma distribuição uniforme de luminâncias (MOORE, 1985).	

Quadro 3. Resumo das normas e recomendações para salas de aula em diferentes períodos na Grã-Bretanha. Fonte: WEI, 2003.

a iluminação natural é primordial em escolas, mas não recomenda níveis mínimos de iluminação para tarefas visuais ou aplicações específicas. Em seu lugar, lista os fatores importantes para a qualidade da iluminação natural em edifícios escolares. O manual parte da premissa que o objetivo dos projetos de iluminação para prédios escolares é proporcionar a seus usuários, estudantes, professores e funcionários, um ambiente visual que sirva de suporte para as atividades educacionais. Para atingir esse objetivo, ressalta que uma iluminação horizontal uniformemente distribuída pelo edifício escolar não assegura necessariamente um alto nível de desempenho visual por causa da grande quantidade de tarefas envolvidas no processo de aprendizagem, que variam em tamanho, distância, contraste e direção de visão. Segundo o manual, apesar de a atividade educacional básica se concentrar em ler e escrever, que requerem uma atenção próxima e concentrada, existe uma variação entre tarefas próximas e distantes, superfícies grandes e pequenas, brilhantes e opacas, horizontais e verticais, para as quais a visão do aluno tem que se adaptar continuamente. (IESNA, 2000, p.12-1). O manual enfatiza

que a quantidade e a qualidade da iluminação são estreitamente interdependentes. Mesmo que um sistema de iluminação forneça níveis de iluminância apropriados, fatores como ofuscamento, contrastes, brilhos e luminância excessiva no campo visual podem ter efeito negativo. Conforme o manual, as principais recomendações para o controle destes fatores são:

Iluminância: como os ambientes educacionais apresentam tarefas visuais variadas, deve-se avaliar cada uma dessas tarefas em termos de variação de tamanho, contraste e tempo para determinar um nível de iluminância ótimo. Em seguida, deve-se eleger como nível de iluminância para o ambiente a tarefa que exige o maior nível de iluminância. No caso dos ambientes de aprendizagem, geralmente esse nível é o necessário para a leitura de um texto escrito a lápis. Às vezes este critério pode resultar em um nível muito alto de iluminância, o que não é economicamente recomendável. Neste caso, deve-se eleger um nível geral apropriado à tarefa menos solicitada e providenciar níveis altos de iluminância somente nos locais onde seja necessário. É o caso, por exemplo, de ambientes com lousas e mesas de desenho.

Refletância: como regra geral, deve-se evitar grandes diferenças nos níveis de refletância da superfície da tarefa visual com os das superfícies mais significativas da sala de aula, como indicado na Figura 5 - A. As paredes, cortinas e venezianas devem ser de cores claras e mesma refletância. Paredes próximas às janelas devem possuir alto nível de refletância para evitar contraste demasiado com as janelas, o que pode causar ofuscamento. Tetos devem ter superfícies altamente refletivas, de preferência brancas, para refletir luz para as superfícies horizontais. O piso deve ser de material opaco, com refletância em torno de 30%.

Figura 5 – Refletâncias recomendadas para superfícies e mobiliário de salas de aula (A). Proporção entre a luminância da superfície da tarefa visual e a luminância das superfícies mais significativas de uma sala de aula (B). Fonte: IESNA, 2000.

Luminância: a diferença entre os brilhos das diversas superfícies de uma sala de aula é fundamental para a visualização de uma tarefa e deve ser mantida dentro de determinados limites porque quando o olho muda de uma tarefa visual para outra tem de se adaptar à luminância da nova tarefa. Se a diferença entre os níveis for grande, demandará mais tempo ao olho para se adaptar. Se esta diferença for muito grande, haverá desconforto visual. Esses níveis devem ser mantidos conforme os parâmetros indicados na Figura 5 - B. Como regra geral, para evitar diferenças acentuadas, deve-se diminuir a luminância de luminárias e janelas e aumentar as das superfícies interiores, aumentando sua refletância ou a quantidade de luz incidente nelas.

Ofuscamento: uma medida fundamental para evitar o ofuscamento em salas de aula é impedir a incidência direta de radiação solar sobre as superfícies das tarefas a serem desenvolvidas, através de brises, cortinas, venezianas e prateleiras de luz. As luminárias também devem ser dotadas de dispositivos que atenuem o ofuscamento. Deve-se utilizar, de preferência, materiais opacos para as superfícies, móveis e equipamentos da sala de aula. Altos contrastes de sombra devem ser evitados sobre a superfície da tarefa visual, com exceção em ambientes onde isto é importante para a definição de rostos e objetos, como em ginásios de esportes e salas de arte (Figura 6), onde a visibilidade de superfícies tridimensionais é fundamental (IESNA, 2000, p.12-3).

Salas de aula são os ambientes mais comuns e freqüentes nos edifícios educacionais. Para outros ambientes do edifício, deve-se adaptar esses fatores às necessidades das tarefas visuais neles desenvolvidas. Para atividades esportivas, por exemplo, a uniformidade da iluminação e a minimização de sombras são itens importantes. Salas com terminais de vídeos de computadores devem ter um nível relativamente baixo de iluminação geral e uma iluminação suplementar para tarefas específicas, além de evitar reflexos excessivos e diretos nas telas dos computadores, que podem causar ofuscamento.

Figura 6. A iluminação natural deve ser adequada às atividades que se desenvolvem nos diferentes ambientes de uma escola. Sala de artes, Universidade da Califórnia (A). Ginásio de esportes da Lincoln High School, Califórnia (B). Fonte: Boora Architects, 2006.

2.2.2.2 As recomendações do Departamento de Energia dos Estados Unidos

O Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos, em seu programa “Rebuild América - EnergySmart Schools”, tem o objetivo de fornecer informações sobre o consumo de energia e meio ambiente para todos os envolvidos no processo de produção de escolas no território americano. Especificamente para engenheiros e arquitetos, publicou uma série de manuais intitulados “National Best Practices Manual for Building High Performances Schools” com o intuito de promover a eficiência energética e o uso de energias renováveis em projetos de escolas, com orientações específicas para cada área climática do país.

No capítulo dedicado à iluminação natural e janelas, o manual reconhece o projeto de iluminação natural como a principal estratégia para escolas energeticamente eficientes, por propiciar economia de energia e colaborar para um melhor desempenho de professores e estudantes. Ao enfatizar a importância da iluminação natural, o manual condensa os resultados de várias pesquisas e estudos sobre os benefícios propiciados pela luz natural:

- desempenho acadêmico: citando a pesquisa do Heschong Mahone Group (item 2.2.1) , diz que estudantes e professores têm melhor desempenho em ambientes estimulantes e naturalmente bem iluminados
- conservação de energia: como a energia elétrica é a principal fonte de energia na maioria das escolas, a integração com sistemas de controle entre iluminação natural e artificial pode promover grandes economias de energia
- luz de melhor qualidade: “a luz natural fornece fonte de luz da melhor qualidade para tarefas visuais, enfatiza a aparência visual e a cor dos objetos e ajuda os estudantes a enxergar melhor pequenos detalhes”. (p.67)
- conexão com a natureza: a luz natural propicia uma conexão com variações de tempo, luz, estações do ano, tornando o ambiente educacional mais estimulante e despertando maior atenção em estudantes e professores
- melhorias para a saúde: janelas com vista para o exterior promovem uma constante mudança da distância focal de visão, ajudando a manter a saúde do olho. (National Best Practices Manual, 2002, p.67)

Para a elaboração de estratégias de projetos de escolas iluminadas naturalmente, o manual recomenda a adoção de seis princípios básicos:

1 – Prevenir a penetração de luz solar direta em espaços de aprendizagem sensíveis ao ofuscamento: a radiação solar direta é uma poderosa fonte de luz, mas também pode ser fonte de desconforto térmico e visual. Deve-se enfatizar a utilização de luz natural indireta e refletida como fonte de luz suave e difusa, evitando a penetração direta do sol (Figura 7).

Figura 7. Uma das principais recomendações para iluminação de salas de aula é evitar a radiação solar direta (A) e utilizar luz natural difusa, indireta e refletida (B). Fonte: Square One: www.squ1.com

2 – Prover luz suave e uniforme nos diferentes espaços: melhores resultados serão obtidos com o balanceamento de luz natural difusa, que promove melhor desempenho visual e conservação de energia. Uma melhor distribuição da luz natural difusa pode ser conseguida com iluminação zenital. Essa qualidade também pode ser obtida com a combinação de janelas altas para iluminação e janelas baixas para vista em lados opostos ou a combinação de iluminação zenital e iluminação lateral. A situação de mais difícil controle é a iluminação por janelas em apenas um dos lados da sala, com altos níveis de iluminação próximos às janelas, que diminuem sensivelmente com a profundidade do ambiente. A luz natural ambiente deve estar entre 200 e 300 lux e deve-se utilizar iluminação artificial específica para as tarefas visuais requeridas, entre 500 e 800 lux. Esse item frisa a importância das superfícies das paredes e tetos como parte do sistema de iluminação natural, sendo sua posição, cor e refletância fundamentais para a obtenção de uma luz uniformemente distribuída.

Figura 8 – Distribuição uniforme e suave da luz natural e integração com a iluminação artificial em salas de aula. Roy Lee Walker Intermediate School. Figura 9: detalhe dos difusores de iluminação zenital. Fonte: DesignShare, 2002.

3 – Evitar criar fontes de ofuscamento: o brilho excessivo de fontes de luz ou superfícies brilhantes em relação às superfícies vizinhas pode causar ofuscamento e desconforto, prejudicando a visualização e o desempenho de estudantes. É preciso impedir o ofuscamento por meio de dispositivos como brises, venezianas, cortinas ou refletores. O ofuscamento também ocorre quando a luz natural atinge superfícies refletoras como a tela de um computador ou um quadro de superfície lisa. Telas de computador são particularmente propícias ao ofuscamento quando recebem luz direta das janelas.

4 – Permitir que professores controlem a iluminação natural por meio de brises e venezianas móveis. A luz natural é extremamente variável ao longo do dia e do ano e requer projeto cuidadoso para que forneça iluminação adequada no número máximo de horas durante o dia. O ideal seria que as aberturas para iluminação variassem conforme a variação da luz do dia. Esse é um problema de difícil solução enquanto a tecnologia de vidros eletrocromáticos³⁰ não esteja suficientemente desenvolvida e a preços acessíveis. Enquanto isso, o principal meio de controle é a colocação de protetores solares internos ou externos. Manuais ou eletrônicos, esses controles devem ser de fácil manutenção e acesso aos professores para que controlem a iluminação interna conforme a variação da luz externa.

³⁰ Vidros que mudam de características com a passagem de corrente elétrica, radiação ou temperatura.

5 - Projetar o sistema de iluminação elétrica como complemento da iluminação natural, provendo-os de controles de luz para incentivar a conservação de energia: uma estratégia de iluminação para fornecer qualidade de luz e conservação de energia só pode dar certo com a integração dos sistemas de iluminação natural e artificial. Para tanto, é preciso conhecer as características de cada sistema para integrá-los em um único, compensando suas diferenças.

6 – Planejar o lay-out dos espaços interiores para tirar o melhor proveito da iluminação natural: como a iluminação natural varia bastante dentro de um espaço, é importante planejar as atividades de acordo com a disponibilidade da luz em cada porção deste espaço. Tarefas visuais devem ser alocadas de modo a evitar ofuscamento, de preferência de forma que a iluminação venha lateralmente ou de cima. A localização frontal a uma janela pode causar ofuscamento direto, enquanto que a janela localizada atrás pode causar sombra ou brilhos refletidos. (recomendações extraídas do National Best Practices Manual, 2002, p. 68 – 72).

2.2.2.3 CHPS e o protocolo de Washington

A elaboração e a publicação de manuais por si só não garante que princípios de qualidade para a iluminação natural em escolas sejam aplicados na prática. Conscientes dessa condição, várias entidades americanas desenvolvem programas locais para incentivar o uso da iluminação natural em projetos de escolas. No estado da Califórnia, o “Collaborative for High Performance Schools – CHPS” é uma entidade que reúne representantes do governo local, empresas e entidades não-governamentais para divulgar, implementar e financiar projetos e construção de escolas. A entidade estabelece índices para qualificar um edifício escolar como “high performance school”, o que possibilita aos envolvidos em sua construção participar de programas e financiamentos promovidos pelo governo e entidades particulares e ter uma base de informações que os permita selecionar e contratar empresas e profissionais com requisitos e experiência necessária ao perfil desejado. Para orientar todas as pessoas envolvidas no processo de planejamento e construção de edifícios educacionais, o CHPS editou também o “Best Practices Manual”, adaptado

do “National Best Practice Manual”, comentado anteriormente, no qual o projeto da iluminação natural comparece como uma das principais estratégias para escolas que promovam qualidade do ambiente e conservação de energia.

No estado de Washington, a “School Facilities Organization – Office of Superintendent of Public Instruction” publicou o manual “Washington Sustainable Schools (WSS) – Protocol for High Performance Schools Facilities” sob o patrocínio do governo estadual e da empresa de energia Pacific Northwest, em associação com diversas empresas e entidades. Esse trabalho foi baseado no manual e nos princípios do CHPS, adaptado ao clima, à economia, às leis e aos processos específicos do estado de Washington. O protocolo estabelece um sistema de pontuação para itens de sustentabilidade nos projetos de escolas, que somam créditos para projetistas e investidores se candidatarem a programas e financiamentos. O protocolo WSS é similar à certificação LEEDS³¹ do U.S. Green Building Council e incentiva a utilização de princípios e dos manuais de referência dessa certificação para os projetos escolares do estado de Washington.

Nos pré-requisitos para a pontuação dos projetos, entre vários outros itens de sustentabilidade como implantação, conservação de energia, redução de resíduos, seleção de materiais, conforto térmico, reutilização de água, fontes alternativas de energia, a qualidade da iluminação natural ocupa uma posição de destaque, e colabora também para outras pontuações uma vez que a estratégia da utilização da iluminação natural é a linha orientadora do item de conservação de energia e qualidade dos ambientes internos, de maior pontuação.

Na parte dedicada à qualidade do ambiente interno, o protocolo WSS dá especial ênfase à qualidade da iluminação natural como forma de promover a melhoria do desempenho dos estudantes e a conservação de energia. Essa qualidade está definida como sendo uma iluminação que minimize a penetração direta da luz do sol e o ofuscamento e promova uma integração com o controle da iluminação elétrica em espaços iluminados naturalmente. Os pré-requisitos para a pontuação na seção iluminação natural em salas de aula estabelece:

³¹ Leadership in Energy and Environmental Design.

- “um mínimo de 2% de FLD de luz natural uniformemente distribuída em 50% dos espaços com tarefa visual essencial, sem penetração direta de radiação solar em superfícies mais visíveis a partir de áreas de tarefas essenciais.
- A penetração solar direta deve ser eliminada em espaços iluminados naturalmente com quebra-sóis, prateleiras de luz, etc. O período de sombreamento deve se estender de 21 de março através do verão até 21 de setembro.³²
- Espaços de tarefas visuais essenciais incluem salas de aula, ginásios de esportes e espaços administrativos, porém não incluem depósitos, lavanderias, salas de equipamentos, salas de cópias e outras áreas de suporte de baixa ocupação ou locais onde a iluminação natural não é apropriada”(WSS, 2004, p.45).

Para a obtenção de créditos na seção ‘Qualidade do Ambiente Interno’, deve-se cumprir um requisito relativo à qualidade da iluminação cujo propósito é “promover a melhoria do desempenho visual com uma estratégia de iluminação ambiental de alta eficiência e sem ofuscamento”. A intenção desse item é reconhecer que, devido às novas tecnologias, os ambientes educacionais têm se modificado e as iluminações das salas de aula têm de se adaptar a elas, pois a quantidade e a qualidade de luz afetam diretamente o conforto visual e o desempenho dos estudantes e seus instrutores. Para conseguir esse ponto os projetistas devem:

“- instalar um sistema de iluminação elétrica que estimule o desempenho visual dos ocupantes, utilizando linhas de luminárias diretas ou indiretas no teto paralelas à linha da janela. As luminárias devem ter lâmpadas fluorescentes de alta eficiência luminosa e um índice de reprodução de cores de no mínimo 80%. O sistema de iluminação deverá possuir controles de integração com a iluminação natural. A iluminação das áreas das tarefas visuais (lousas e quadros) pode ter iluminação complementar de eficiência mínima inicial de 60 lumens por watt e controladas separadamente do sistema geral por sensores de presença...” (WSS, 2004, p.47).

³² N.A.: verão no hemisfério Norte.

2.2.2.4 As recomendações do MEC

No Brasil, no ano de 2002 o MEC - Ministério da Educação e Cultura do Governo Federal, por meio do FUNDESCOLA, com o objetivo de contribuir para a melhoria das edificações escolares, publicou um manual técnico cujo objetivo era fornecer subsídios para profissionais de órgãos municipais e estaduais envolvidos com o projeto e a construção de escolas do ciclo fundamental. Os dois volumes do manual contêm uma série de recomendações e parâmetros técnicos mínimos para o projeto e o dimensionamento de ambientes escolares das escolas públicas.

No item em que trata especificamente da iluminação natural, no capítulo 5: Condicionantes Ambientais, o manual reconhece a importância dos requisitos qualitativos ao lado dos quantitativos: “O desempenho da visão depende diretamente das condições de iluminação. A má iluminação provoca uma queda na produtividade e aumenta o número de erros em qualquer atividade. A carência de luz por ‘mascaramento’ produz sombra, prejudicial à visão humana. O excesso de luz natural ou artificial produz, para a visão humana, o efeito de deslumbramento e ofuscamento, prejudiciais ao olho humano” (MEC, 2002, p.42).

O manual sintetiza as suas recomendações em relação ao projeto da iluminação natural na forma de aspectos a serem observados no projeto de edifícios escolares. A primeira e importante recomendação é sobre a necessidade de barrar o acesso da radiação solar direta nos espaços escolares, com exceção de banheiros, cozinhas e depósitos. Reconhece ainda a diferença de características de iluminação natural de acordo com os diferentes climas das regiões do Brasil e recomenda a utilização de protetores solares nas aberturas:

“Os ‘brises’ permitem a reflexão da luz, evitando insolação direta e, por conseguinte, a radiação difusa, não direta. Eles só devem ser utilizados pelo lado exterior às esquadrias, para que a radiação difusa sofra aeração, perdendo calor, antes de penetrar no ambiente. Para isso, entre o ‘brise’ e a esquadria deve-se prever um espaço mínimo de 30 cm” (MEC, 2002, p. 47 e 48).

O manual apresenta ainda uma descrição de cartas solares e quebra-sóis, porém não apresenta um método de cálculo para a sua construção e também não está referenciado em níveis mínimos de iluminação natural para obtenção de qualidade na iluminação de espaços escolares. Devido a abrangência do manual, existe uma possibilidade interessante de, a exemplo do “National Best Practices Manual”, elaborar recomendações específicas sobre a utilização da iluminação natural e a conservação de energia para cada área climática do país.

2.2.2.5 As recomendações da FDE

Edifícios escolares vêm sendo construídos em São Paulo desde a Primeira República, entre os anos 1894 e 1910, quando se construíam escolas com ênfase na simetria, predominância de salas de aula e poucos espaços administrativos. Eram consideradas construções de boa qualidade técnica, nas quais já estavam presente preocupações relativas à higiene. Na década de 30, durante a administração de Armando Sales de Oliveira, teve início a implementação de critérios de projeto, inclusive dimensionamento e posicionamento das janelas e orientação do edifício. Estes critérios eram estabelecidos por equipes multidisciplinares ligadas ao Departamento de Obras Públicas da Secretaria de Educação e Saúde (DOP).

Posteriormente, no período que ficou conhecido como Convênio Escolar (1949 -1954), foram produzidas escolas com “uma arquitetura de caráter formal modernista”, mais funcional, com circulações em rampa e jardins internos e a utilização de quebra-sóis. Em seguida vieram as escolas construídas pelo FECE – Fundo Estadual de Construções Escolares (1960 -1975), que se caracterizavam por edifícios notáveis, projetados pelos principais arquitetos brasileiros da época.

Durante a década de 70, frente à grande demanda de construção de salas de aula, a CONESP, Companhia de Construções Escolares de São Paulo, iniciou o processo de normatização de materiais e componentes, com normas para projetos e para a estrutura funcional das escolas. Nos anos 80, a FDE – Fundação para o Desenvolvimento da Educação sucedeu a CONESP, cujos princípios e normas continuou a implementar. (ORNSTEIN, BORELLI, 1995, p.10-12).

Devido à quantidade e à complexidade das construções escolares no estado, essas entidades precisaram desenvolver uma padronização arquitetônica dos aspectos construtivos dos ambientes das escolas. No aspecto relativo ao conforto ambiental e à iluminação, essa padronização se manifesta na forma de recomendações de projeto baseadas em normas e legislação sobre o assunto. As orientações estão baseadas nas normas brasileiras, que indicam que a iluminação deve obedecer a uma proporção da área do piso e estabelecem níveis mínimos de iluminância para os diversos ambientes escolares. Em relação à insolação, a CONESP havia definido uma série de padrões de protetores solares para cada uma das orientações possíveis para a implantação do edifício escolar, que estão reproduzidos no Anexo A. Pelo seu desenho, percebe-se que a maior parte desses brises veda totalmente a visão para o exterior e que, portanto, não foram levados em consideração critérios de iluminação natural para o seu projeto.

Uma das primeiras pesquisas sistemáticas a abordar a questão do conforto ambiental luminoso nas escolas da rede pública do estado de São Paulo foi o estudo de título “O desempenho dos edifícios da rede estadual de ensino – o caso de São Paulo. Avaliação técnica: primeiros resultados”; coordenado pelos professores da FAUUSP Sheila Orstein e José Borelli Neto, de 1995. Foram estudadas 27 escolas, todas construídas após o ano de 1950, o que representava 1% das escolas da rede pública do município e da grande São Paulo. Entre os diversos itens de avaliação dos edifícios, como sistema estrutural, tipologia construtiva, acabamentos, instalações e funcionalidade, foram analisados também os itens de conforto ambiental e, entre eles, a interferência da iluminação natural e artificial.

Em relação à iluminação natural, os dados apontaram um resultado que os autores consideraram satisfatório: “De um modo geral, e como resultado das primeiras vistorias realizadas, tem-se que em mais de 55% das escolas, objeto de estudo, a iluminação natural foi considerada ótima e/ou satisfatória, segundo uma escala semântica de 4 pontos: ‘ruim’, ‘insatisfatória’, ‘satisfatória’ e ‘ótima’” (ORNSTEIN, BORELLI, 1995, p.33). Como nesse trabalho não foi encontrada uma maior definição de critérios de medição da luz natural, supõe-se que os dados coletados dizem respeito a níveis quantitativos de iluminação e não exatamente a

critérios qualitativos (Gráfico 2). Na sequência, são apresentados dados de “Conforto Lumínico – problemas gerais” que apontam para a evidência de que talvez esses níveis estivessem acima do desejável, com marcas de quase 40% das escolas levantadas com ofuscamento no plano de trabalho e mais de 60% de incidência direta de radiação solar no plano de trabalho (Gráfico 3), o que, segundo os autores, representam “alguns itens de desempenho ineficiente localizados” (ORNSTEIN, BORELLI, 1995, p.35).

Em relação à iluminação artificial, os autores consideram que os valores encontrados apontam resultados ainda mais satisfatórios, com 70% das escolas com níveis de iluminação ótimos e/ou satisfatórios, segundo a mesma escala semântica apresentada, resultado ao qual atribuem ao fato de 80% das escolas serem pintadas com cores claras. Com o atual desenvolvimento do conhecimento sobre a iluminação natural, entretanto, seria possível considerar que talvez os dados encontrados apontem para um desequilíbrio nas condições de iluminação, com a falta de controle da incidência direta da luz do sol no plano de trabalho o que, ao mesmo tempo em que promove índices de iluminância acima do desejável, pode também produzir ofuscamento e desconforto. Outro questionamento possível, a partir dessa exuberância de luz natural verificada, é se a iluminação natural não poderia ser melhor administrada, o que reduziria custos com energia.

Gráficos 2. Condições de Iluminação nas escolas estaduais de São Paulo. Gráfico 3. Problemas de conforto luminoso. Fonte: ORNSTEIN, BORELLI, 1995.

A um resultado diferente chegou uma pesquisa sobre conforto ambiental nas escolas estaduais realizada pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP. Na década de 90, a Escola de Engenharia de São Carlos, sob a coordenação da arquiteta Mayume Watanabe de Souza Lima, realizou para a FDE o estudo intitulado “Caderno de Recomendações para Conforto Ambiental em projetos de escolas no estado de São Paulo” (LIMA, 1990). Para a preparação do caderno, foi realizada uma pesquisa conforme a metodologia da Avaliação Pós-Ocupação (APO) em um conjunto de escolas e os resultados relativos à iluminação estão resumidos no Anexo B, no qual se observa que, na maioria das escolas estudadas, a iluminação foi considerada boa. Entretanto, como essa qualidade está referenciada em níveis de iluminância, na apresentação dos dados não existe uma distinção clara se estes níveis são obtidos com ou sem a penetração direta da radiação solar.

Nas escolas onde a iluminação foi considerada ruim ou regular, nota-se a presença de brises de cobogó, chapas de fibrocimento ou chapa metálica. Da amostra considerada, pode-se inferir que a utilização de protetores solares ou quebra-sóis nas escolas estudadas não leva em consideração a sua influência nos níveis e na qualidade da iluminação. Como resultado do estudo foram estabelecidas recomendações para projetos de escolas no estado de São Paulo relativas ao conforto ambiental, com especificações para a iluminação natural, que foram incorporadas pela FDE em seus manuais de especificação e análise de projetos.

O estudo sugere ainda uma interação entre as variáveis de conforto ambiental (iluminação, térmica e acústica), indicando que é necessário resolvê-los em conjunto para uma otimização das condições de conforto no edifício escolar. No mesmo sentido aponta o estudo realizado por Graça e Kowaltowski (2004) que, a partir da análise dos parâmetros de conforto ambiental de 35 projetos de escolas da rede estadual de ensino na região de Campinas, aponta a necessidade de um método de avaliação e otimização de projetos arquitetônicos na fase de anteprojeto para a melhoria dos projetos de escolas.

Para os objetivos deste trabalho, essa pesquisa, além da constatação de que na maioria das escolas a orientação é leste ou oeste e que há insolação direta sobre os usuários, apresenta alguns dados interessantes sobre a iluminação:

“No conforto visual foram feitas medições dos níveis de iluminação e avaliação dos usuários. Alguns resultados foram: (a) na maioria das salas pesquisadas há distribuição não uniforme da iluminação; (b) nível de iluminação fora das recomendações... (c) manutenção precária das lâmpadas; (d) utilização padronizada do número de lâmpadas, independentemente do tamanho das salas; e (e) ofuscamento no plano de trabalho e da lousa” (GRAÇA e KOWALTOWSKI, 2004, p.21).

Apesar da constatação que esses estudos citados apontam ser a de que as escolas estaduais apresentam na sua maioria problemas de conforto ambiental, inclusive relativos à iluminação, a FDE possui um conjunto de normas e orientações gerais sobre o assunto. A exemplo das especificações para níveis de iluminação de interiores da ABNT mostrados anteriormente (Quadro 2), a FDE elaborou uma tabela de especificações para os ambientes interiores padronizados dos projetos de escolas (Tabela 1), acompanhada de algumas recomendações quanto à orientação e à insolação dos edifícios:

AMBIENTES	NÍVEL MÍNIMO DE ILUMINAMENTO	ÁREA DE ILUMINAÇÃO MÍNIMA*	ÁREA DE VENTILAÇÃO MÍNIMA*
Diretoria	300	1/5	1/10
Secretaria	300	1/5	1/10
Almoxarifado	100	1/10	1/1
Coordenação	300	1/5	1/10
Sala de professores	300	1/5	1/10
Sala de vídeo	300	1/5	1/10
Biblioteca	500	1/5	1/10
Laboratório	300	1/5	1/10
Sala de aula **	500	1/5	1/10
Sala de informática	500	1/5	1/10
Cantina	300	1/5	1/10
Cozinha	300	1/5	1/10
Refeitório	150		
Pátio coberto	150		
Grêmio	300	1/7	1/1
* em relação à área do piso do ambiente.			
** iluminação natural à esquerda da lousa ou iluminação zenital.			

Tabela 1. Tabela de resumo dos índices de iluminação por ambiente. Fonte: adaptado de FDE, 2003.

1. A orientação do edifício deve possibilitar o máximo de iluminação natural e evitar incidência direta de radiação solar na mesa e na lousa.
2. A abertura das janelas deverá estar associada à incidência de iluminação natural e trocas de ar através de ventilação cruzada.
3. A orientação do edifício deve ser analisada caso a caso, porém, genericamente, são recomendadas as seguintes orientações para fachadas envidraçadas:
Norte e Nordeste – com previsão de beiral ou marquise de aproximadamente 1,80m a partir da fachada;
Leste – com beiral ou marquise de 1,20m
Sul e Sudeste – com beiral ou marquise de 1,20m
Sudoeste – com beiral ou marquise de 1,20m
Oeste e Noroeste – com utilização de quebra sol
4. Salas de Aulas, Sala de Aula Prática (Laboratório) e Sala de Uso Múltiplo: Iluminação natural à esquerda da lousa vista de frente.
Insolação adequada: insolação até 8:30 e após as 17:30hs. Equinócios: insolação até 9:00hs e após as 17:30hs. Inverno: insolação até 9:30hs e após as 17:00hs.

As orientações sobre iluminação natural contidas nos manuais e recomendações das entidades responsáveis pela normatização de projetos para edifícios escolares no Brasil apresentam princípios gerais para guiar os projetistas na obtenção de uma boa iluminação, mas não indicam como atingir esses objetivos. O que os estudos acima citados apontam, e que se nota também na prática, é que grande parte das escolas estaduais apresenta problemas de iluminação. Com o conhecimento atual acumulado no campo da pesquisa sobre iluminação natural em arquitetura é possível estabelecer parâmetros e métodos para a obtenção de uma iluminação de qualidade em edifícios escolares que, ao mesmo tempo, colaborem para a conservação de energia em escolas. Esses conceitos devem estar amparados nos principais conceitos do campo teórico da iluminação natural, relativos à qualidade da iluminação, descritos a seguir.

2.3 A qualidade da iluminação natural – principais conceitos

Da revisão da literatura se depreende que a iluminação natural é altamente desejável para ambientes escolares porque tem um impacto positivo na saúde e no desempenho dos estudantes e também contribui para a estética e o caráter do ambiente construído. Aponta também uma tendência na qual normas e recomendações acerca da iluminação natural em escolas têm se deslocado do aspecto apenas quantitativo para o qualitativo.

Nos estudos de iluminação natural sempre houve uma clara distinção entre a quantidade e a qualidade de luz. HOPKINSON, PETHERBRIDGE, LONGMORE (1975, p. 10-11) afirmam que o projeto de iluminação natural deve ser uma combinação entre eficiência visual, conforto visual e estética, porque seus estudos partiam do conceito básico de que a adaptação dos olhos às condições de iluminação é um aspecto particular da adaptação do corpo ao meio ambiente. Alertam também para o fato de que para obter uma boa iluminação é preciso combinar a quantidade de luz necessária ao desenvolvimento de uma tarefa visual, medida em laboratórios, com uma adequada distribuição de luz que evite diferenças acentuadas entre o ambiente e o plano de trabalho, evitando-se também brilhos excessivos que constituam ofuscamento:

“Durante séculos, a iluminação natural preocupou-se mais com a aparência do que com a quantidade. Apenas durante as últimas décadas é que os princípios de engenharia sobre iluminação e fotometria, desenvolvida por físicos e engenheiros a partir de considerações sobre pequenas fontes luminosas, têm sido aplicados aos problemas de iluminação natural. Até então, os arquitetos aprendiam a situar janelas e a lidar com a iluminação natural interior a partir dos preceitos dos tratadistas de arquitetura, como Vitruvius, que descreveu a relação existente entre a colocação de janelas e os efeitos visuais no interior. O fato de a iluminação natural ter sido tratada de uma maneira quantitativa mais precisa deve-se, inicialmente, à necessidade de satisfazer, nos tribunais, as obrigações legais de um vizinho em não obstruir a luz do dia no edifício de um outro” (HOPKINSON, PETHERBRIDGE, LONGMORE, 1966, p. 25).

De forma geral, as orientações e as recomendações para a qualidade da iluminação em projetos escolares são derivados de conceitos estudados por diversos autores na área de pesquisa da iluminação natural. Para melhor compreensão desses conceitos e para formatar uma base teórica de análise da metodologia e dos resultados do ensaio experimental realizado para a pesquisa, discutimos a seguir os principais conceitos utilizados.

2.3.1 Iluminância

Iluminância é a medida da quantidade de luz que incide sobre uma superfície por unidade de área e é definida pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (1)$$

Onde:

E = iluminância (lux)

ϕ = Fluxo luminoso (Lumens)

A = área (m²)

Acuidade visual é a capacidade de discernir detalhes em uma determinada tarefa visual. Para um ponto determinado, a acuidade visual aumenta com o aumento do nível de iluminância sobre o plano de trabalho (MOORE, 1985). Existe um limite a partir do qual o acréscimo nos níveis de iluminância não corresponde a um igual acréscimo da acuidade visual (Gráfico 5 - A) e, quando associados com altos níveis de brilhos indesejados, pode causar ofuscamento e diminuir o desempenho visual³³. A relação entre iluminância e desempenho visual é mostrada no Gráfico 5 - B.

³³ Desempenho visual é a capacidade de realizar uma tarefa visual com precisão e rapidez.

Gráfico 4. Relação entre iluminância e acuidade visual (A) e iluminância e desempenho visual (B).

Fonte: International Labour Organization: www.ilo.org.

O nível de iluminância adequado para cada tarefa visual é resultado de medições em laboratório e está expressa em códigos e normas internacionais. A norma brasileira NBR-5413 (1991) reproduz os níveis indicados nas normas internacionais, porém se refere apenas à iluminação artificial. A norma brasileira de iluminação natural NBR-15215 (2005) não especifica quantidades de luz natural mínimas necessárias. Algumas normas internacionais, como a norma alemã DIN 5034 -1 (1985, p.3) entendem que, devido às características superiores de iluminação da luz natural, sua quantidade mínima necessária pode ser estimada como sendo 60% dos níveis estipulados para a luz artificial.

A luz natural ocorre em níveis muito mais altos do que a luz artificial no interior dos edifícios. A luz do sol atinge 100.00 lux ou mais, enquanto que a iluminância interna fica geralmente abaixo dos 1.000 lux. Toda 'medida' da tecnologia da iluminação visa a evitar níveis de iluminância muito baixos e as normas estabelecem níveis mínimos de iluminância que, por serem mínimos, podem com certeza ser ultrapassados. E quais seriam os limites superiores? As pessoas geralmente consideram 500 lux em ambientes internos como 'muito claro' e 5.000 lux em ambientes externos como 'muito escuro' (ÇAKIR, ÇAKIR, 1998).

2.3.2 Luminância

Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975, p.13) diferenciam o brilho físico de um objeto, que pode ser medido por um fotômetro, e o brilho subjetivo desse objeto, visto pelos olhos adaptados aos ambientes. Para eles, a palavra luminância deve ser usada para especificar a quantidade física de brilho.

A visão está relacionada com luminâncias, contrastes e brilho das superfícies no campo de visão. O que percebemos não é a iluminância sobre uma superfície, mas a luz que sai dessa superfície, ou seja, a luminância dessa superfície. Para avaliar com precisão o ambiente visual, é preciso entender essa diferença. Um bom ambiente de iluminação não é aquele que tem apenas níveis adequados de luz (iluminância) para realizar a tarefa, mas também que não possui contrastes excessivos e áreas de brilho no campo de visão (SCHILLER, JAPEER, 1999). Esta luminância pode ser expressa como:

$$L = \frac{I}{A \cos a} \quad (2)$$

Onde:

L = luminância (cd/m²)

I = Intensidade luminosa (em cd)

A = área projetada, em m²

a = ângulo considerado, em graus

Para uma determinada superfície difusa, a luminância está relacionada com a refletância e a densidade desta superfície. A partir do conceito de iluminância média no plano de trabalho (método dos lumens), é possível converter estes valores em valores de luminância média relacionando-os com os valores das refletâncias das superfícies no interior de um ambiente:

$$L = \rho \frac{E}{\pi} \quad (3)$$

Onde:

L = Luminância (cd/m²)

ρ = refletância ou coeficiente de reflexão

E = iluminância sobre esta superfície (lux)

2.3.3 Uniformidade e diversidade

Os níveis de iluminância e sua distribuição na área da tarefa e no seu entorno determina a eficiência da tarefa visual. Para avaliar esta distribuição, o “Code for Interior Light” da CIBSE (1994) na seção 4.5.3 sugere dois índices:

Uniformidade: conceito geralmente aplicado na avaliação da distribuição de luminâncias sobre o plano da tarefa, pode ser avaliada pela distribuição balanceada dos níveis de iluminância. Quanto mais uniforme a iluminação sobre o plano de trabalho, melhor balanceada será a luminância no espaço adjacente. Este índice é entendido como a relação entre a iluminância mínima e a iluminância média e não deve ser menor que 0,8:

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\text{med}}} \quad (4)$$

Diversidade: é a medida da variação da iluminação sobre o plano de trabalho. Se a diversidade de iluminância for muito grande, o espaço poderá ser percebido como muito disperso pelo usuário e se esta variação for muito pequena, poderá ser percebido como desinteressante e monótono. É expressa como a relação entre iluminância mínima sobre a máxima e não deve exceder a relação de 1 / 5:

$$D = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \quad (5)$$

Entretanto, esses conceitos são geralmente aplicados para avaliação da iluminação artificial e sua aplicação para a iluminação natural deveria ser analisada. Uma forma de avaliação da variação da iluminação em espaços iluminados naturalmente pode ser feita com a medida da variação do FLD, que relaciona a iluminação interna e externa para um espaço determinado. Isso permite que o índice de uniformidade seja dependente da geometria do ambiente e das aberturas (forma, posição, altura do peitoril e do pé-direito), das refletâncias das superfícies interiores, do sistema de envidraçamento e das obstruções externas:

$$U_N = \frac{FLD_{\min}}{FLD_{\max}} \quad (6)$$

2.3.4 Contraste

O contraste é a diferença relativa de brilho entre o objeto e seu entorno. Pode ser expresso em termos de luminância, iluminância e refletividade entre as superfícies. Diferenças de luminância significam contraste de cores. Conforme a definição de Egan e Olgyay (2002, p. 18), contraste é devido à diferença de luminâncias e pode ser assim expresso:

$$C = \frac{(L_{\text{objeto}} - L_{\text{fundo}})}{L_{\text{fundo}}} \quad (7)$$

Onde:

C = contraste

L_{objeto} = luminância do objeto ou tarefa

L_{fundo} = luminância do entorno

Ainda segundo Egan e Olgyay (2002, p.18), o contraste é um “elemento vital para a percepção visual eficiente”, necessário entre o objeto ou a tarefa e seu entorno imediato, mas não entre o objeto e seu entorno ambiental e o campo total de visão.

Conforme Benya et al. (2003, p.2-5) existem basicamente três tipos de contrastes:

- contraste de brilho: resultado da quantidade de luz refletida ou emitida por uma superfície, como as devidas às variações de sombra, mudanças entre o contraste de cores claras e escuras ou forma e textura de uma superfície.
- contraste de padrões: mudança de percepção de um padrão reconhecido.
- contraste de cor: baseado na justaposição de cores próximas. Pares de cores complementares, como verde e vermelho, azul e amarelo, resultam em maior contraste visual.

O aumento do contraste entre o objeto e seu entorno aumenta a sua visibilidade sem necessidade de iluminação adicional. O aumento excessivo de contraste produz ofuscamento. O manual do IESNA (2000) estabelece as proporções recomendáveis de contraste dentro de um mesmo campo visual:

Tarefa visual e superfície de trabalho – 3:1

Tarefa visual e espaço circundante – 10:1

Entre fonte de luz e fundo – 20:1

Máxima diferença no campo visual – 40:1

2.3.5 Ofuscamento

Segundo Robbins (1986) o conforto visual pode ser avaliado em linhas gerais com base no contraste e no ofuscamento. A CIE³⁴ define ofuscamento como sendo "... a condição de visão na qual existe desconforto ou redução na habilidade de ver detalhes ou objetos, causados por uma inadequada distribuição de luminâncias ou por contrastes extremos". "O olho humano pode se adaptar a uma grande variação de ambientes luminosos, desde a luz das estrelas (0,03 cd/m²) até a de um dia de céu claro (10.000 cd/m²), mas não pode funcionar muito bem quando uma variação tão extrema de níveis de brilho está presente no campo visual *ao mesmo tempo*" (ROBBINS, 1986, p.235).

Ofuscamento depende do contexto: "O ofuscamento é uma forma de ruído visual – uma luz não desejável! Em um contexto diferente, uma fonte (de luz) que parecia ofuscante pode não interferir com as nossas necessidades de informações visuais. Nesta situação, a luz pode ser atrativa e desejável. Pode ser descrita como brilho e não como ofuscamento" (EGAN e OLGAY, 2002, p.10).

Para Hopkinson (1975, p.17-18), um brilho intenso é favorável à boa visão, mas um brilho intenso indesejável, que ele denomina de "encadeamento", é prejudicial. Para ele, encadeamento, ou ofuscamento, é "uma adaptação desfavorável para uma boa visão" (p.18). Quando ocorre essa adaptação desfavorável, a visão pode ser prejudicada de duas maneiras. A primeira, denominada por Hopkinson de "incapacidade visual por encadeamento" ocorre quando outros objetos no campo visual são mais brilhantes do que a tarefa visual essencial. Também definido por Moore (1991) como ofuscamento desabilitador ou fisiológico, impede a visão sem necessariamente causar desconforto. Produz o efeito de "véu": brilho muito intenso no campo visual que reduz os contrastes entre os objetos impedindo a sua distinção (Figura 9). Em ambientes com iluminação natural isso pode ocorrer com a visão direta ou refletida da luz intensa da abóbada celeste ou da luz direta do sol. A segunda forma, denominada por Hopkinson de "desconforto visual por encadeamento", é o ofuscamento que causa desconforto

³⁴ Comission Internationale d'Éclerage

psicológico, porém não impede a visão dos objetos. Fontes brilhantes no campo visual em contraste com fundo mais escuro acarretam grande diferença de luminâncias no campo de visão e pode ocorrer fadiga visual pelo esforço de adaptação do olho. Segundo Tregenza (1999, p.72), “concentrar-se em uma tarefa quando há uma fonte muito brilhante em outra parte do campo de visão pode causar desconforto. Tentamos evitar olhar para a fonte de luz, ou semicerrar os olhos, ou manter uma posição da cabeça que minimize a iluminação na face. Durante um curto período de tempo, podemos não perceber, mas existe uma tensão crescente e desconforto muscular. No longo prazo, o desempenho da tarefa é afetado...” (tradução nossa).

Figura 9 – Reflexão especular: brilho intenso impede a visão da escala na régua de metal (A). Ofuscamento desabilitador: brilho intenso no campo visual impede a visão da tarefa (efeito de véu) (B). Fonte: Tregenza e Loe, 1998.

2.3.5.1 Índices de ofuscamento:

Apesar de o ofuscamento ser uma resposta subjetiva às condições de iluminação que não pode ser quantificada (ROBBINS, 1986), estudos foram feitos da variação de contrastes e a resposta das pessoas a essa variação. Para dar uma interpretação quantitativa para o desconforto causado pelo ofuscamento, foram desenvolvidos algoritmos³⁵ que levam em consideração as variáveis que interagem entre o mecanismo da visão e o ambiente luminoso. Eis os mais importantes:

³⁵ Processo de cálculo, ou de resolução de problemas semelhantes, em que se estipulam regras

VCP – Visual Comfort Probability (Probabilidade de Conforto Visual), desenvolvido pelo IES – Engineering Illuminating Society - e utilizado principalmente nos Estados Unidos. Conforme DiLaura, Guth, IES, apud Schiler (2000), esse índice é uma estimativa de quantas pessoas em 100 se sentiriam confortáveis em um ambiente visual. Baseado no cálculo do brilho relativo de um sistema de iluminação do ponto de vista de um determinado ângulo, seus dados experimentais estão relacionados apenas a luminárias com refletores. Portanto, seu uso em outros sistemas de iluminação deve ser cauteloso (BENYA et al., 2003). Esse índice pode ser expresso matematicamente por:

$$VCP = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{6.374 - 1.327(\ln DGR)} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (8)$$

Onde:

DGR= Daylight Glare Index (Índice de Desconforto por ofuscamento)

t= tempo

$$DGR = \left(\sum_{i=1}^n M_i \right)^{n^{-0.0914}} \quad (9)$$

Onde:

M_i = índice de sensação para cada fonte

n = número de fontes de luz dentro de um campo visual

UGR – Unified Glare Rating (Índice de Ofuscamento Unificado), adotado pela CIE. Segundo Tregenza (1998, p.72), é utilizado para medir o desconforto visual por ofuscamento para fontes relativamente pequenas, como luminárias, e pode ser definido pela equação:

$$UGR = 8 \log \left[\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right] \quad (10)$$

Onde:

L= luminância da fonte de ofuscamento

L_b = luminância do fundo da fonte

ω = tamanho da fonte de ofuscamento, medido como ângulo sólido³⁶ a partir do observador

p= índice que quantifica a posição da fonte em relação à direção de visão.

Conforme aumenta o valor do UGR aumenta o nível de desconforto, sendo que valores abaixo de 10 são imperceptíveis e acima de 28 intoleráveis. Como observa Tregenza (1998, p.72), a equação permite algumas conclusões:

- conforme aumenta a luminância e o tamanho da fonte, o ofuscamento aumenta;
- quando o brilho do fundo aumenta ou a fonte é movida para fora do campo de visão, o ofuscamento diminui;
- os valores de luminância (L) e o índice de posição (p) estão elevados ao quadrado, o que significa que uma pequena modificação nestes valores acarreta um grande efeito na proporção de ofuscamento;
- o símbolo de somatória (Σ) indica que quando há várias fontes no ambiente, a luminância, o tamanho e o índice de posição de cada fonte são combinados, somados e inseridos na fórmula (TREGENZA, 1998, p.73).

As equações acima descritas são geralmente utilizadas para a análise de iluminação artificial ou de pequenas fontes de iluminação. Para fontes maiores de iluminação, como janelas, foi desenvolvido um algoritmo que é fruto do trabalho de vários pesquisadores ao longo dos anos (Fischer, 1970, Luckiesh e Gguth, 1949, Peterbridge e Hopkinson, 1950, Chauvel et al., 1980 apud Robbins, 1986):

³⁶ “...ângulo sólido é definido como a porção de espaço compreendida dentro de uma superfície

DGI – Daylight Glare Index (Índice de Ofuscamento por Luz Natural) e **GI** - Glare Index (Índice de Ofuscamento), também conhecido como fórmula de Cornell. Inicialmente é calculada a constante **G**, “que é a expressão do ofuscamento causado por qualquer fonte individual de luz, baseada na relação entre a luminância da fonte e a do fundo” (ROBBINS, 1986, p.237):

$$G = K \left[\frac{L_s^{1.6} \cdot \Omega^{0.8}}{L_b + (0.07 \cdot \omega^{0.5} \cdot L_s)} \right] \quad (11)$$

Onde:

K= constante que depende da unidade de medida e da fonte de luz

L_s = brilho da fonte de luz

L_b = brilho da luz de fundo

Ω = ângulo sólido subtendido pela fonte de luz, modificado pela posição da fonte de luz em relação ao campo de visão

ω = ângulo sólido da fonte em relação ao olho

Essa equação “pode ser aplicada a qualquer fonte de luz de forma que uma constante de ofuscamento G é determinada para cada fonte potencial de ofuscamento dentro do campo de visão. As constantes de ofuscamento para todas as fontes são então somadas para determinar o Índice de Ofuscamento, que pode ser expresso por:

$$GI = 10 \log_{10} \Sigma G \quad (ROBBINS, 1986, p. 237). \quad (12)$$

Figura 10. Fontes de ofuscamento em uma sala de aula devido ao tamanho e posicionamento das aberturas. Fonte: Autor.

A previsão de fontes potenciais de ofuscamento com o uso dessas equações continua a ser desenvolvida e debatida (VOSS, 2003). Para os projetos de arquitetura, uma questão importante é compreender como o ofuscamento ocorre no interior dos edifícios e o que pode ser feito para evitá-lo. Ainda segundo Robbins (1986), o excessivo brilho da luz natural por si só não é a razão pela qual o ofuscamento se torna um item importante a ser considerado em projeto, e sim o fato de que janelas são usadas para iluminação e para a visão do exterior ao mesmo tempo. Para prever e evitar problemas de ofuscamento no interior de edifícios, Robbins aponta algumas medidas de controle:

- “planejar a localização das posições de trabalho ou estudo de forma que os usuários sob condições normais de trabalho não tenham uma visão direta do céu;
- reduzir a visão do céu usando beirais, brises, prateleiras de luz, marquises e outros elementos de proteção;
- não colocar tarefas visuais precisas sob luz solar direta ou onde a visão do sol numa superfície interior esteja dentro do campo de visão;
- colocar mais de uma abertura em superfícies diferentes ajuda a reduzir o impacto do ofuscamento de uma abertura, ajudando a aumentar o brilho total interior de um espaço e reduzindo o contraste entre o céu e o interior;
- colocar a abertura de forma que as superfícies imediatamente adjacentes tenham alta luminância ajuda a diminuir o desconforto visual por ofuscamento;
- reduzir a luminância do plano da abertura usando protetores solares internos;
- aumentar o brilho do entorno das aberturas modificando o formato das janelas e usando acabamentos claros;
- detalhar o peitoril, caixilho e acessórios para produzir um contraste gradativo em

vez de acentuado quando o céu pode ser visto através das aberturas;” (ROBBINS, 1986, p.244-246).

Figura 11. À medida que diminuem as aberturas, aumenta o contraste destas com o teto, a parede frontal e as paredes laterais, aumentando a probabilidade de ofuscamento. Fonte: London Metropolitan University - www.londonmet.ac.uk.

2.3.6 O fator de luz do dia

Conforme sintetiza Robbins (1986, p. 172), o conceito de fator de luz do dia é fruto do trabalho de um grande número de pesquisadores durante mais de setenta anos, sendo que na forma em que é usado hoje é resultado principalmente das pesquisas de Waldram (1923, 1944), da equipe do BRE³⁷ e do trabalho de Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975).

Na definição de Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975, p. 92) o fator de luz do dia é “o quociente entre a iluminação natural num ponto de um plano devido à luz recebida, direta ou indiretamente, de um céu com uma distribuição de luminâncias suposta ou conhecida, e a iluminação num plano horizontal devida a um hemisfério não obstruído do mesmo céu. A luz solar direta exclui-se de ambos os referidos valores de iluminação”.

³⁷ British Research Establishment.

Segundo a norma brasileira de iluminação natural (ABNT, 1991, Parte 3, p.2) e também a norma DIN 5034 (Parte 1, p.2), o fator de luz do dia pode ser definido por:

$$\text{FLD (DF)} = \frac{E_p}{E_e} 100\% \quad (13)$$

Onde:

E_p = iluminância em um ponto interno

E_e = iluminância em um plano externo horizontal desobstruído

Segundo Moore (1991), se a condição de céu sob a qual o FLD estiver sendo avaliado for o céu encoberto padrão CIE, então o FLD permanecerá constante independentemente da iluminância absoluta externa. Se for utilizado com outras condições de céu que não esta, então o tipo de céu deverá ser especificado. “O termo também é aplicado informalmente para a relação entre as iluminâncias horizontais interior e exterior no plano do sistema de aberturas; sob condições de céu claro, o FLD (DF) só permanecerá constante para um sistema de aberturas totalmente difuso...” (MOORE, 1991, p.278).

2.3.6.1 O fator de luz do dia médio

Na sua concepção original, o FLD foi pensado para a determinação da quantidade de iluminância em um ponto sobre um plano de trabalho no interior de um ambiente. O FLD varia para cada ponto analisado dentro de um ambiente porque “vê” uma parcela de céu e obstrução exteriores diferentes. Para dar conta da variabilidade do FLD e para tentar relacioná-lo com o efeito tridimensional da iluminação, alguns autores definem o FLD médio como sendo a média dos FLD de uma área determinada de um ambiente - geralmente a superfície de trabalho horizontal mais as superfícies verticais das paredes sob o peitoril das janelas. Segundo Tregenza e Loe (1998, p.136) o FLD médio pode ser expresso pela fórmula:

$$\bar{D} = \frac{A_g}{A} \frac{\theta \tau}{(1 - \rho^2)} \quad (14)$$

Onde:

A_g = área envidraçada

A = área total das superfícies internas, piso, paredes, teto e janelas;

θ = ângulo da porção de céu visível

τ = transmitância³⁸ do vidro para luz difusa

ρ = refletância³⁹ média das superfícies internas

A percepção que as pessoas têm da iluminação de um ambiente não está baseada somente na visão do plano de trabalho e sim em todo o seu campo de visão e a percepção que têm do aspecto da luz depende da relação entre o brilho das superfícies interiores com a visão do espaço exterior e não só da quantidade absoluta de luz. Assim, a importância do FLD médio é que permite relacionar o total da luz inter-refletida interna com o céu visível, podendo fornecer uma referência de como será a aparência de um ambiente com luz natural. (TREGENZA e LOE, 1998, p.37-38). Este método pode também ser usado nos estágios iniciais de projeto para calcular a área envidraçada necessária a partir de um FLD dado, geralmente estabelecido por normas e códigos (como vimos anteriormente no item 2.2.2), bastando para isso reescrever a fórmula:

$$A_g = \frac{\bar{D}}{\theta_\tau} (1 - \rho^2) \cdot A \quad (15)$$

Como a aparência dos espaços interiores depende principalmente da relação de luz e brilho com os espaços exteriores, nossa percepção da iluminação interna é influenciada pelo brilho do céu e outras superfícies vistos através das aberturas. Segundo Tregenza, o FLD médio pode ser um bom indicador

³⁸ Num sistema que recebe energia radiante, fração dessa energia que é transmitida pelo sistema.

da aparência dos espaços interiores, correspondendo às descrições subjetivas que são feitas para estes mesmos espaços, conforme indicado no Quadro 4 e que pode ser visualizado na figura 12 (TREGENZA e LOE, 1998, p. 78-79).

Figura 12 – Aspecto da iluminação natural de um espaço interno com 2% (A) e outro com 5% de FLD (B). Fonte: London Metropolitan University: www.learn.londonmet.ac.uk.

FLD (Daylight Factor)	APARÊNCIA DO ESPAÇO INTERNO
5%	aparência de iluminação natural brilhante uso de iluminação elétrica durante o dia geralmente não é necessário altos níveis de luz natural podem ser associados com problemas térmicos
2 % < 5 %	aparência de iluminação natural, mas a iluminação elétrica poderá ser usada em ambientes de trabalho. Seus objetivos são:- aumentar a iluminância de superfícies distantes das janelas- reduzir o contraste com a visão para o exterior o uso de iluminação natural com iluminação elétrica suplementar geralmente é a melhor opção de eficiência energética
< 2 %	aparência de sombra a iluminação elétrica é necessária e pode ser dominante janelas podem propiciar visão para o exterior mas só fornecem iluminação local

Quadro 3. Relação entre o FLD e o aspecto da iluminação de um espaço interno. Fonte: Tregenza e Loe (1998). Imagens: Xtralite Rooflights - www.xtralite.co.uk.

³⁹ Relação entre o fluxo luminoso refletido por uma superfície e aquele que incide sobre ela.

2.3.6.2 Relação entre FLD e refletância

teto	paredes								
	0.3			0.5			0.7		
	pisso			pisso			pisso		
	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5
0.5	1.10	1.12	1.15	1.19	1.22	1.24	1.28	1.32	1.35
0.7	1.20	1.21	1.25	1.29	1.32	1.35	1.39	1.43	1.48
0.9	1.28	1.31	1.35	1.38	1.42	1.47	1.51	1.56	1.61

Figura 13. Relação entre a variação das refletâncias das superfícies internas e a variação do FLD. Fonte: London Metropolitan University: www.learn.londonmet.ac.uk.

O FLD médio é um índice do edifício, portanto varia conforme sua geometria, forma, orientação, posição e tamanho das aberturas. Outro fator que o influencia é a refletância das superfícies internas. Segundo Hopkinson (1975, p. 14), “a refletância exprime a proporção de fluxo luminoso incidente sobre uma superfície que é refletida na direção do observador, para dar à superfície a sua luminância”. Esta proporção geralmente é expressa em porcentagem ou fração, tendo-se como referência que uma superfície totalmente branca teria uma refletância de 100% e uma totalmente negra de 1%.

A figura acima ilustra a variação do FLD médio medido no centro de um ambiente de 5x8 m e 3m de pé-direito. A figura A mostra a combinação das menores refletâncias piso-parede-teto (0.1, 0.3 e 0.5), resultando em um FLD de 1.10 e a figura C mostra a combinação das refletâncias mais altas (0.5, 0.7 e 0.9), resultando em um FLD de 1.61. A utilização de superfícies claras é um item importante para a otimização da luz natural que penetra nos espaços interiores.

3. METODOLOGIA

“Embora a argumentação pela indução a partir de experiências e observações não seja a demonstração de conclusões gerais, ainda assim é o melhor caminho de argumentação que a natureza das coisas admite (...)” (NEWTON, 1730).

O objetivo desse trabalho foi analisar estratégias de iluminação natural utilizadas nos estágios iniciais do projeto de arquitetura capazes de aumentar a qualidade da iluminação e a conservação de energia nos edifícios escolares. Essas estratégias têm sido aplicadas com sucesso em edifícios escolares em vários países, melhorando o desempenho e o bem-estar dos estudantes e conservando energia.

Entre essas estratégias, o autor selecionou um dispositivo zenital para iluminação natural com seleção angular e difusores opacos, de construção simples e custo adequado, de acordo com a realidade das escolas públicas brasileiras. Com esse dispositivo foi realizado um ensaio experimental em um modelo físico reduzido de uma sala de aula padrão, sob condições de céu real e foram analisados comparativamente os resultados.

3.1 Definição do ensaio

A luz direta do sol sobre os planos das mesas, carteiras e lousas é causa de ofuscamento e desconforto e, portanto, deve ser evitada. Os sistemas de janelas freqüentemente empregados em escolas não costumam ter controles da radiação solar direta ou utilizam protetores como persianas, cortinas, brises e cobogós, que reduzem drasticamente a luz natural, fazendo quase sempre com que a iluminação elétrica permaneça acesa durante a maior parte do dia. No intuito de otimizar o aproveitamento da luz natural no modelo proposto, foi projetado um sistema de iluminação zenital compatível com as tipologias padrão de projetos para edifícios escolares da FDE. Desta forma, o sistema proposto pode ser aplicado tanto em edifícios existentes como em novos projetos. O sistema zenital é composto

por dispositivos com seleção angular e difusores opacos que promovem um adequado controle da radiação solar para evitar a incidência direta da luz do Sol, evitando o ofuscamento e aquecimento dos ambientes de salas de aula em climas quentes, ao mesmo tempo que permite aproveitar a iluminação natural, tanto difusa quanto direta refletida, proporcionando maior conforto visual e economia de energia.

O objetivo do ensaio no modelo físico reduzido foi analisar o sistema proposto sob condições de céu real para avaliar a influência de sistemas de obstrução à prova de penetração solar combinados com refletores opacos na distribuição e controle da luz e nos níveis de iluminação interna, otimizando o uso da luz natural como fonte principal de iluminação. Foram utilizados os métodos da geometria da insolação e do traçado de máscaras de sombra para a concepção e o dimensionamento do sistema zenital e para o tratamento da abertura lateral. O sistema assim projetado foi ensaiado com medições sucessivas sob condições de céu real para a determinação de curvas de iluminância isolux e do FLD. Ao mesmo tempo, a observação visual e fotográfica do modelo permitiu uma análise da qualidade da iluminação interna e a verificação de possíveis fontes de ofuscamento que pudessem causar desconforto.

3.2 Definição do modelo

Para o estudo das características da iluminação citadas acima, optou-se por construir um modelo em escala. Conforme afirma Bryan (1988, p. A1), historicamente existem três tipos de ferramentas para prever a iluminação natural interna aos edifícios: os métodos computacionais, os métodos gráficos e os modelos em escala. Para os objetivos deste trabalho, de fazer uma análise quantitativa e qualitativa da iluminação natural nos estágios iniciais do projeto de arquitetura, o uso do modelo em escala apresenta algumas vantagens em relação aos outros métodos. Segundo vários autores (Bryan, 1982, Robins, 1986, Lam, 1977, Moore, 1991, Egan e Olgyay, 2002) o uso de modelos apresenta vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- devido ao tamanho muito reduzido do comprimento das ondas da radiação visível, não é necessário nenhum fator de correção de escala.
 - maneira simples, didática e barata, de prática comum em escolas e escritórios de arquitetura, permite a avaliação de formas arquitetônicas complexas.
 - permite uma avaliação rápida de modificações na geometria, materiais, aberturas e dispositivos de iluminação natural.
 - permite a análise qualitativa, com observação visual direta ou fotografia, oferecendo informações para a correção de problemas relativos ao conforto visual.
- Um dos principais usos de modelos de iluminação natural é fornecer informações sobre contraste e ofuscamento em um espaço. “De fato, modelos em escala são um dos poucos meios disponíveis para julgar de forma precisa os aspectos qualitativos de sistemas de iluminação natural” (ROBBINS, 1986, p. 221).
- permitem a avaliação quantitativa de iluminâncias e luminâncias, principalmente na comparação entre elementos de projeto, e o resultado pode ser utilizado na projeção da iluminação artificial.
 - pode ser utilizado na análise de outros aspectos da iluminação natural em um edifício, como a composição espacial, distribuição da luz, cores, materiais, arranjo do mobiliário.

Desvantagens:

- deve representar de maneira precisa as características dos materiais e detalhes espaciais, o que pode encarecer o modelo.
- as características dos materiais são difíceis de representar em escala, principalmente em relação a sua textura, o que pode levar a erros de análise quantitativa.

a integração da iluminação artificial é difícil em modelos em escala reduzida.

Portanto, a escolha da utilização de modelos reduzidos para a análise da iluminação natural deve ser condicionada aos objetivos desta análise. Conforme afirmam Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975, p. 261), a escolha entre os diversos métodos de previsão da luz natural está relacionado com o problema específico que se quer resolver ou estudar. Assim, “o problema poderá tratar-se a

partir de princípios básicos por um método de cálculo ponto a ponto, por vezes muito trabalhoso, podendo dar resultados de uma precisão provavelmente desnecessária para requisitos visuais no edifício”. “Todavia, recomenda-se insistentemente que se o projeto de iluminação natural tiver importância suficiente para justificar uma investigação ampla, o tempo disponível não deve ser consumido em cálculos complexos desnecessários. Nessas circunstâncias, é sempre preferível construir um modelo reduzido de um sistema de fenestração e examiná-lo sob o céu natural ou em céu artificial” (HOPKINSON, 1975, p. 262). Essa análise deverá, sempre que possível, utilizar uma integração entre os diversos métodos. Como afirma Robbins:

“Ao projetar e analisar as características de desempenho de um sistema de iluminação natural, a equipe de projeto deveria usar conjuntamente a modelagem matemática e física para estabelecer as características de desempenho da iluminação do projeto do edifício. A análise matemática pode ser utilizada para estabelecer as características de desempenho gerais, padrões de iluminação e conforto visual, enquanto que os modelos em escala podem ser utilizados para refinar o conceito de projeto e para estabelecer a relação entre a iluminação natural e outros itens de projeto como a arquitetura de interiores, o layout e a divisão do espaço interno e conforto visual. Os resultados da análise no modelo reduzido podem então ser utilizados, juntamente com os dados matemáticos, para estabelecer critérios para a análise econômica e de consumo de energia” (ROBBINS, 1986, p.221).

Pesquisas recentes (PEREIRA, 2006) têm confirmado que podem ocorrer erros consideráveis nas medições de iluminância em modelos em escala reduzida, principalmente pela dificuldade de controle de todas as variáveis que envolvem a reprodução fiel da realidade. Para o presente trabalho, entretanto, considerou-se adequado o seu uso pelas vantagens que apresenta na análise dos aspectos qualitativos da iluminação natural.

3.2.1 Critério de seleção

Como a rede estadual de ensino compõe-se atualmente de cerca de 7000 edifícios escolares de diversas épocas e tipologias arquitetônicas, uma investigação de campo seria pouco conclusiva para os objetivos deste trabalho. Optou-se então por utilizar um modelo preditivo que representasse as condições reais de uma sala de aula padrão utilizado na maior parte dos projetos de escolas. Como existe uma forte tendência à padronização das características dimensionais das salas de aula no estado de São Paulo, foram adotadas para o modelo as dimensões de uma sala de aula padrão (FDE, 2003). Portanto, a análise não considera a variação dessas características dimensionais e sim as possibilidades de melhoria das condições de iluminação natural com a otimização das aberturas.

Figura 14. Foto de sala de aula padrão FDE. Fonte: ArcoWeb, 2005.

Figura 15. Desenho em planta de sala de aula padrão FDE. Fonte: FDE, 2003.

4. ENSAIO E LEVANTAMENTO DE DADOS

4.1 Descrição do modelo

Figura 16 – Projeto do modelo físico em escala reduzida de uma sala de aula padrão. Fonte: Autor.

Foi construído um modelo reduzido na escala 1:10, em madeira compensada de espessura de 10 mm, pintado com a cor preta na parte externa para evitar qualquer penetração de luz a não ser pelas aberturas projetadas. Na parte interna procurou-se reproduzir o mais fielmente possível o acabamento das superfícies para que suas refletâncias fossem muito próximas do real. As refletâncias escolhidas foram 0,85 para o teto e as paredes e 0,50 para o piso. Também foram reproduzidos o mobiliário e a lousa nas cores e texturas utilizadas como padrão na rede estadual de ensino. A sala definida para o modelo tem as dimensões de 720mm x 720 mm e pé direito de 300 mm. A iluminação natural na sala de aula padrão é feita através de janela lateral modulada. Procurou-se manter o tamanho máximo de 720 mm de largura por 160 mm de altura, resultando a altura do peitoril de 110 mm. Foram reproduzidas as dimensões e a modulação padrão dos caixilhos, conforme o Caderno de Componentes da FDE, porém não foram incluídos vidros por dificuldade de sua reprodução na escala reduzida do modelo, optando-se por aplicar um fator de correção posteriormente aos resultados obtidos na medição, referente a um vidro comum transparente de 3mm de espessura.

Para a comparação entre algumas alternativas de projeto, foram construídos dois tipos de cobertura: uma plana e outra com o sistema zenital projetado. Também foram construídos protetores solares horizontais e verticais e difusores para as orientações Norte e Sul, de forma que pudessem ser alternados durante as séries de medições.

4.1.1 Definição dos protetores solares

Para a qualidade da iluminação natural, conforme indicado na revisão bibliográfica, uma variável importante a ser considerada no projeto arquitetônico é impedir a penetração direta de raios solares sobre o plano de trabalho, o que pode causar ofuscamento e fadiga visual e também constituir uma fonte de aquecimento indesejado durante o verão. Outro item importante é a limitação da visão direta da abóbada celeste a partir do interior do ambiente porque o alto contraste de luminâncias pode ser fonte de ofuscamento. Ao mesmo tempo, é importante preservar a visão do ambiente exterior, que influencia a percepção do espaço interno.

Para atingir esses objetivos e também permitir que a análise fosse feita apenas a partir da relação entre iluminação difusa interna e externa, foram projetados protetores solares para as orientações Norte e Sul. Para a orientação Norte foi projetado um protetor solar horizontal que permite a obstrução total da radiação solar durante todo o ano e durante todo o período de funcionamento do edifício (Figura 18). Para a orientação Sul foi projetado um protetor solar vertical para impedir a penetração indesejável de radiação solar no verão no início da manhã e no final da tarde (Figura 20).

No cálculo dos protetores solares foi utilizado o programa SolarTool⁴⁰, desenvolvido pelo Dr. Andrew J. Marsh, com os dados das cartas solares para São Paulo com Latitude 23° 30' S e Longitude 46° 37'W (Figuras 17 e 19).

⁴⁰ Disponível em: Square One: <http://www.squ1.com/solartool> .

Stereographic Diagram

Location: -23.3°, -46.4°
 Sun Position: 99.0°, 88.8°
 HSA: 99.0°
 VSA: 90.1°

Figura 17 – Carta solar para o cálculo do protetor solar para a orientação Norte. Fonte: Autor.

(A)

(B)

Figura 18—Quebra-sol horizontal no modelo (A) e no projeto feito com o programa SolarTool(B).
 Fonte: Autor.

Stereographic Diagram

Location: -23.3°, -46.4°
Sun Position: -98.7°, 48.4°
HSA: 81.3°
VSA: 82.3°

Figura 19 – Carta solar para o cálculo do protetor solar orientação Sul. Fonte: Autor.

(A)

(B)

Figura 20 – Brise vertical no modelo (A) e no projeto feito com o programa SolarTool (B).Fonte: Autor.

4.1.2 Definição dos elementos zenitais com seleção angular

Ao contrário do que ocorre em países de clima frio e temperado com céus pouco luminosos, nos países tropicais a utilização de grandes janelas laterais e fachadas envidraçadas sem proteção causa alguns problemas de conforto:

“- um grande acoplamento térmico com o exterior, o qual significa um grande aumento da temperatura interna acompanhando a variação externa; aumento dos ganhos de calor internos pela penetração de radiação solar que se converte em energia térmica no interior; aumento de desconforto visual, por ofuscamento e contrastes, produzido pelo ingresso de radiação solar direta” (CORBELLA, YANNAS, 2003, p. 244).

Além disso, conforme Corbella e Yannas (2003), a utilização de iluminação lateral “quando provinda de um só lado, causa um problema de distribuição da luz, que decresce rapidamente com a profundidade do cômodo”. A utilização de dispositivos para iluminação zenital pode propiciar uma distribuição mais uniforme da luz natural desde que protegidos para não causarem aumento excessivo da carga térmica. Em relação à carga térmica, Moore (1985, p.91) enfatiza que a luz natural, tanto a direta do sol como a difusa do céu, produz menos calor por unidade de energia do que as lâmpadas elétricas disponíveis comercialmente⁴¹. Portanto, “para uma mesma quantidade de luz, elementos zenitais podem introduzir menos carga térmica do que a iluminação elétrica, desde que toda a luz natural possa ser efetivamente usada e distribuída” (MOORE, 1985, p.91).

Uma das formas de otimizar o uso e a distribuição da luz natural advinda de um dispositivo zenital é a reflexão dessa luz em múltiplas superfícies. Para isso é possível, por exemplo, utilizar difusores brancos opacos. Segundo Moore (1985, p.96) esta estratégia é capaz de dobrar a iluminância interna, comparada com a utilização isolada de elementos zenitais transparentes.

⁴¹ “...aproximadamente 125 lumens por watt para a luz do sol e do céu comparado com 65 para lâmpadas fluorescentes, 30 para lâmpadas incandescentes e 110 para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão” (MOORE, 1985, p.91) .

4.1.2.1 Dimensionamento dos difusores:

Figura 21. Mount Airy Library, Carolina do Norte, projeto de Edward Mazria. Fonte: www.mazria.com

Moore (1985, p.96-98) descreve um dispositivo zenital utilizado por Mazria (1981) no projeto da Mount Airy Library (Figuras 21 e 22). Esse dispositivo é composto por um painel de vidro vertical combinado com beiral e difusores verticais internos. Esse dispositivo é dimensionado a partir de ângulos de corte (ou seleção angular) para barrar toda a penetração direta do sol. Moore apresenta um procedimento baseado na geometria euclidiana para o desenho desse dispositivo. No decorrer da pesquisa para esta dissertação percebeu-se que esses ângulos poderiam ser relacionados com o azimute e a altura solar, permitindo uma regra geral de dimensionamento desses difusores para qualquer orientação em qualquer época do ano. Esse processo é descrito a seguir:

Sendo:

d = distância entre os difusores

h = altura dos difusores

θ_a = ângulo do azimute do sol

θ_h = ângulo da altura do sol

Temos:

$$\text{Plano XY: } \text{sen } \theta_k = \frac{h}{j} ; \quad \text{cos } \theta_k = \frac{a}{j} \quad \text{portanto: } \begin{cases} j \text{cos } \theta_k = a \\ j \text{sen } \theta_k = h \end{cases} \quad (\text{A})$$

$$\text{Plano ZX: } \text{sen } \theta_a = \frac{d}{a} \quad (\text{B})$$

Desenvolvimento (A)

$$\begin{cases} j = \frac{a}{\text{cos } \theta_k} \\ j = \frac{h}{\text{sen } \theta_k} \end{cases} \quad \text{portanto: } \frac{a}{\text{cos } \theta_k} = \frac{h}{\text{sen } \theta_k} , \quad \text{portanto: } a = h \frac{\text{cos } \theta_k}{\text{sen } \theta_k} = h \frac{1}{\text{tg } \theta_k}$$

Desenvolvimento (B)

$$a \text{sen } \theta_a = d$$

Conexão (A) - (B)

$$h \frac{\text{sen } \theta_a}{\text{tg } \theta_k} = d$$

$$\text{Reescrito: } d = \frac{h \text{sen } \theta_a}{\text{tg } \theta_k}$$

(16)

4.1.2.2 Desenho dos difusores

Com a equação acima definida (16), foram escolhidos na carta solar para São Paulo (24° latitude sul) os ângulos de azimuth e altura solar que permitissem o bloqueio da radiação solar direta a partir das 7 horas da manhã. Para o difusor orientado para o Sul, foram selecionados os ângulos 18° e 23° respectivamente, resultando na geometria representada na Figura 24. De forma complementar, foram projetados quebra sóis verticais para bloquear a incidência de raios solares laterais na época do verão. Para o difusor orientado para o Norte na carta solar foi selecionado o ângulo de 40° como forma de bloquear a radiação direta durante todo o período. Como se percebeu que para o dispositivo assim projetado haveria penetração solar direta pelos difusores por causa do seu funcionamento como um quebra sol invertido, foram calculados os seus espaçamentos também para os ângulos de 50° e 60° . Para ângulos acima de 70° , o beiral projetado de 75 cm barra a incidência direta de raios solares (Figura 23). Para o pano de vidro vertical, adotou-se as mesmas dimensões da janela vertical para que fosse possível uma comparação.

Figura 22 – Desenho de Mazria para a Mount Airy Library. Fonte: MOORE, 1985.

Figura 23 - Foto do modelo em escala reduzida e esquema gráfico do dispositivo zenital orientado para Norte. Fonte: Autor.

Figura 24 - Foto do modelo em escala reduzida e esquema gráfico do dispositivo zenital orientado para Sul. Fonte: Autor.

Figura 25 – Vistas internas do projeto do modelo com os difusores. Fonte: Autor

4.2 Descrição do ensaio

Figura 26 – Foto aérea do local do ensaio. Fonte: Google Hearth: www.aondefica.com.

O ensaio foi realizado no pátio do LAME da FAU, no campus da Universidade de São Paulo, no dia 09 de novembro de 2006, entre as 10:00 e 16:00 hs (Figura 26). O local escolhido era suficientemente desobstruído para os objetivos do ensaio no que diz respeito à influência do albedo e das obstruções externas. Avaliou-se as aberturas em relação ao Norte verdadeiro (declinação magnética= $20^{\circ} 03'27''$)⁴². Para avaliar o desempenho do dispositivo foram observadas as seguintes situações:

- 1 – somente abertura lateral orientada para o Norte, sem protetores (plano de trabalho $h = 65$ cm).
- 2 – somente abertura lateral orientada para o Norte, sem protetores.
- 3 – abertura lateral orientada ao Norte, com protetores fixos horizontais e dispositivo zenital com seleção angular e difusores orientados para Sul.
- 4 – abertura lateral orientada ao Sul, com protetores fixos verticais e dispositivo zenital com seleção angular e difusores orientados para Norte.

⁴² BITTENCOURT, 2004.

5– somente dispositivo zenital de seleção angular com difusores orientado para Oeste.

Figura 27. Fotos do local do ensaio. Fonte: Autor.

Para cada uma dessas combinações foi realizada uma série de medições dos níveis de iluminância internos e externos ao modelo, conforme descrito no item 4.2.2. Para todas elas foi mantida a mesma localização no terreno e a mesma disposição dos equipamentos.

4.2.1 Descrição dos equipamentos

Para a realização das medições no modelo foram utilizados 11 fotocélulas LI-COR (Figura 28) com sensores de silício de alta estabilidade, sendo 9 para a malha interna de pontos, uma para medir a radiação global do céu e outra para a difusa. As fotocélulas possuem correção de cosseno para um ângulo de incidência de até 80°. Como a inclinação dos sensores é fonte comum de erros, foram utilizados níveis apropriados para a base de cada sensor (Figura 29) e nível de bolha para nivelamento do modelo onde as fotocélulas estariam assentadas (Figura 33). As fotocélulas foram conectadas a um datalogger ELE International, modelo MM900, com 16 canais receptores digitais e 4 analógicos (Figura 30-A), programados para realizar as médias por minuto das medições efetuadas a cada segundo. Os dados assim obtidos foram transportados para um microcomputador tipo Notebook (Figura 30-B) com o software do equipamento para depois serem exportados para o programa Microsoft Excel para a geração de planilhas. A fotocélula externa para medição de radiação difusa foi instalada em um anel para sombreamento marca Kipp & Zonen, modelo CM 121 (Figura 31). Para a checagem

do padrão de medições instantâneas das iluminâncias pelos sensores registradas pelo datalogger foi utilizado um luxímetro digital marca Homis, modelo 824, com escala de até 200.00 lux (Figura 32).

Figura 28. Fotocélulas LI-COR modelo LI-210SA
Fonte: LABAUT-FAUUSP.

Figura 29. Nível para fotocélulas LI-COR.
Fonte: Autor.

Para o registro visual do céu foi utilizada uma câmera digital marca Nikon, modelo Coolpix 4500 (Figura 34) na qual foi instalada uma lente hemisférica 180° tipo “olho de peixe”, marca Nikon, modelo FC-E8, para fotos com projeção eqüidistante da abóbada celeste (Figura 35). A mesma câmera foi utilizada em conjunto com outra câmera digital de 7.2 megapixels marca Sony, modelo DSC-W7, equipada com lente conversora grande angular VCL-DH 0730, para o registro de imagens internas ao modelo (Figura 36).

(A)

(B)

Figura 30. Datalogger ELE International modelo MM900 (A) conectado a um microcomputador (B).
Fonte: LABAUT - FAUUSP

Figura 31. Anel para sombreamento da fotocélula externa marca Kipp & Zonen, modelo CM121.
Fonte: Foto do autor e desenho do catálogo da empresa Kipp & Zone.

Figura 32. Luxímetro digital Homis, modelo 824.
Fonte: LABAUT-FAUUSP.

Figura 33. Bússola e nível de bolha.
Fonte: Autor.

Figura 34. Câmera digital marca Nikon Coolpix4500.
Fonte: www.nikon.com

Figura 35. Lente hemisférica Nikon FC – 8.
Fonte: www.nikon.com .

Figura 36. Câmera digital Cyber Shot DSCW7 – 7. 2 megapixels, marca Sony com lente conversora grande angular VCL – DH 0730 para câmera digital, marca Sony, com 30 mm de diâmetro de filtro. Fonte: www.sony.com.

4.2.2 Metodologia das medições

Para a medição dos níveis de iluminância horizontal interna foi definida uma malha de nove pontos internamente ao modelo para a colocação das fotocélulas. Foram anotados os códigos dessas fotocélulas e relacionados com os canais de entrada do datalogger para a análise posterior dos dados obtidos em cada posição (Figura 37). Externamente foi colocada uma fotocélula desobstruída para medir a iluminância global do céu e outra protegida por um anel de suporte para sombreamento que cobre o percurso aparente do sol no céu (Figura 31) permitindo a medição somente da luz externa difusa. Foi utilizado um Luxímetro Digital Homis (Figura 32) para fazer medidas periódicas de iluminâncias para comparar com as medições que estavam sendo realizadas pelas fotocélulas conectadas ao datalogger. Foram realizadas cinco séries de medições, alternando-se as tipologias conforme descrito no item 4.2. A disposição dos equipamentos foi mantida para que a base de comparação dos dados assim obtidos fosse a mais estável possível.

Em todas as séries foram feitas medições simultâneas das iluminâncias internas e externas. Como no decorrer das séries de medições houve variações das condições de céu, foram anotados o horário e o tipo de céu predominante em cada série para constar na comparação posterior dos dados e dos resultados obtidos. A cada série de medições foram tiradas fotos internas da maquete e externas do céu com a câmera fotográfica digital com objetiva 180 graus (Figuras 34 e 35), tanto para o registro do tipo de céu em cada medição como para

a análise visual qualitativa da iluminação interior. Também foi utilizada uma câmera fotográfica digital com objetiva grande angular (Figura 36), sem o uso de flash, para avaliação visual do aspecto da iluminação natural no interior do modelo.

Figura 37. Distribuição da malha interna de sensores para a medição dos pontos de iluminância.

Fonte: Autor.

4.3 Descrição dos dados e resultados obtidos

4.3.1 Iluminância

O datalogger faz medições da iluminância a cada segundo para cada fotocélula a ele conectada e registra as médias das medições realizadas no espaço de tempo de um minuto. Destes dados coletados posteriormente foi feita uma média por ponto em cada sessão de medições realizada. Para as medidas de radiação externa difusa (sensor nº 5985), como o anel de sombreamento encobre uma parte dessa radiação que seria medida, um fator de correção precisa ser aplicado para se obter uma estimativa de quanto seria esse valor se o anel não fosse utilizado. De acordo com o catálogo do fabricante do anel (Kipp & Zonen Instruction manual CM 121, p. 19-20), foi aplicado o índice de 1.14 para a correção dos valores de iluminância externa difusa. Os dados assim normalizados foram então incorporados à planilha para composição posterior com os outros dados obtidos nas medições.

4.3.1.1 Normalização dos dados

Após o cálculo do desvio padrão das amostras, os valores foram normalizados para “permitir a comparação entre vários estudos” e “para serem utilizados em análises e comparações com diferentes condições de céu” conforme recomendação da Norma Brasileira de Iluminação Natural (ABNT, 2005, parte 2, p. 8-9) e também Egan e Olgyay (2002, p.342), que utilizam o mesmo conceito, porém com grafia diferente, resultando na seguinte expressão:

$$E_b = E_t \cdot \frac{R_s}{R_t} \cdot M \cdot G$$

(17)

Onde:

E_b = projeção da iluminância interna do espaço a ser modelado (lux)

E_t = iluminância medida no modelo em estudo (lux)

R_s = iluminância de referência para a região onde se localiza o edifício (lux)

R_t = iluminância de referência medida no local do ensaio (lux)

M = fator de manutenção para vidros (0,85)

G = transmissividade do vidro (0,85)

Para a iluminação de referência para a região, os dados normalmente utilizados são os coletados por estações medidoras. Como não existem dados sistemáticos medidos para São Paulo, optou-se por utilizar os dados de disponibilidade de luz natural calculados pelos algoritmos do programa DLN (SCARAZZATO, 1995), que são baseados no documento RP 21-84 da IESNA intitulado “Recommended Practice for the Calculation of Daylight Availability” (Gráfico 6), que apresenta uma série de “algoritmos universalmente aplicáveis e que foram baseados na interação entre medições realizadas e métodos preditivos desenvolvidos ao longo das décadas de 1920 a 1980 em vários países, incluindo três tipologias básicas de céu: claro, parcialmente nublado ou intermediário e encoberto” (SCARAZZATO, 1995).

Gráfico 5. Gráficos de disponibilidade de luz natural do software DLN.
Fonte: SCARAZZATO, 1995.

4.3.2 Comparação entre os resultados obtidos

O conjunto dos dados medidos no ensaio depois de normalizados conforme descrito acima está representado na Tabela 2. O nível de iluminância indicado para cada uma das tipologias escolhidas para o ensaio é a média das medições por minuto realizada pelo datalogger em cada período de medição. As medições completas registradas pelo datalogger são apresentadas no Apêndice 2.

MEDIDAS DE ILUMINÂNCIA NOS PONTOS											
TIPOLOGIA DAS ABERTURAS Data: 09/11/06	NUMERO E POSICIONAMENTO DOS SENSORES										
	Nº 5976	Nº 5981	Nº 5973	Nº 5978	Nº 5974	Nº 5980	Nº 5975	Nº 5977	Nº 5979	Nº 5985	Nº 5987
	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux
	Interna	Interna	Interna	Interna	Interna	Interna	Interna	Interna	Interna	Externa difusa	Externa global
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1. Abertura lateral/Norte 12:00 hs.-céu parcialmente encoberto	3449	3749	3497	1328	1241	1224	912	918	683	46372	94199
2. Abertura lateral/Norte 12:25hs. -céu parcialmente encoberto	2595	2987	2825	869	766	667	604	596	480	47059	99172
3. Brise norte/difusor Sul 13:05hs.-céu encoberto/parcialmente encoberto	1421	1606	1525	769	703	636	1226	1285	1067	47471	103593
4. Brise Sul/difusor Norte 14:45hs. -céu parcialmente encoberto	2822	3452	1736	2240	1923	1355	1898	1978	1760	48268	129840
5. Janela vedada/difusor oeste 15:50hs. - céu claro	756	762	1439	1712	1554	2036	5538	5855	5012	45823	104974

Tabela 2. Resumo das médias de iluminâncias nos pontos para cada uma das tipologias.
Fonte: Autor.

Com base exclusivamente nos valores de iluminância medidas durante o ensaio foi possível então calcular as variáveis de análise qualitativa, conforme definidas no item 2.3 e cujos valores estão indicados na Tabela 3.

Também com os valores de iluminância medidos foi possível calcular o FLD, sendo este a relação entre o valor da iluminância em um ponto interno (de A até I) e o valor da iluminância externa difusa (J). Com base nesses valores, calculou-se então o FLD médio para cada tipologia (Tabela 5), que é a média dos FLD calculados para cada ponto interno ao modelo, conforme indicado na tabela 4.

VARIÁVEIS DE ANÁLISE QUALITATIVA					
TIPOLOGIA DAS ABERTURAS	VARIÁVEIS DE ANÁLISE				
	Emed	U	D	FLDm	UN
	Média das iluminâncias	Uniformidade (4)	Diversidade (5)	FLD médio (13)	Uniformidade de FLD (6)
1. Abertura lateral/Norte 12:00 hs.-céu parcialmente encoberto	1889	0,36	1 / 5,4	4,07	0,36
2. Abertura lateral/Norte 12:25hs. -céu parcialmente encoberto	1376	0,34	1 / 6,2	2,93	0,34
3. Brise norte/difusor Sul 13:05hs.-céu encoberto/parcialmente encoberto	1137	0,56	1 / 2,5	2,4	0,56
4. Brise Sul/difusor Norte 14:45hs. -céu parcialmente encoberto	2129	0,63	1 / 2,5	4,46	0,63
5. Janela vedada/difusor oeste 15:50hs. - céu claro	2740	0,27	1 / 6,6	5,98	0,27

Tabela 3. Variáveis de análise qualitativa para as diversas tipologias. Fonte: Autor

Com a visualização dos valores dessas tabelas foi possível identificar algumas características que diferenciam as tipologias analisadas. As tipologias que utilizam o sistema de iluminação zenital combinado com difusores com seleção angular apresentam os melhores índices de diversidade e uniformidade, embora nenhum deles atinja o índice mínimo de 0,8 de uniformidade, que indica o grau de distribuição uniforme de iluminação, conforme o item 2.3.3. Quanto a diversidade, que indica o grau de variação dos níveis de iluminação, as tipologias 3 e 4 mostraram níveis muito bons, sendo que as outras tipologias excederam a relação máxima recomendada de 1 / 5.

Os índices que mostram valores médios em relação a todo o ambiente, a iluminância média e o FLD médio (itens 2.3.2 e 2.3.6.1) não caracterizam suficientemente a distribuição das iluminâncias no interior modelo estudado. A iluminância média, que é a média aritmética simples das iluminâncias medidas em todos os pontos internos, não indica a distribuição da iluminação

natural dentro do espaço analisado, sendo válida apenas para comparar espaços com iluminação uniforme, como reconhece a Norma Brasileira de Iluminação Natural: “Conhecendo-se a variação da iluminação natural com o afastamento da janela, percebe-se que um nível médio de iluminação pode não representar adequadamente a iluminância do espaço interno” (ABNT, 2005, p.9). Os valores de FLD médio nos pontos representam melhor essa distribuição, sendo que as tipologias com difusores apresentam os melhores índices.

CÁLCULO DO FLD NOS PONTOS											
TIPOLOGIA DAS ABERTURAS Data: 09/11/06	NÚMERO E POSICIONAMENTO DOS SENSORES										
	Nº 5976	Nº 5981	Nº 5973	Nº 5978	Nº 5974	Nº 5980	Nº 5975	Nº 5977	Nº 5979	Nº 5985	Nº 5987
	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	Lux Externa difusa	Lux Externa global
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1. Abertura lateral/Norte 12:00 hs.-céu parcialmente encoberto	7,44	8,08	7,54	2,86	2,68	2,64	1,97	1,98	1,47	46372	94199
2. Abertura lateral/Norte 12:25hs. -céu parcialmente encoberto	5,51	6,35	6,00	1,85	1,63	1,42	1,28	1,27	1,02	47059	99172
3. Brise norte/difusor Sul 13:05hs.-céu encoberto/parcialmente encoberto	2,99	3,38	3,21	1,62	1,48	1,34	2,58	2,71	2,25	47471	103593
4. Brise Sul/difusor Norte 14:45hs. -céu parcialmente encoberto	5,85	7,15	3,60	4,89	4,20	2,81	3,93	4,10	3,65	48268	129840
5. Janela vedada/difusor oeste 15:50hs. - céu claro	1,65	1,66	3,14	3,74	3,39	4,44	12,09	12,78	10,94	45823	104974

Tabela 4. Cálculo do FLD nos pontos para as diversas tipologias. Fonte: Autor

CÁLCULO DO FLD MÉDIO			
TIPOLOGIA DAS ABERTURAS Data: 09/11/06	FLD MÉDIO	ILUMINÂNCIA EXTERNA	
		Externa difusa	Externa global
1. Abertura lateral/Norte 12:00 hs.-céu parcialmente encoberto	4,07	46372	94199
2. Abertura lateral/Norte 12:25hs. -céu parcialmente encoberto	2,93	47059	99172
3. Brise norte/difusor Sul 13:05hs.-céu encoberto/parcialmente encoberto	2,40	47471	103593
4. Brise Sul/difusor Norte 14:45hs. -céu parcialmente encoberto	4,46	48268	129840
5. Janela vedada/difusor oeste 15:50hs. - céu claro	5,98	45823	104974

Tabela 5. Cálculo do FLD médio para as diversas tipologias de abertura. Fonte: Autor.

O cálculo do FLD médio (Tabela 5) indica apenas aquelas topologias que poderão ter problemas de iluminação e térmicos, com índices acima dos recomendáveis, conforme item 2.3.6.1. As tipologias com difusores 3 e 4 apresentam níveis dentro da faixa que indica ambientes com aparência de iluminação natural brilhante, com uso de iluminação artificial apenas complementar, sendo provavelmente a melhor opção de eficiência energética.

Com o cálculo do FLD nos pontos (Tabela 4) pode-se ter uma melhor idéia da variação do FLD no espaço interno. As tipologias 3 e 4 apresentam uma variação mais estável, dentro de um gradiente menor. As outras tipologias apresentam uma variação muito grande, com valores diferenciados em até 20%.

4.3.2.1 Gráficos de gradientes de iluminância

Com base nos níveis de iluminância e na posição relativa dos sensores foram traçadas as curvas dos gradientes de iluminação interna para cada tipologia ensaiada (Gráficos de 6 a 10).

A representação gráfica dos gradientes de iluminâncias permite uma visualização da variação das iluminâncias em relação aos pontos medidos no plano vertical da sala. Para a tipologia de abertura unilateral, os gráficos indicam uma queda abrupta dos níveis para a região dos fundos do modelo estudado (Gráficos 6 e 7). As tipologias com iluminação zenital e difusores com seleção angular apresentam um melhor balanceamento entre as iluminâncias das aberturas, possibilitando uma melhor distribuição da iluminação natural no espaço interior (Gráficos 8 e 9). Entretanto, como as curvas 8 e 9 têm uma ligeira queda para o centro da sala, isso indica que o dispositivo de iluminação zenital ensaiado poderia ser melhor dimensionado e posicionado para otimizar a distribuição uniforme da luz natural.

Esse tipo de representação dos resultados, porém, só permite a visualização da distribuição das iluminâncias num plano vertical transversal ao espaço do modelo, para um fenômeno de distribuição da iluminação que é essencialmente tridimensional. Para uma melhor visualização da distribuição da

iluminação da sala optou-se, então, pela representação das iluminâncias com curvas isolux⁴³ associadas com imagens registradas durante o ensaio, conforme descrito no item seguinte.

Gráfico 6. Modelo de sala de aula: janela lateral voltada para Norte. Fonte: Autor.

Gráfico 7. Modelo de sala de aula: janela lateral voltada para o Norte. Fonte: Autor.

⁴³ Lugar geométrico dos pontos do plano de trabalho que possuem igual iluminamento ou nível de iluminação (VIANNA, 2004).

3ª medição - gradiente

Gráfico 8. Modelo de sala de aula: janela lateral com brises horizontais para Norte e difusores para Sul. Fonte: Autor.

4ª medição - gradiente

Gráfico 9. Modelo de sala de aula: janela lateral com brises verticais para Sul e difusores para Norte.

5ª medição - gradiente

Gráfico 10. Modelo de sala de aula: janela lateral vedada e difusores orientados para Oeste.

4.3.2.2 Diagramas de curvas isolux

Para uma melhor visualização da distribuição das iluminâncias no interior do modelo foram traçadas as curvas isolux para a determinação das regiões de igual valor de iluminância no ambiente. Segundo Moore (1991, p. 2), a indicação da distribuição das iluminâncias com curvas isolux permite uma avaliação rápida do gradiente da iluminação, “que é o fator quantitativo mais representativo da qualidade da iluminação visualmente percebida em um ambiente arquitetônico”. Curvas muito próximas indicam um forte gradiente e curvas mais espaçadas indicam uma distribuição relativamente mais suave. Essa metodologia para a representação gráfica dos resultados também é recomendada pela Norma Brasileira de Iluminação Natural (2005, Parte 2, p. 9). Para o traçado das curvas, os dados foram tratados no programa Surfer (disponível em: <http://www.labcon.ufsc.br/>).

Na sequência das figuras de número 38 a 42 está representado o conjunto dos dados que foram obtidos durante as séries de medições e que se julgou necessário para a avaliação comparativa da qualidade da iluminação nas tipologias de aberturas estudadas no ensaio com o modelo reduzido. Na parte superior das figuras foram registradas imagens da condição de céu no momento de cada série de medições, uma para a imagem desobstruída do céu (à direita), de onde foram obtidas as medidas de iluminância externa global, e outra que mostra o anel encobrindo o percurso do sol (à esquerda), da qual foram obtidas as medidas de iluminância externa difusa. No centro da página estão representadas a malha interna de sensores com as respectivas médias das medidas absolutas de iluminância registradas pelo datalogger em cada ponto para cada série de medições (à esquerda). À direita está o gráfico das curvas isolux correspondente. Na parte inferior são registradas as imagens internas ao modelo, obtidas com a câmera fotográfica com objetiva 180° olho de peixe (à esquerda) e com objetiva grande angular (à direita), conforme indicado no item 4.2.1. Essas imagens, juntamente com as medidas absolutas de iluminância e a representação gráfica de sua distribuição, permitem uma melhor avaliação das condições de iluminação natural interna ao modelo estudado, comparando qualitativamente as tipologias ensaiadas.

1ª série de medições
Dia 09/11/2006 - Hora: 11:53

Externa difusa 50.602 LUX

Tipologia: Abertura lateral
Céu parcialmente encoberto

Externa global 109.924 LUX

Figura 38. Principais resultados da 1ª série de medições. Fonte: Autor da pesquisa.

2ª série de medições
Dia 09/11/2006 - Hora: 12 :24

Externa difusa 44.450 LUX

Tipologia: Abertura lateral
Céu parcialmente encoberto

Externa global 105.554 LUX

Figura 39. Principais resultados da 2ª série de medições. Fonte: Autor da pesquisa.

3ª série de medições
Dia 09/11/2006 - Hora: 13: 00

Tipologia: Brise Norte / Difusor Sul
Céu encoberto/parcialmente encoberto

Externa difusa 47.869 LUX

Externa global 81.895 LUX

Figura 40. Principais resultados da 3ª série de medições. Fonte: Autor da pesquisa.

4ª série de medições

Dia 09/11/2006 - Hora: 14 : 43

Externa difusa 18.503 LUX

Tipologia: Brise Sul / Difusor Norte Céu parcialmente encoberto

Externa global 73.842 LUX

Figura 41. Principais resultados da 4ª série de medições. Fonte: Autor da pesquisa.

5ª série de medições
Dia 09/11/2006 - Hora: 15:51

Tipologia: Janela vedada / Difusor Oeste
Céu claro

Externa difusa 10.771 LUX

Externa global 57.328 UX

Figura 42. Principais resultados da 5ª série de medições. Fonte: Autor da pesquisa.

Visualizando-se em conjunto os dados das figuras 38 a 42, pode-se fazer uma melhor comparação entre as tipologias ensaiadas. Apesar das iluminâncias medidas no modelo estarem em níveis acima do normalmente encontrados em ambientes escolares, considerou-se importante para esta análise não somente os níveis absolutos, mas a comparação relativa entre os níveis como forma de aferir a qualidade da iluminação interna.

Mardaljevic (2005), com base em pesquisas sobre o comportamento dos ocupantes de edifícios com iluminação natural, propôs uma faixa de iluminância “útil” que varia de 100 a 2000 lux. Para ele, iluminâncias internas na faixa de 500 a 2000 lux representam grande potencial de autonomia da luz natural. Acima de 2000 lux os altos índices de iluminância são associados com excessivo ganho térmico e ofuscamento. É a partir deste nível, conforme suas pesquisas, que os usuários começam a utilizar cortinas, persianas e brises móveis, revertendo o potencial de economia de energia e é quando também se nota insatisfação com a iluminação natural. As tipologias 3 e 4, propostas por este trabalho, mantêm os níveis de iluminação mais próximos da faixa proposta por Mardaljevic.

A 1ª, 2ª e 5ª séries de medições mostram curvas isolux muito próximas, com um gradiente que decresce rapidamente de níveis muito altos para níveis muito baixos, causando um desequilíbrio que também pode ser observado nas fotos. Apesar dos altos níveis próximos das aberturas que empurram o nível médio para cima, estes ambientes apresentam iluminação deficiente, com sombras acentuadas em algumas regiões, potenciais problemas de ofuscamento e que necessitam de complemento de iluminação artificial a maior parte do tempo.

A 3ª e 4ª série de medições, que representam a combinação dos dispositivos propostos, apresenta níveis absolutos de iluminância menores do que as outras, mas melhores distribuídos pelos pontos internos ao modelo. O gradiente varia mais suavemente, mantendo níveis bem próximos tanto ao lado da abertura lateral quanto no fundo da sala. Isto confere ao ambiente uma aparência mais brilhante e uniforme, visível nas fotos que mostram a distribuição agradável da luz natural, principalmente na foto 180° da figura 40, que fornece uma idéia mais próxima da tridimensionalidade da iluminação no espaço interno ao modelo ensaiado.

4.3.2.3 Penetração solar

Um aspecto importante da análise da iluminação natural é a penetração direta dos raios de sol no interior dos ambientes. Como indicado na revisão bibliográfica, essa incidência direta deve ser evitada, por dois motivos principais. O primeiro é porque é fonte de desequilíbrio, responsável por níveis muito alto junto a aberturas que caem rapidamente à medida que adentram o ambiente, como mostra a simulação feita no programa Ecotect que compara esta distribuição com a do dispositivo proposto (Gráfico 12). Outro motivo é porque são potenciais fontes de ofuscamento.

Gráfico 12 – Gráfico que representa a distribuição espacial dos níveis de iluminância no interior do modelo no dia do ensaio. A – abertura unilateral, B – dispositivo proposto. Fonte: Autor. Programa Ecotect.

Como o ensaio no modelo foi feito para um dia do ano, verificou-se por meio de simulação no Ecotect a penetração solar durante as datas mais significativas do ano (solstício de verão, solstício de inverno e equinócios). A simulação indicou que há penetração solar no interior do ambiente de sala de aula com iluminação unilateral de março a setembro e o dia todo nos equinócios e sobre o plano da lousa na maior parte do dia. Para o dispositivo proposto, não há penetração.

4.4 Estimativa do potencial de conservação de energia

Edifícios escolares em São Paulo têm um enorme potencial de conservação de energia através do uso da iluminação natural porque seu principal consumo energético está baseado na iluminação elétrica. Quando são previstas estratégias para a iluminação natural nos estágios iniciais do projeto de arquitetura, pode-se obter uma iluminação difusa de qualidade que permita que as lâmpadas fiquem apagadas durante o dia na maior parte do ano. Os índices calculados nos itens anteriores servem para uma caracterização da quantidade da iluminação e sua distribuição no modelo estudado no dia do ensaio. A luz natural, entretanto, varia durante as horas do dia e também no decorrer das estações do ano. Para uma previsão do potencial de conservação de energia no modelo proposto, é necessário que os resultados sejam estendidos para o resto do ano (BERTOLOTTI, PEREIRA, SCARAZZATO, 2006).

Para a estimativa do potencial de conservação de energia do modelo proposto foi utilizado o método proposto por Mansy (2004, apud PEREIRA, 2007, p. 154), que considera a situação de projeto mais desfavorável, ou seja, os períodos em que os níveis mínimos de iluminação necessária ao desempenho da tarefa visual serão supridos pela iluminação natural proveniente de uma condição de céu totalmente encoberto. Para tanto, foram selecionadas das medidas tomadas durante as séries de medições aquelas que ocorreram sob condição de céu encoberto. Em seguida foram calculados os FLD para as medidas realizadas pelo datalogger e a média dos FLD nos pontos medidos, conforme a Tabela 6.

A partir do FLD obtido é possível prever a iluminância num ponto durante um determinado dia do ano multiplicando-se seu valor pelo valor da disponibilidade de luz externa prevista para o mesmo dia, conforme a expressão:

$$E_{int} = E_{ext} \times FLD \quad (18)$$

Onde: E int = Iluminância interna
E ext = iluminância externa
FLD = Fator de luz do dia

CÁLCULO DO FLD NOS PONTOS											
TIPOLOGIA DA ABERTURA: brise norte / difusor sul Data: 09/11/06	NUMERO E POSICIONAMENTO DOS SENSORES										
	Nº 5976	Nº 5981	Nº 5973	Nº 5978	Nº 5974	Nº 5980	Nº 5975	Nº 5977	Nº 5979	Nº 5985	Nº 5987
	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux
CÉU ENCOBERTO	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	Externa difusa	Externa global
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
MÉDIA 1.	3,47	3,68	4,52	1,78	2,22	1,29	3,98	4,26	2,76	52168	62150
MÉDIA 2.	3,89	4,50	4,09	2,20	2,06	1,81	3,66	3,90	3,16	51179	61321
MÉDIA 3.	3,77	4,15	3,98	2,12	2,22	1,89	3,91	4,07	3,07	49312	61321
MÉDIA 4.	3,41	4,58	4,22	2,21	2,07	1,73	3,44	3,79	3,21	48872	57729
MÉDIA 5.	4,08	4,29	4,15	2,33	1,85	1,95	3,74	3,80	3,02	48103	58282
MÉDIA 6.	3,90	4,59	4,25	2,21	1,90	1,80	3,79	4,03	3,09	49037	61321
MÉDIA NOS PONTOS	3,75	4,30	4,20	2,14	2,05	1,75	3,75	3,98	3,05	49779	60354

Tabela 6. Cálculo do FLD para a condição de céu encoberto nos pontos medidos. Fonte: Autor.

Para a determinação da disponibilidade de luz externa para os dias mais significativos do ano para esta análise (solstício de verão, solstício de inverno e equinócios), sob a condição de céu encoberto, geralmente são utilizados dados diários medidos durante todo o ano nos países que possuem estações medidoras e programas de medição do céu. Como para São Paulo não existem esses dados, a disponibilidade de luz externa foi calculada com os algoritmos matemáticos do programa DLN (SCARAZZATO, 1995).

Os valores mínimos de iluminância requeridos para o desempenho de uma determinada tarefa são determinados em laboratórios, conforme comentado no item 2.3.1. A recomendação da FDE para salas de aula é de 500 lux (Tabela 1), valor baseado na norma de iluminação artificial NB-57 (Quadro 2). Como não existe uma especificação de níveis mínimos para iluminação natural nas normas brasileiras, o valor mínimo de iluminância considerado foi o recomendado pela norma alemã DIN 5034 -1 (1985, p.3), ou seja, 60 % do nível recomendado para iluminação artificial, portanto igual a 300 lux. Na tabela 7 foram assinalados em amarelo todos aqueles níveis abaixo desse mínimo necessário, que significam o momento no qual a iluminação elétrica deveria ser acionada para suprir os níveis mínimos de iluminância previstos.

ESTIMATIVA DE VALORES MÍNIMOS DE ILUMINÂNCIA DURANTE O ANO (LUX)										
TIPOLOGIA DA ABERTURA: BRISE NORTE/DIFUSOR SUL		NÚMERO E POSICIONAMENTO DOS SENSORES								
		Nº 5316	Nº 5381	Nº 5313	Nº 5318	Nº 5314	Nº 5380	Nº 5315	Nº 5317	Nº 5319
		FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD	FLD
CÉU ENCOBERTO	HORÁRIO ESCOLAR	3,75	4,30	4,20	2,14	2,05	1,75	3,75	3,98	3,05
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
SOLSTÍCIO DE VERÃO (22/12)	7HS	304	348	340	173	166	142	304	322	247
	8HS	465	533	521	265	254	217	465	434	378
	9HS	604	632	676	345	330	282	604	641	431
	10HS	709	813	794	404	387	331	709	752	576
	11HS	776	830	863	443	424	362	776	824	631
	12HS	739	916	895	456	437	373	739	848	650
	13HS	776	830	863	443	424	362	776	824	631
	14HS	709	813	794	404	387	331	709	752	576
	15HS	604	632	676	345	330	282	604	641	431
	16HS	465	533	521	265	254	217	465	434	378
SOLSTÍCIO DE INVERNO (22/06)	7HS	304	348	340	173	166	142	304	322	247
	8HS	465	533	521	265	254	217	465	434	378
	9HS	604	632	676	345	330	282	604	641	431
	10HS	709	813	794	404	387	331	709	752	576
	11HS	776	830	863	443	424	362	776	824	631
	12HS	739	916	895	456	437	373	739	848	650
	13HS	776	830	863	443	424	362	776	824	631
	14HS	709	813	794	404	387	331	709	752	576
	15HS	604	632	676	345	330	282	604	641	431
	16HS	465	533	521	265	254	217	465	434	378
EQUINÓCIOS (21/03 e 24/09)	7HS	304	348	340	173	166	142	304	322	247
	8HS	465	533	521	265	254	217	465	434	378
	9HS	604	632	676	345	330	282	604	641	431
	10HS	709	813	794	404	387	331	709	752	576
	11HS	776	830	863	443	424	362	776	824	631
	12HS	739	916	895	456	437	373	739	848	650
	13HS	776	830	863	443	424	362	776	824	631
	14HS	709	813	794	404	387	331	709	752	576
	15HS	604	632	676	345	330	282	604	641	431
	16HS	465	533	521	265	254	217	465	434	378
		DLN	Lux							
		Externa difusa								

Tabela 7. Projeção dos níveis mínimos de iluminância durante o ano. Fonte: Autor.

Nos valores expressos na Tabela 7 pode-se observar que a opção de utilização do modelo proposto permite que as lâmpadas fiquem desligadas, ou controladas por controles automáticos, na maior parte do tempo durante o horário escolar no decorrer do ano letivo. Deverão ser acionadas somente poucas horas no início da manhã e no final da tarde, principalmente durante os meses de inverno.

O que é importante ressaltar nestes dados é que a metodologia das medições utilizada permite uma análise dos níveis de iluminância em todos os pontos medidos e não de uma iluminância média do ambiente sala de aula, o que poderia levar a uma conclusão superficial de conservação de energia em prejuízo da análise da qualidade da iluminação.

POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA = 82 %										
TIPOLOGIA DA ABERTURA: brise norte / difusor sul		NÚMERO E POSICIONAMENTO DOS SENSORES								
CÉU ENCOBERTO	HORÁRIO ESCOLAR	Nº 5376 FLD	Nº 5381 FLD	Nº 5373 FLD	Nº 5378 FLD	Nº 5374 FLD	Nº 5380 FLD	Nº 5375 FLD	Nº 5377 FLD	Nº 5379 FLD
		3,75	4,30	4,20	2,14	2,05	1,75	3,75	3,38	3,05
SOLSTÍCIO DE VERÃO (22/12)	HORÁRIO ESCOLAR	A	B	C	D	E	F	G	H	I
		1	1	1	0,58	0,55	0,47	1	1	0,82
SOLSTÍCIO DE VERÃO (22/12)	7HS	1	1	1	0,58	0,55	0,47	1	1	0,82
	8HS	1	1	1	0,88	0,85	0,85	1	1	1
	9HS	1	1	1	1	1	0,34	1	1	1
	10HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	11HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	12HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	13HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	14HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	15HS	1	1	1	1	1	0,34	1	1	1
	16HS	1	1	1	0,88	0,85	0,72	1	1	1
SOLSTÍCIO DE INVERNO (21/06)	7HS	1	1	1	0,58	0,55	0,47	1	1	0,82
	8HS	0,44	0,50	0,43	0,25	0,24	0,20	0,44	0,46	0,36
	9HS	0,21	0,24	0,24	0,12	0,12	0,10	0,21	0,23	0,17
	10HS	0,75	0,86	0,84	0,43	0,41	0,35	0,75	0,80	0,61
	11HS	1	1	1	0,63	0,66	0,57	1	1	0,39
	12HS	1	1	1	0,89	0,85	0,73	1	1	1
	13HS	1	1	1	1	0,38	0,83	1	1	1
	14HS	1	1	1	0,89	0,85	0,73	1	1	1
	15HS	1	1	1	0,63	0,66	0,57	1	1	0,39
	16HS	0,75	0,86	0,84	0,43	0,41	0,35	0,75	0,80	0,61
EQUINÓCIOS (21/03 e 24/09)	7HS	0,21	0,24	0,24	0,12	0,12	0,10	0,21	0,23	0,17
	8HS	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
	9HS	0,68	0,77	0,76	0,39	0,37	0,32	0,68	0,72	0,55
	10HS	1	1	1	0,72	0,63	0,53	1	1	1
	11HS	1	1	1	1	0,36	0,82	1	1	1
	12HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	13HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	14HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	15HS	1	1	1	1	0,36	0,82	1	1	1
	16HS	1	1	1	0,72	0,63	0,53	1	1	1
EQUINÓCIOS (21/03 e 24/09)	17HS	0,68	0,77	0,76	0,39	0,37	0,32	0,68	2,15	0,55
	18HS	0,05	0,06	0,06	0,03	0,03	0,02	0,05	0,05	0,04

Tabela 8. Potencial de conservação de energia com controle de iluminação. Fonte: Autor.

A partir dos dados assim obtidos foram elaboradas duas tabelas para estimar o potencial de conservação de energia nos pontos internos ao modelo. A primeira, Tabela 8, considera que toda vez que o nível de iluminância interno for igual ou superior ao nível recomendado para projeto, o potencial de economia será máximo (100%), representado na tabela pelo número 1. Quando o nível estiver abaixo desse mínimo, é calculada a porcentagem de contribuição da luz natural para os níveis de iluminância internos dividindo-se o nível previsto para o ponto pelo nível recomendado para projeto.

Calculou-se então o potencial de conservação sazonal, pela média aritmética dos valores nos pontos em todos os horários de ocupação do dia representativo da estação do ano. A seguir, calculou-se o potencial de conservação anual médio, pela média aritmética dos potenciais das quatro estações do ano. Neste caso, o potencial estimado foi de 82%.

POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA = 65 %											
TIPOLOGIA DA ABERTURA: brise norte / difusor sul		NUMERO E POSICIONAMENTO DOS SENSORES									
CÉU ENCOBERTO	HORÁRIO ESCOLAR	Nº 5976	Nº 5981	Nº 5973	Nº 5978	Nº 5974	Nº 5980	Nº 5975	Nº 5977	Nº 5979	DLN
		FLD 3,75	FLD 4,30	FLD 4,20	FLD 2,14	FLD 2,05	FLD 1,75	FLD 3,75	FLD 3,98	FLD 3,05	Lux Externa difusa
SOLSTÍCIO DE VERÃO (22/12)	7HS	1	1	1	0	0	0	1	1	0	8100
	8HS	1	1	1	0	0	0	1	1	1	12400
	9HS	1	1	1	1	1	0	1	1	1	16100
	10HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18300
	11HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20700
	12HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21300
	13HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20700
	14HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18300
	15HS	1	1	1	1	1	0	1	1	1	16100
	16HS	1	1	1	0	0	0	1	1	1	12400
	17HS	1	1	1	0	0	0	1	1	0	8100
	18HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3500
SOLSTÍCIO DE INVERNO (22/06)	7HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1700
	8HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6000
	9HS	1	1	1	0	0	0	1	1	0	3700
	10HS	1	1	1	0	0	0	1	1	1	12500
	11HS	1	1	1	1	0	0	1	1	1	14300
	12HS	1	1	1	1	1	0	1	1	1	14300
	13HS	1	1	1	1	0	0	1	1	1	14300
	14HS	1	1	1	0	0	0	1	1	1	12500
	15HS	1	1	1	0	0	0	1	1	0	3700
	16HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6000
	17HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1700
	18HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
EQUINÓCIOS (21/03 e 24/09)	7HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5400
	8HS	1	1	1	0	0	0	1	1	1	10100
	9HS	1	1	1	1	0	0	1	1	1	14100
	10HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17200
	11HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19100
	12HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19800
	13HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19100
	14HS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17200
	15HS	1	1	1	1	0	0	1	1	1	14100
	16HS	1	1	1	0	0	0	1	1	1	10100
	17HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5400
	18HS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400

Tabela 9. Potencial de conservação de energia sem controle de iluminação. Fonte: Autor.

A segunda situação, representada na Tabela 9, considera que não serão utilizados controles automáticos para acionamento da iluminação artificial, restando, portanto, apenas duas possibilidades: potencial de conservação de 100% (indicado na tabela pelo número 1), quando os níveis internos atingem o mínimo recomendado para projeto e potencial nulo (indicado pelo número 0), quando não atingem. As médias sazonal e anual foram calculadas da mesma forma que na tabela anterior e o potencial de conservação de energia anual previsto para essa situação foi de 65%.

É importante ressaltar ainda que esses números apenas apontam um potencial de conservação de energia elétrica devido ao uso da luz natural. Para um cálculo de economia de energia deverão ser levados em conta ainda outros fatores como custo da instalação e dos controles automáticos e a interação da iluminação com outros sistemas do edifício, principalmente em relação ao conforto térmico.

5. CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

5.1.1 Uma proposta de metodologia de otimização

A pesquisa bibliográfica, os estudos e os resultados obtidos na fase experimental desse trabalho permitiram atingir o objetivo almejado: extrair uma proposta de metodologia para a determinação de uma geometria ideal para implantação e utilização de estratégias de otimização de luz natural em ambientes destinados ao aprendizado.

Dentre as estratégias possíveis, optou-se por concentrar as medições técnicas em dispositivos de iluminação zenital com seleção angular e difusores opacos, associados a protetores solares para as aberturas. Para a fase experimental, esse sistema foi aplicado num modelo em escala reduzida de uma sala de aula padrão da rede pública de ensino de primeiro e segundo graus do estado de São Paulo. Os estudos e a experiência mostraram que a metodologia aqui proposta pode ser utilizada para qualquer orientação do edifício e para qualquer horário do dia e época do ano, permitindo sua aplicação em todo o território nacional.

5.1.2 Otimização da qualidade da iluminação

Um dos maiores desafios na utilização da luz natural em projetos arquitetônicos está na dificuldade de prever efeitos não desejáveis, como ofuscamento e distribuição desigual. Essa pesquisa propõe um caminho que permite vencer esse obstáculo, pois a proposta leva em consideração não apenas aspectos quantitativos da iluminação natural, mas também qualitativos. Alguns dos aspectos qualitativos que podem, com o auxílio dessa metodologia, ser melhorados, são, por exemplo, a uniformidade na distribuição da luz natural no interior da sala de aula e a ausência de ofuscamento nos planos de interesse – dois dos problemas mais comuns apresentados na utilização empírica e não otimizada de dispositivos de controle de entrada de luz natural.

5.1.3 Otimização da economia de energia

A proposta aqui apresentada permite atender ainda a uma outra necessidade das escolas públicas brasileiras: reduzir gastos com consumo de luz artificial. Embora não fosse da alçada desse trabalho chegar a valores específicos de economia, as medições do experimento mostraram uma boa qualidade de iluminação interior com o uso otimizado do sistema natural. Os cálculos revelaram posteriormente uma autonomia em relação ao sistema artificial na maior parte do período de ocupação, devido ao bom aproveitamento da luz difusa e da luz direta por reflexão.

5.1.4 Aplicação

A intenção inicial desse trabalho era descobrir um método para orientar as fases iniciais do projeto arquitetônico. O estudo mostrou que se poderia ir além disso, uma vez que ficou claro que essa metodologia poderia ser adaptada para também orientar intervenções em escolas já existentes.

5.2 Limitações encontradas

O ensaio experimental foi realizado em um dia sob condições de céu real. Portanto, os resultados numéricos aqui contidos são válidos para horários e ângulos de incidência particulares desse dia e foram afetados pelas variações das condições de céu durante o período do experimento. A forma de obtê-los, porém, não se altera.

O modelo de escala reduzida mostrou-se pouco prático para a medição de alguns aspectos técnicos contidos nas variáveis de análise, como valores de luminância e índices de ofuscamento, o que poderia ter proporcionado índices mais precisos. Para assegurar que as conclusões principais não fossem comprometidas por causa dessa limitação, foi necessário recorrer a outras formas de aferição, como avaliação visual do próprio modelo e de fotos, a fim de obter indícios confiáveis.

5.3 Perspectivas para pesquisas futuras

As limitações descritas acima podem ser interpretadas como oportunidades para a realização de uma série de estudos alinhados com as tendências mais avançadas de pesquisa na arquitetura, que procuram integrar os diversos aspectos de sustentabilidade e conforto.

Uma possibilidade, por exemplo, é realizar medições sob condições mais controladas em diversos períodos do ano e comparar os resultados com simulações computacionais. Devido à grande variação na disponibilidade de luz natural no decorrer do dia e ao longo do ano no Brasil, essas simulações devem ser feitas em conjunto com medições sistemáticas em intervalos curtos (de hora em hora, por exemplo) durante todo o ano. Para isso, é preciso utilizar estações medidoras a fim de formar uma base de dados consistente ao longo dos próximos anos.

Uma seqüência natural da pesquisa é utilizar a mesma proposta de medições em condições de céu real num modelo reduzido para os demais dispositivos de controle de iluminação natural, como prateleiras de luz, dutos de sol e vidros prismáticos, entre outras estratégias, para capturar e direcionar a luz natural direta e difusa para o interior dos ambientes. A investigação do uso desses dispositivos, combinada a melhores condições de pesquisa e acompanhamento de resultados, pode ajudar as escolas brasileiras a funcionar em edifícios mais adaptados ao clima do país, que propiciem melhores condições para elevar o desempenho de estudantes e professores e, ao mesmo tempo, contribuir para a eficiência energética do edifício.

Outra sugestão é pesquisar até que ponto as conclusões desses trabalhos poderiam ser estendidas a ambientes não escolares, como edifícios de escritórios e indústrias, que também apresentam algumas das dificuldades de conciliação de luz natural e artificial aqui descritas.

Uma linha de pesquisa importante é dimensionar o impacto da melhor utilização da luz natural na carga térmica do edifício, uma vez que a maior ou menor penetração de luz solar no interior do ambiente pode alterar o conforto térmico de seus ocupantes, com possíveis conseqüências no consumo de energia na tentativa de compensar alterações na temperatura interna. No caso das escolas, trata-se de um estudo particularmente importante, já que o conforto térmico pode aumentar as possibilidades de rendimento escolar.

Visto dessa forma, todo o trabalho descrito aqui mostrou-se promissor, relevante e conectado com uma tarefa urgente – ajudar a melhorar as condições de ensino do país com o melhor aproveitamento de recursos já existentes, a partir de custos realistas e formas de implantação simples.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15215-1:** Iluminação Natural - Parte 1: conceitos básicos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15215-2:** Iluminação Natural – Parte 2: procedimento de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15215-3:** Iluminação Natural – Parte 3: procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15215-4:** Iluminação Natural – Parte 4: verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações. Método de medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 5413:** Iluminância de interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

BENYA, James et al. **Advanced lighting guidelines**. Washington, USA: New Buildings Institute, 2003. 445 p. Disponível em: < <http://www.newbuildings.org> >. Acesso em: 27 out. 2006.

BITTENCOURT, Leonardo. **Uso das cartas solares** – diretrizes para arquitetos. 4.ed. Maceió, Alagoas: Edufal, 2004. 109 p.

BERTOLOTI, Dimas, PEREIRA, Daniela C. Laudares, SCARAZZATO, Paulo Sérgio. **O papel da iluminação natural na sustentabilidade das edificações escolares**. In: NUTAU 2006: Seminário Internacional - Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade, 2006, São Paulo. Painéis...São Paulo: NUTAU, 2006. CD-ROM.

BOYCE, Peter R. **Human factors in lighting**. Essex: Applied Science Publishers, 1981. 355 p.

_____. **Light, sight and photobiology**. Lighting Future, vol.2, n.3. Troy, New York: Lighting Research Center – Rensselaer Polytechnic Institute, 1998. Disponível em: < <http://www.lrc.rpi.edu/programs/Futures/LF-Photobiology/index.asp> >. Acesso em: 06 set. 2006.

BOYCE, Peter, HUNTER, Claudia e HOWLETT, Owen. **The benefits of daylight through windows**. Troy, New York: Lighting Research Center – Rensselaer Polytechnic Institute, setembro de 2003. 88 p. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/daylightdividend/pdf/DaylightBenefits.pdf>>. Acesso em: 06 set. 2006.

BRYAN, Harvey. **Seeing the light**. Progressive Architecture. 9. 1982. Disponível em: < <http://www.arch.ced.Berkeley.edu/courses/arch245> >. Acesso em: 15 nov.2006.

CIBSE – Chartered Institution of Building Services Engineers. **Working plane illuminance in electrically lit spaces**. Factfile nº 3. Agosto de 1996. Disponível em: < <http://www.cibse.org/pdfs/facfile3.pdf> >. Acesso em: 08 dez. 2006.

CSTC – Centre Scientifique et Technique de la Construction, Division Physique du Bâtiment et Climat Interieur. **Guide précis d'aide à la construction des modèles réduits**. Bélgica: CSTC, 2001. 30 p.

ÇAKIR, Ahmet , ÇAKIR, Gisela. **Light and health**: The most comprehensive study on the impact of office lighting on humans. Berlin: Ergonomic Institute for Occupational and Social Sciences Research Company Ltd., 1998. Disponível em: <<http://www.healthylight.de/>>. Acesso em: 07 set. 2006.

CORBELLA, Oscar, YANNAS, Simos. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos** – conforto ambiental. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2003. 287 p.

DEUSTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 5034 -1. Daylighting in interiors: general requirements, Berlin, 1985 (Part 1).

EDWARDS, L. , TORCELLINI, P. **A Literature review of the effects of natural light on buildings occupants**. Colorado: National Renewable Energy Laboratory – U.S. Department of Energy, julho de 2002. 54 p. Disponível em: <<http://nrel.gov/buildings/highperformance/dfs/30769.pdf> > . Acesso em 6 set. 2006.

EGAN, David M., OLGAY, Victor W. **Architectural lighting**. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2002. 436 p.

FIGUEIRO, Mariana G. et al. **Daylight and productivity** – a field study. Washington, DC: Teaming for Efficiency: ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings – American Council for an Energy-Efficient Economy, 2002. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/overview.asp>>. Acesso em: 6 set. 2006.

FOX, Anne W. **Sustainable design for schools**. Seattle: Pacific Northwest Pollution Prevention Center, 2001. 40 p. Disponível em: <<http://www.pprc.org/pubs/schools/index.cfm> >. Acesso em: 19 set. 2006.

FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO – FDE. **Ambientes** – especificação técnica para elaboração de projeto de unidades escolares. São Paulo: FDE, 2003. 39 p.

_____. **Projetos Arquitetônicos 96 / 97**. São Paulo: FDE, 2003.

_____. **Arquitetura escolar paulista** – política educacional. São Paulo: FDE, 2003.

GAETANO, Alfano et al. **Fondamenti di benessere termoisometrico per la progettazione e la gestione de impianto di condizionamento**. 4. ed. Napoles: CUEN, 2002. 173 p.

GHISI, Enedir. **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit de sistemas de iluminação**: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. 305 p.

GONZALO, Guillermo E. **Iluminação Natural**: estudo realizado para salas de aula em Tucumán. Revista Lume Arquitetura, Ano IV – nº 19, Abr / Mai 2006. p. 86 – 91. Disponível em: < www.lumearquitetura.com.br >. Acesso em: 18 set. 2006.

GRAÇA, V.A.C., KOWALTOVSKY, D.C.C.K. **Metodologia de avaliação de conforto ambiental de projetos escolares usando o conceito de otimização multicritério**. In Ambiente Construído, Porto Alegre, v.4, n.3, p.19-35, jul. / set. 2004.

HATHAWAY, Warren E. **A study into the effects of types of light on childrens**: a case of daylight robbery. IRC Internal reports, n. 659, p. 11 – 29. Disponível em: www.nrc-cnrc.gc.ca/ >. Acesso em: 19 set. 2006.

HESCHONG MAHONE GROUP. **Daylighting in schools**: an investigation into the relationship between daylighting and human performance. Fair Oaks, California: Pacific Gas and Electric Company, agosto de 1999.

HOPKINSON, R.G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975. 776 p.

IESNA – Illuminating Engineering Society of North America. **IES Lighting Handbook, reference and application**. 9th edition. New York: IESNA, 2000.

LAM, William C. **Perception and lighting as formgivers for architecture**. New York: McGraw Hill Book Company, 1977. 310 p.

MANSY, K. **A user-friendly procedure to visualize the hourly quantitative performance of daylighting systems**. Solar Energy, vol.77, p.373-380. Elsevier: London, 2004.

MARDALJEVICK, John. **Daylight simulation**: validation, sky models and daylight coefficients. Tese (Doutorado) – Institute of Energy and Sustainable Development (IESD). De Montfort University, Leicester, UK, 1999. Disponível em: < <http://www.iesd.dmu.ac.uk/~jm> > . Acesso em 19 Dez 2006.

_____. **Examples of climate-based daylight modeling**. Paper nº 67. Institute of Energy and Sustainable Development (IESD). De Montfort University, Leicester, UK, 2005. Disponível em: < <http://www.cibse.org/pdfs> > . Acesso em: 21 Jan 2007.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA. Fundo de fortalecimento da escola. **Espaços Educativos. Ensino Fundamental**. Subsídios para elaboração de projetos e adequação de edificações escolares. Brasília: FUNDESCOLA / MEC, 2002. V1 195 p. – V2 124 p.

MOORE, Fuller. **Concepts and practice of architectural daylighting**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.

NICKLAS, Michael H., BAILEY, Gary B. **Analysis of performance of students in daylight schools**. Raleigh, Carolina do Norte: Innovative Design, 2002. Disponível em: <www.innovativedesign.net>. Acesso: 20 set. 2006.

OFFICE OF SUPERINTENDENT OF PUBLIC INSTRUCTION. **Washington sustainable schools**: Protocol for high performance schools. Washington: School Facilities Organization – Office of Superintendent of Public Instruction, março de 2004. 73 p. Disponível em: < <http://www.k12.wa.us/SchFacilities/default.aspx> >. Acesso: 4 nov. 2006.

_____. **Washington sustainable schools**: Planning workbook for high performance schools. Washington: School Facilities Organization – Office of Superintendent of Public Instruction, março de 2004. 97 p. Disponível em: < <http://www.k12.wa.us/SchFacilities/default.aspx> >. Acesso: 4 nov. 2006.

ORNSTEIN, Sheila, BORELLI NETO, José (coord.). **O desempenho dos edifícios da rede estadual de ensino**: o caso da grande São Paulo. Avaliação técnica: primeiros resultados. São Paulo: FAUUSP, Departamento de Tecnologia, CNPQ, 1993.

PEREIRA, Daniela Cardoso Laudares. **Modelos físicos reduzidos**: uma ferramenta para a avaliação da iluminação natural. São Paulo, 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – FAUUSP, 2006. 245 p.

PEREIRA, Fernando O.R., SOUZA, Marcos B. **Iluminação**: apostila de conforto ambiental-iluminação. Florianópolis, 2005. Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa Catarina. 2005. 81 p.

PLYMPTON, Patrícia et al. **Daylighting in schools**: improving student performance and health at a price schools can afford (conference paper). Colorado: National Renewable Energy – U.S. Department of Energy, junho de 2000.

REINHART, C.F., MARDALJEVIC, J., ROGERS, Z. **Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design**. NRCC - National Research Council Canada - Institute for Research in Construction. Canada, 2006. Disponível em: < <http://irc.nrc.cnrc.gc.ca> >. Acesso: 01 nov. 2006.

RENNHACKKAMP, W.M.H. **School Lighting**: technical report by the National Building Research Institute on an aspect of school buildings research. Pretoria, South African Council for Scientific and Industrial Research, 1964. 47 p.

ROBBINS, Claude L. **Daylighting design and analysis**. New York ,Van Nostrand Reinhold Company, 1986. 877 p.

SCARAZZATO, Paulo Sérgio. **O conceito de dia típico de projeto aplicado à iluminação natural**: dados referenciais para localidades brasileiras. São Paulo, 1995. Tese (doutoramento em arquitetura) - FAUUSP, 1995.

_____. **Software DLN:** ferramenta de avaliação da disponibilidade de luz natural para o desenvolvimento de projetos de arquitetura. Revista Lume Arquitetura, nº 10, 2004.

SCHILER, Marc E. **Toward a definition of glare:** can qualitative issues be quantified? In: 2nd EAAE-ARCC Conference on architectural research, July 4-8, 2000, Paris, France. Disponível em: <<http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/papers/>>. Acesso em: 20 out. 2006.

SCHILER, Marc E., JAPPEE, Shweta A. **Interior Illuminance, daylight controls and occupant response.** Vital Signs Project. Center for Environmental Design Research at the University of California. Berkeley, 1999. 120 p. Disponível em: <<http://arch.ced.berkeley.edu/vitalsigns/>>. Acesso em: 21 out. 2006.

TREGENZA, Peter, LOE, David. **The design of lighting.** London, Spon Press, 1998. 164 p.

VOS, Johannes J. **Reflections on glare.** 2003. Lighting Research Technology. 35, 2. pp. 163-176.

WEI, Wu. **An investigation into the relationship between daylighting quality and quantity for school buildings in Hong Kong.** Novembro de 2002. 184 p. Tese (Doutorado em Arquitetura), The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong.

WEI, Wu, NG, Edward. **A review of the development of daylight in schools.** Lighting research and Technology, Vol. 35 (2) , p. 111-125, 2003. Disponível em: <www.ingentaconnect.com>. Acesso em: 19 set. 2006.

WIENKE, Uwe. **Aria calore luce.** Il comfort ambientale negli edifici. Roma: DEI Tipografia del Genio Civile, 2005. 372 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALUCCI, Márcia Peinado. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica**: procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projetos. São Paulo, 1993. Tese (doutoramento em arquitetura) – FAUUSP, 1993.

AMBROGI, Ingrid Hötte. **A arquitetura escolar moderna na cidade de São Paulo e sua proposta para pensar o cotidiano escolar de 1949 a 1959**. *Revista Mackenzie Educação, Arte e História da Cultura*, São Paulo, ano 3/4, n.3/4, 2003/2004, p.161-169.

BAKER, N. FANCHIOTI, A., STEEMERS, K. **Daylighting in architecture**: a european reference book. London: James & James Ltd., 1993.

BARBUGIAN, Ércio. **Pré- fabricados de concreto na arquitetura escolar**. São Paulo, 2006. Tese (doutoramento em arquitetura) – FAUUSP, 2006.

BRADLEY, W.S. **Perceptions about the role of architecture on education**. Doctoral dissertation. Virginia: University of Virginia, 1996.

BRUBAKER, C. W. **Planning and designing schools**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1998.

BULLOUGH, John, REA, Mark S. **Lighting for neonatal intensive care units**: some critical information of design. Troy, New York: Lighting Research Center – Rensselaer Polytechnic Institute, 1996.

BUTTI, Ken, PERLIN, John. **A golden thread** – 2500 years of solar architecture and technology. New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1980. 289 p.

EHRENSTEIN, Wolfgang. **The eye sets the human biological clock** – consequences for the use of light and the lighting technology. Esslingen, Alemanha: University of Hohenheim, fevereiro de 2002.

FROTA, Anésia Barros. **Geometria da insolação**. São Paulo: Geros, 2004. 289 p.

HERTZBERGER, Herman. **Lições de arquitetura**. São Paulo: Editora Martins Fontes, 1996. 272 p.

HESCHONG, Lisa. **Thermal delight in architecture**. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1979. 78 p.

INNOVATIVE DESIGN INC. **Guide for daylighting schools**. Troy, New York: Lighting Research Center – Rensselaer Polytechnic Institute, 2004. Disponível em: www.lrc.rpi.edu/programs/daylighting >. Acesso em: 24 set. 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme. **Daylighting in buildings**: a source book on

daylighting systems and components. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, julho de 2000. 160 p.

LIMA, Mayumi Souza. **Caderno de recomendações de conforto ambiental para projetos de escolas do estado de São Paulo**. São Carlos: USP – Escola de Engenharia Campus São Carlos: USP – Escola de Engenharia Campus São Carlos, 1990.

MACEDO, Catharina C. **Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol**. Florianópolis, 2002, 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

MELENDEZ, Adilson. **Escolas modulares**. São Paulo: site ArcoWeb, publicado originalmente na revista Projeto Design edição nº 296 de outubro de 2004.

MOREIRA, Nanci Saraiva. **Espaços educativos para a escola de ensino médio: proposta para as escolas do estado de São Paulo**. São Paulo, 2006. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2005.

MICHEL, Lou. **Light: the shape of space**. Designing with space and light. New York : John Wiley and Sons Company, 1996. 277 p.

MILLET, Marieta. **Lighting revealing architecture**. New York : John Wiley and Sons Company, 1996.

NICKLAS, Michael H., BAILEY, Gary B. **Energy performance of daylit schools in North Carolina**. Raleigh, Carolina do Norte: Innovative Design, 2002.

OKUNO, Emico, VILELA, M.A.C. **Radiação ultravioleta: características e efeitos**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

PEDROSA et alli. **Análise do desempenho luminoso**. Estudo de caso de uma sala de aula do CEFET-MG. Artigo apresentado ao ENCAC 2003.

REA, Mark S. **Light – much more than vision**. Palo Alto, California: 5th International Lighting Research Symposium. The Lighting Research Office of the Electric Power Research Institute, 2002.

SASO, Medved. **Optimizing the form of school buildings by using the requirements for daylight illumination**. Architecture Science Review. University of Sidney, 2003. Disponível em: <http://www.highbeam.com> . Acesso em: 20 dez. 2006.

SCARAZZATO, Paulo Sérgio, ASSIS, Eleonora Sad de, SOUZA, Roberta V.G., ROMERO, Marcelo. **Dynamic of daylight in tropical humid climates and its influence on indoor environment** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDOOR AIR QUALITY AND CLIMATE, 7., 1996, Nagoya. Proceedings... 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. 1996. v.1. p.925-930.

SZABO, Ladislao P. **Em busca de uma luz paulistana:** a concepção de luz natural no projeto de arquitetos da cidade de São Paulo. Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2003.

VIANNA, Nelson Solano, GONÇALVES, Joana Carla Soares. **Iluminação e arquitetura.** São Paulo: Virtus, 2001. 378 p.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **National best practices manual for building high performances schools.** Washington, julho de 2002.

U.S. DEPARTMENT OF EDUCATION . **Schools as center of community:** a citizen's guide for planning and design. Washington D.C., abril 2000.

SITES DE INTERESSE RELACIONADOS AO ASSUNTO

www.inep.gov.br - site do “Instituto Nacional de Pesquisas e Estudos Educacionais” do governo federal brasileiro: estatísticas sobre educação e censo escolares. Acesso em: 15 dez. 2006.

www.fde.sp.gov.br - Fundação para o Desenvolvimento da Educação – página da FDE, que planeja, projeta e constrói edifícios para escolas de primeiro e segundo grau no Estado de São Paulo. Acesso em: 15 dez. 2006.

www.educacao.sp.gov.br - Secretaria da Educação do Estado de São Paulo – informações gerais sobre programas e metas da educação no Estado de São Paulo. Acesso em: 15 dez. 2006.

www.fnde.gov.br - página do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação – uma autarquia do Ministério da Educação – MEC – que repassa recursos para os estados, municípios e organizações não governamentais para projetos e ações nas escolas públicas de educação básica. Acesso em: 14 dez. 2006.

http://www.futuro.usp.br/centro_capacitacao/salas_de_aula.htm - página do projeto Salas de aula do futuro do Centro de Capacitação Profissional da USP. Acesso em: 15 dez. 2006.

http://www.aprenda450anos.com.br/450anos/escola_cidade/intro_escola_cidade.asp : site sobre a comemoração dos 450 anos da cidade de São Paulo, no item “A escola e a cidade” traz um resumo sobre a história da escola em São Paulo. Acesso em: 15 dez. 2006.

www.lrc.rpi.edu - site do Lighting Research Center do Rensselaer Polytechnic Institute do estado de New York, Estados Unidos. É um centro de referência em pesquisas nas áreas de eficiência energética e meio ambiente; novos produtos e tecnologia, projetos de iluminação e “human factors” em iluminação. Pode-se fazer o download gratuito do texto “The benefits of daylight through windows”, uma das

mais abrangentes revisões bibliográficas sobre os efeitos da iluminação natural sobre a saúde e a performance humanas, que abrange várias áreas de conhecimento: www.lrc.rpi.edu/programs/daylightdividends/pdf/DaylightBenefits.pdf

www.aia.org/cae_default - Comitê de Arquitetura para a Educação do American Institute of Architects (AIA). Acesso em: 15 dez. 2006.

www.bdp.it - site do INDIRE – Istituto Nazionale di Documentazione per la Innovazione e la Ricerca Educativa – do governo italiano que forma uma rede on-line cujo objetivo é divulgar e incentivar o conhecimento e a pesquisa em educação. Na seção “Abitare la scuola” – dedicada a escolas italianas e européias “belle da vedere e da vivere”, traz informações, discussões e uma galeria de exemplos de escolas com espaços de qualidade como parte integrante de um projeto educativo. Acesso em: 27 jan. 2005.

www.cefpi.com - “The school building association” – traz uma lista de publicações que podem ser compradas pela internet sobre projetos e construções escolares. Acesso em: 3 fev. 2006.

www.schoolclearinghouse.org - “NC Department of Public Instruction” – do estado da Carolina do Norte nos Estados Unidos . A proposta da seção “School Planning” é “ajudar escolas, arquitetos e designers a planejar e projetar escolas com instalações de alta qualidade que implemente a educação e acrescente valor duradouro às crianças e aos cidadãos do estado”. Traz exemplos de muitos projetos de escolas norte-americanas. Acesso em: 15 dez. 2006.

www.edfacilities.org - Criado em 1997 pelo Departamento de Educação do governo americano, o “National Clearing House for Educational Facilities” é um site de interesse público que divulga informações de como planejar, projetar, construir e manter escolas. Contem uma lista grande de livros, pesquisas, documentos e artigos de interesse sobre escolas sustentáveis. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://www.nrel.gov/> - site do National Renewable Energy Laboratory do Departamento de Energia dos Estados Unidos dedicado à energia renovável e eficiência energética. Disponível para download o texto “ A literature review of the effects of natural light on building occupants” através do link:

<http://www.nrel.gov/buildings/highperformance/pdfs/30769.pdf>

Acesso em: 26 ago. 2006.

<http://windows.lbl.gov/> - site do Lawrence Berkeley National Laboratory, laboratório do Departamento de Energia dos Estados Unidos administrado pela Universidade da Califórnia e que há mais de setenta anos vem se dedicando à pesquisa em ciência e engenharia. Este endereço é o do seu site dedicado ao estudo e à pesquisa sobre janelas e luz natural. Softwares para iluminação natural como Adeline, Radiance e Superlite, entre outros, podem ser conseguidos nesse site. Pode-se também fazer o download do texto “Tips for daylighting with windows”no seguinte link:

<http://windows.lbl.gov/pub/designguide/download.html>

Acesso em 21 jan. 2006.

<http://daylighting.org> - site do programa “The Daylighting Collaborative” desenvolvido pela Public Service Commission do estado de Wisconsin, Estados Unidos, para promover a difusão do uso do conceito da iluminação natural. Sua intenção é disponibilizar educação e treinamento para profissionais da construção e informações para investidores na área imobiliária e o público em geral. Acesso em; 24 jun 2006.

www.coe.uga.edu - site do College of Education da Universidade da Geórgia, nos Estados Unidos. Através do seu School Design and Planning Laboratory, divulga informações para projetos de escolas sustentáveis: especificações educacionais, tecnologias, conforto ambiental, eficiência energética, exemplos de escolas projetadas e construídas sob estes critérios. Acesso em: 15 dez. 2006.

www.nlb.org - site do National Lighting Bureau, formado por entidades do governo americano , da iniciativa privada e associações profissionais. John P. Bachner – Diretor de Comunicações. Acesso em: 14 dez. 2006.

www.h-m-g.com - A Heschong Mahone Group é uma empresa de consultoria na área de eficiência energética em edifícios, baseada em Fair Oaks, Califórnia. Seus principais sócios: Linda Heschong e David Mahone, são arquitetos e a empresa é composta também de consultores nas áreas de engenharia, economia e construção. O site disponibiliza as pesquisas sobre iluminação natural e produtividade desenvolvidas por Linda Heschong, sendo a mais conhecida e divulgada o texto “Daylighting in schools: an investigation into the relationship between daylighting and human performance”. Acesso em: 28 jan. 2005.

www.aasa.org - site oficial da Associação Americana de Administradores de Escolas. Baseada em Arlington, Virginia, USA, a entidade existe desde 1865 e seu objetivo é colaborar para a formação de líderes cujo papel é o de implementar a qualidade educacional nas escolas por todo o país como forma de ajudar a comunidade e reforçar as bases da democracia. Acesso em: 28 jan. 2005.

www.oecd.org - Programme on Educational Buildings (PEB) – Organization for Economics Co-operation and Development - organização internacional que promove e incentiva a pesquisa em instalações escolares. Acesso em: 15 dez. 2006.

www.betterbricks.com - este site é um projeto conjunto de um grande número de entidades reunidas na “The Northwest Energy Efficiency Alliance” que trabalham para implementar o uso eficiente da energia elétrica na região. Seu objetivo é, segundo o site, o de “ajudar aos profissionais a entender o poder da eficiência energética que faça uma diferença significativa em seus edifícios e em seus negócios”. Acesso em: 01 fev. 2006.

www.innovativedesign.net - site da empresa norte-americana de projetos de arquitetura e consultoria Innovative Design com sede na cidade de Raleigh, estado da Carolina do Norte, especializada em projeto e consultoria de edifícios sustentáveis. Nos últimos anos foi responsável pelo projeto “de 11 escolas iluminadas naturalmente, 38 projetos de renovação de escolas e atuaram como consultores em outros 28 projetos de escolas com iluminação natural”. O site da

empresa apresenta informações sobre os projetos, pesquisas e consultorias da própria empresa bem como oferece “links” para outros estudos. Acesso em: 29 jan. 2005.

www.greeningschools.org - Greening Schools é um projeto conjunto da Illinois Environmental Protection Agency e do Waste Management Resources Center do Departamento de Recursos Naturais do estado de Illinois, nos Estados Unidos. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/> - National Research Council of Canadá - organismo do governo do Canadá para pesquisa e desenvolvimento. Seu Institute for Research in Construction (IRC) tem estudos dedicados à iluminação natural. Acesso em: 15 dez. 2006. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://www.chpsvideos.com/index.asp> - Collaborative for High Performance Schools Videos Series. Vídeos sobre a utilização da iluminação natural em projetos de escolas. Acesso em: 14 dez. 2006.

<http://www.daylightingtraining.org/index.html> - “Daylighting in schools on line training” - treinamento de iluminação natural em escolas através de recursos on-line – patrocinado pelo Departamento de Energia americano através de seu programa “Rebuild América”. Aulas através de vídeos sobre cada tópico do programa. Acesso em: 14 dez. 2006.

<http://www.energysmartschools.gov/index.asp> - o Departamento de Energia dos Estados Unidos - DOE - criou em 1994 o programa “Energy Smart Schools”, que faz parte de um programa nacional “Rebuild América”, orientado para os estados e as comunidades do país se organizarem para conseguir “economizar energia, melhorando o desempenho de edifícios, diminuindo a poluição do ar através da redução de demanda por energia, e melhorando a qualidade de vida através de eficiência energética e tecnologias de energias renováveis”. Acesso: 15 dez. 2006.

<http://asumag.com/> - site da revista “American School and University “. Acesso em: 25 jan.2005.

<http://www.schooldesigns.com/> - espécie de revista virtual da mesma editora da “American School and Universty”, com informações voltadas para a área de construção de escolas. Pode-se localizar informações e projetos de centenas de escolas, procurando pelo nome, endereço, firma projetista ou palavra-chave. Oferece também uma lista de empresas e arquitetos envolvidos com construção de escolas, além de um guia de construção com dicas sobre projetos e obras de escolas. Acesso em 25 jan. 2006.

<http://www.matrixtours.com/tours/walkerelementary/> - Tour virtual pela Walker Elementary School, uma das HPS citadas nesta pesquisa. Acesso em 13 out. 2006.

<http://www.designshare.com/> - The International Forum for Innovative Schools, exclusivamente voltado para a relação entre arquitetura e educação, faz premiações anuais para os projetos de escola mais inovadores. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://www.chps.net/> - página do Collaborative for High Performance Schools da Califórnia, USA, disponibiliza o “Best practice manual for schools”. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://www.energydesignresources.com/> - site patrocinado por companhias da área de energia do sul da Califórnia, cujo objetivo é fornecer a arquitetos, engenheiros, construtores e incorporadores informações e instrumentos fáceis de análise rápida da eficiência energética de um edifício . Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://www.megatron.co.uk/homepage.html> - medidores de LFD, luminância e iluminância. Do mesmo site : <http://www.megatron.co.uk/homepage.html> - medidor de luz tridimensional (em um cubo) – medição mais real de como uma luz incidiria sobre um objeto ou edifício arquitetônico. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://schoolstudio.engr.wisc.edu/hps.html> - School Design Research Studio, dedicado à promoção de cursos presenciais e on-line sobre projetos de “high performance schools”. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://www.designlights.org/> - site do DesignLights Consortium, uma entidade voltada para a promoção do benefícios da iluminação eficiente na área comercial, tendo como público alvo arquitetos, designers, incorporadores e construtores. Acesso em: 15 dez. 2006.

<http://sclp.lightingresearch.org/> - página do “New York Energy Smart”, um programa do Estado americano de New York para promover principalmente a iluminação artificial energeticamente eficiente em pequenos espaços comerciais (SCLP). Acesso em: 26 dez. 2006.

<http://hpsnj.org> - página da HPSNJ – High Performance Schools New Jersey, uma colaboração entre a New Jersey School Construction Corporation e o Instituto de Tecnologia de New Jersey. Acesso em: 15 jan. 2007.

GLOSSÁRIO

Acuidade visual: capacidade de percepção nítida de dois pontos muito próximos entre si. É medida pelo valor do menor ângulo sob o qual o olho ainda consegue perceber dois objetos separados.

Albedo: é a capacidade de reflexão da radiação solar de uma determinada superfície. Vários fatores determinam o valor do albedo, entre os quais: tipo de solo, floresta, campo, água, tipo de urbanização. A posição dos raios solares também influencia no albedo (www.frigollete.com.br) .

Ângulo de corte: ângulo de visão crítico a partir do qual uma fonte não pode mais ser vista por causa de uma obstrução (como um beiral ou um difusor) (MOORE, 1985).

Ângulo sólido: é definido como a porção de espaço compreendida dentro de uma superfície cônica.

Ângulo visual: o ângulo subtendido por um objeto ou detalhe no ponto de observação.

Adaptação: processo pelo qual o sistema visual se acostuma a mais ou menos luz, resultado de uma modificação da sensibilidade dos olhos à luz (Moore).

Azimute: distância horizontal angular entre um plano contendo um ponto no céu e o norte verdadeiro.

Brilho: percepção subjetiva de luminância.

Campo visual: é a totalidade de pontos vistos simultaneamente com a cabeça e os olhos imóveis.

CIE: Commission Internationale de l'Ecleraige, associação internacional de iluminação cujos padrões, normas, procedimentos e definições são de uso corrente na Europa, porém menos amplamente aceitos na América do Norte (Moore).

Céu claro: céu com menos de 35% de cobertura de nuvens (ABNT, 2005).

Céu encoberto: céu com mais de 75% de cobertura de nuvens (ABNT, 2005).

Céu parcialmente encoberto: céu com cobertura de nuvens entre 35 e 75% (ABNT, 2005).

Contraste: diferença relativa de luminâncias observadas simultânea ou consecutivamente. $C = \frac{L1-L2}{L1}$, onde L1 é a luminância do objeto e L2 é luminância do fundo.

Declinação magnética: o eixo geográfico da Terra não coincide com o seu eixo magnético, do que decorre uma variação entre o Norte apontado pela bússola (magnética) e aquele conhecido como verdadeiro (geográfico) (Bittencourt, 2004).

Desempenho visual: avaliação quantitativa do desempenho de uma tarefa visual, levando-se em consideração velocidade e precisão (Moore).

Entorno visual: todas as porções do campo visual exceto a tarefa (Moore).

Exitância: a densidade do fluxo luminoso emitido por uma superfície num dado ponto.

Fator de luz diurna (FLD): relação entre a iluminação diurna total em um ponto no interior do local excluída a luz solar direta e a iluminação exterior simultânea sobre um plano horizontal iluminado pelo total da abóbada celeste de um céu encoberto normal.

IESNA: Illuminating Engineering Society of North America, associação profissional dedicada à disseminação do conhecimento relativo a arte e à ciência da iluminação (Moore).

Iluminância: nível de iluminação ou iluminamento, é a densidade do fluxo luminoso recebido por uma superfície. Unidade: lux (lm/m^2).

Iluminação difusa: iluminação em um plano de trabalho ou em objeto que não é predominantemente incidente de qualquer direção particular.

Iluminação lateral: porção da luz natural, produzida pela luz que entra lateralmente nos espaços internos (NBR 15215-3, 2005, p.3).

Iluminação solar direta: porção da iluminação natural proveniente diretamente do sol que incide num determinado local (NBR 15215-3, 2005, p.3).

Iluminação zenital: porção da iluminação natural produzida pela luz que entra através dos fechamentos superiores dos espaços internos (NBR 15215-3, 2005, p.3).

Lei do cosseno: a iluminância em qualquer superfície varia com o cosseno do ângulo de incidência. O ângulo de incidência é o ângulo entre a normal à superfície e a direção da luz incidente.

Luminância: é o quociente entre a intensidade luminosa em uma determinada direção e área aparente da fonte nesta mesma direção. Unidade: cd/m^2 .

Lux: unidade de iluminância no Sistema Internacional que corresponde a um lúmen por metro quadrado.

Luz: energia radiante capaz de excitar a retina e produzir sensação visual. É a porção visível do espectro eletromagnético na faixa de comprimento de onda entre 0.38 e 0.77 microns.

Micron: um milionésimo do metro (0,000001 m). Um milhão de microns = um metro.

Ofuscamento: falta de adaptação do olho provocada por luminância ou contraste excessivo no campo visual, provocando distúrbios e diminuindo a capacidade de distinguir detalhes nos objetos.

Plano de trabalho: plano sobre o qual interessa conhecer a iluminação pelas atividades que nele se realizam. Geralmente horizontal e a 80 cm do chão, pode ser também vertical ou inclinado.

Percepção visual: avaliação quantitativa de impressões transmitidas da retina ao cérebro em termos de informação sobre o mundo físico disposto diante do olho.

Radiação infravermelha: radiação eletromagnética com ondas muito longas para serem percebidas pelo olho humano (maior do que 0.77 microns e menor do que 1,000 microns).

Radiação ultravioleta (UV): qualquer energia radiante na faixa de comprimento de ondas entre 0.001 e 0.38 microns.

Refletância: proporção de fluxo luminoso incidente sobre uma superfície que é refletida na direção do observador, para dar à superfície a sua luminância. Poder refletor de uma superfície expressa em porcentagem (HOPKINSON).

Reflexão: processo pelo qual o fluxo de luz incidente deixa a superfície ou meio pelo lado incidente, sem modificação de frequência.

Reflexão difusa: processo pelo qual o fluxo incidente é redirecionado em vários ângulos.

Reflexão especular: é a reflexão resultante quando a radiação incidente sobre uma superfície é refletida sem difusão.

Refração: processo pelo qual a direção da luz muda quando passa obliquamente de um meio para outro no qual a sua velocidade é diferente (Moore).

Tarefa visual: detalhes e objetos que precisam ser vistos para o desempenho de uma determinada atividade, incluindo o fundo imediato do detalhe ou tarefa.

Transmitância: Num sistema que recebe energia radiante, fração dessa energia que é transmitida pelo sistema.

APÊNDICE A – ALGUNS EXEMPLOS DE ESCOLAS HPS AMERICANAS

Em 1996 a **Clackamas High School** foi escolhida para servir como exemplo de edifício sustentável com um desempenho excepcional em relação à conservação de energia. Conforme ensaios feitos anteriormente na fase de projeto com o programa DOE-2, ela é capaz de economizar energia a uma taxa de 40% abaixo dos índices exigidos pelos códigos de energia do estado do Oregon, nos Estados Unidos.

A escola foi projetada segundo os conceitos de edifícios sustentáveis levando-se em consideração o edifício como um todo e seu entorno. O edifício foi orientado em um eixo leste-oeste em relação ao terreno de modo a otimizar a iluminação natural, a ventilação e o acesso e controle da insolação. O acesso de luz natural ao interior diminui a carga térmica e os custos energéticos devidos à iluminação artificial. Sensores automáticos de presença, luz e dióxido de carbono fazem com que ar externo e luz sejam fornecidos somente quando necessários. A estratégia para a iluminação natural tem um papel central na concepção do projeto. Fonte: BetterBricks, 2006.

A **Ash Creek Intermediate School** representa tudo aquilo que se pode esperar de uma escola sustentável: usa recursos e energia eficientemente, é fácil e barata para manter e fornece um ambiente confortável, estimulante e saudável para funcionários, professores e estudantes. O edifício da escola *Ash Creek* tem um desempenho energético 30% mais eficiente do que o exigido pelos padrões do código de edificações do estado do Oregon nos Estados Unidos, que foi reconhecido como um dos melhores códigos do país. Grande parte desse desempenho se deve à estratégia de iluminação natural adotada em seu projeto. O nível de iluminação é o aspecto mais visível do projeto diferenciado para quem adentra a escola. A estratégia do projeto foi pensada de forma a permitir o acesso da luz natural no interior do edifício de várias maneiras. A escola é térrea e tem orientação norte-sul de modo a obter a máxima, mais controlada e mais balanceada luz natural. Iluminação zenital, janelas colocadas no alto de grandes pés direitos e prateleiras de luz acrescentam luz ao interior das salas de aula. (Oregon Office of Energy). Fonte: BetterBricks, 2006.

A escola **Dalles Middle School**, que tem quase 9.000 m², foi concluída no ano de 2002 e recebeu o prêmio “Green Building Council’s Gold Certification for Leadership in Energy and Environmental Design”, tornando-se a primeira escola do estado a ser certificada pelo LEEDS. Os arquitetos, com a cooperação do Laboratório de Iluminação Natural de Seattle criaram uma estratégia que fornece luz natural de alta qualidade a toda a estrutura de dois pavimentos. A orientação da escola e os dispositivos de iluminação natural oferecem uma visão do exterior para 90% dos ambientes ocupados, ao mesmo tempo em que reduz o uso anual de iluminação elétrica em 56%. Essa luz natural balanceada é obtida através de dispositivos como grandes janelas energeticamente eficientes, iluminação zenital e condutores tubulares de iluminação natural. Prateleiras de luz foram colocadas na parte superior das janelas para refletir a luz que entra para o teto, ao mesmo tempo em que sombreiam a parte inferior. Lâmpadas fluorescentes de alto desempenho com sensores de presença e sensores de luz natural ajudam a economizar energia. A escola foi projetada para ser pelo menos 46% mais eficiente do que uma escola projetada de acordo com o código energético do estado de Oregon, economizando cerca de 49.500 dólares por ano de energia. Fonte: BetterBricks, 2006.

A **Durant Road Middle School** de Raleigh, no estado americano da Carolina do Norte foi apontada em 1997 pelo Instituto Americano de Arquitetos como um edifício entre os dez menos agressivos ao meio ambiente dos Estados Unidos. Construída em 1995, essa escola tem uma economia anual em energia estimada de 21.000 dólares. Os principais elementos de projeto são sua orientação longitudinal leste-oeste de modo a reduzir o ganho térmico e favorecer a colocação de iluminação zenital orientadas a norte e a sul para as salas de aula e demais dependências que correspondem a um acréscimo de cerca de 30% da área envidraçada e ausência de áreas envidraçadas nas fachadas leste-oeste. Possui também equipamento de iluminação de alta eficiência com sensores de presença e de níveis de iluminação que ajustam automaticamente as lâmpadas fluorescentes de alto rendimento quando necessário (PLYMPTON, 2000).

Joan Austin Elementary School, em Newberg, Oregon. Esta escola de mais de 5.000 m², projetada para abrigar 550 estudantes, possui grandes áreas envidraçadas, uso de tubos que conduzem a luz do sol para o interior das salas de aula, iluminação zenital no ginásio de esportes, que iluminam com luz natural os espaços interiores, necessitando de pouca ou nenhuma iluminação artificial durante o dia. O tratamento das superfícies internas e externas com materiais de cores claras e de fácil manutenção ajuda a difundir a luz natural ao mesmo tempo em que são fáceis de manter. A integração de sistemas e materiais de grande desempenho promove uma significativa economia de energia, diminuindo dos custos de operação e manutenção ao longo do ciclo de vida do edifício. Fonte: BetterBricks, 2006.

Giadrone Middle School – Tacoma, Washington. Esta escola, com mais de 11.000 m², foi concluída em agosto de 2003. Projetada pela empresa Northwest Architectural Company com assessoria do Laboratório de Iluminação Natural de Seattle, está prevista para economizar 35% a mais de energia do que escolas que apenas seguem o código energético local. Estes resultados são obtidos principalmente através de uma estratégia de otimização da iluminação natural. A distribuição desta iluminação é obtida através de brises externos às janelas, prateleiras de luz internas e vidros de alta performance. Os espaços maiores utilizam uma combinação de iluminação zenital com janelas altas laterais para que a luz penetre fundo no ambiente. A iluminação elétrica é controlada através de foto sensores e controles eletrônicos que a ajustam automaticamente à iluminação natural, economizando energia. Fonte: BetterBricks, 2006.

APÊNDICE B – SÉRIES DE MEDIÇÕES REALIZADAS PELO DATALOGGER

09 NOV. 2006 11:53 HS Céu parcialmente encoberto	1ª SÉRIE DE MEDIÇÕES REALIZADA PELO DATALOGGER										
	PONTOS INTERNOS									EXTERNA DIFUSA	EXTERNA GLOBAL
	Sensor nº 5976	Sensor nº 5981	Sensor nº 5973	Sensor nº 5978	Sensor nº 5974	Sensor nº 5980	Sensor nº 5975	Sensor nº 5977	Sensor nº 5979	Sensor nº 5985	Sensor nº 5987
	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux
Medições	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
11:53:35	5595	6757	6247	2059	1668	2047	1511	1041	807	46372	94199
11:54:35	6203	6544	6223	2056	1787	1865	1304	1336	1007	47059	99172
11:55:35	6133	6650	6435	2037	1899	1899	1371	1430	1078	47471	103593
11:56:35	6367	6864	6529	2218	2046	2017	1487	1590	1162	48268	129840
12:00:35	5782	6143	5753	2170	1983	1881	1383	1445	1066	45823	104974
12:01:35	5524	5983	5495	2256	1993	2015	1516	1458	1045	45438	113815
12:02:35	5829	6143	5777	2459	2212	2124	1653	1695	1228	45603	134537
12:03:35	5103	5476	5025	2294	2041	1928	1496	1519	1116	42719	106355
12:04:35	4598	4948	4526	2070	1921	1751	1335	1438	1081	41428	102487
12:05:35	4457	4891	4432	2064	1869	1774	1325	1395	1068	41263	109947
12:06:35	4174	4609	4251	2018	1807	1696	1289	1359	1025	39862	105250
12:07:35	4506	4849	4475	2056	1904	1812	1330	1395	1048	41346	114920
Média	5356	5821	5431	2146	1928	1901	1417	1425	1061	44388	109924
Desvio padrão	763	829	854	136	142	131	113	157	100	2881	11908
Correção/Anel										50602	
DLN										45100	103100
Normalizado	3449	3749	3497	1382	1241	1224	912	918	683		

Tabela 10 – 1ª série de medições realizada pelo datalogger. Fonte: Autor.

09 NOV. 2006 12:24 HS Céu parcialmente encoberto	2ª SÉRIE DE MEDIÇÕES REALIZADA PELO DATALOGGER										
	PONTOS INTERNOS									EXTERNA DIFUSA	EXTERNA GLOBAL
	Sensor nº 5976	Sensor nº 5981	Sensor nº 5973	Sensor nº 5978	Sensor nº 5974	Sensor nº 5980	Sensor nº 5975	Sensor nº 5977	Sensor nº 5979	Sensor nº 5985	Sensor nº 5987
	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux
Medições	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
12:24:56	4209	5060	4747	1607	1143	963	1087	771	911	38791	102764
12:25:56	4225	4972	4634	1525	1332	1250	1135	1130	789	40714	114920
12:26:56	4347	4969	4714	1615	1464	1245	1092	1117	868	43818	122380
12:27:56	4497	5046	4813	1588	1483	1236	1053	1104	906	44120	121551
12:28:56	4240	4814	4686	1360	1252	1095	983	997	756	42994	100830
12:31:56	4361	4953	4759	1379	1265	1104	971	977	761	46125	99448
12:35:56	4326	4883	4637	1371	1235	1083	991	1000	771	52773	98619
12:36:56	4577	5166	4790	1431	1304	1108	969	990	784	55190	97791
12:37:56	4497	5217	4954	1385	1227	1045	966	1013	789	55245	101935
12:38:56	4506	5318	4931	1406	1220	1129	950	952	756	55547	95304
Média	4379	5040	4767	1467	1293	1126	1020	1005	809	47532	105554
Desvio padrão	133	156	110	105	108	93	66	104	62	6504	10114
Correção/Anel										54186	
DLN										44450	100850
Normalizado	2595	2987	2825	869	766	667	604	596	480		

Tabela 11 – 2ª série de medições realizada pelo datalogger. Fonte: Autor.

09 NOV. 2006 13 HS Céu encoberto / parcialmente encoberto	3ª SÉRIE DE MEDIÇÕES REALIZADA PELO DATALOGGER										
	PONTOS INTERNOS									EXTERNA DIFUSA	EXTERNA GLOBAL
	Sensor n° 5976	Sensor n° 5981	Sensor n° 5973	Sensor n° 5978	Sensor n° 5974	Sensor n° 5980	Sensor n° 5975	Sensor n° 5977	Sensor n° 5979	Sensor n° 5985	Sensor n° 5987
	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux
Medições	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
13:00:45	1812	1918	2359	930	1158	673	2074	2222	1441	52168	62150
13:02:45	1993	2303	2091	1127	1053	928	1872	1998	1619	51179	61321
13:06:45	1859	2046	1962	1046	1093	933	1927	2005	1512	49312	61321
13:07:45	1667	2239	2060	1081	1013	844	1682	1853	1570	48872	57729
13:08:45	1962	2062	1997	1122	891	940	1800	1830	1451	48103	58282
13:09:45	1913	2252	2086	1084	934	885	1857	1977	1517	49037	61321
13:10:45	2313	2826	2549	1249	1173	1049	2149	2265	1923	52965	90331
13:13:45	2192	2503	2451	1230	1033	1040	2031	2056	1606	52251	77345
13:14:45	2147	2537	2389	1255	1125	1045	1903	1929	1675	52058	77622
13:15:45	2337	2732	2380	1163	1080	1035	2079	2122	1735	52580	84529
13:16:45	2175	2698	2441	1160	1090	887	1817	1993	1725	52470	79279
13:17:45	2096	2439	2234	1052	916	942	1725	1789	1433	50575	67675
13:33:45	2234	2588	2382	1144	1008	963	1718	1774	1527	42554	81766
13:34:45	2540	2858	2608	1200	1115	1065	1932	2016	1801	36072	104698
13:36:45	2325	2639	2516	1154	1073	1035	1862	1809	1505	35110	89778
13:37:45	2472	2762	2674	1385	1255	1149	2115	2242	1875	36786	114368
13:38:45	2002	2239	2255	1092	934	928	1646	1626	1360	32858	75135
13:39:45	1733	1900	1865	873	767	735	1280	1308	1022	28215	48916
13:40:45	2369	2690	2491	1214	1125	1067	1829	1954	1720	35138	98343
13:41:45	2402	2537	2535	1355	1262	979	1877	1998	1746	35934	100277
13:42:45	2210	2324	2288	1195	1090	856	1653	1817	1601	34313	85358
13:43:45	2227	2300	2230	1136	1013	869	1605	1733	1499	34011	79003
13:44:45	2508	2698	2436	1192	1182	1029	1930	2077	1751	35467	106079
13:45:45	2465	2818	2547	1317	1210	1140	2038	2201	1928	35550	112986
13:59:45	2096	2247	2166	1255	1083	1001	1908	1998	1718	28463	96962
14:00:45	1845	2025	1966	1247	969	979	1925	1929	1715	29726	96685
Média	2150	2430	2306	1164	1063	961	1855	1943	1614	41991	81895
Desvio padrão	249	295	225	116	116	111	189	208	195	8956	18464
Correção/Anel										47869	
DLN										43800	98600
Normalizado	1421	1606	1525	769	703	636	1226	1285	1067		

Tabela 12 – 3ª série de medições realizada pelo datalogger. Fonte: Autor.

09 NOV. 2006 14:43 HS Céu parcialmente encoberto	4ª SÉRIE DE MEDIÇÕES REALIZADAS PELO DATALOGGER										
	PONTOS INTERNOS									EXTERNA DIFUSA	EXTERNA GLOBAL
	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°	Sensor n°
	5976	5981	5973	5978	5974	5980	5975	5977	5979	5985	5987
	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux
Medições	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
14:43:01	2510	2012	1557	1260	969	805	1280	1232	1055	14728	86463
14:44:01	2098	2588	1310	1661	1466	1074	1612	1613	1433	14481	86187
14:45:01	2241	2634	1242	1615	1426	1154	1581	1550	1393	16211	85358
14:50:01	2173	2527	1158	1609	1317	919	1337	1395	1253	19260	71820
14:51:01	2189	2703	1221	1639	1399	967	1417	1420	1180	21101	69057
14:52:01	2323	2727	1339	1723	1513	835	1438	1618	1395	22007	74582
15:03:01	2393	2815	1263	1707	1449	944	1455	1550	1357	26045	72925
15:16:01	2002	2409	1261	1658	1344	992	1443	1512	1380	14920	75688
15:17:01	2313	2650	1494	1626	1354	1209	1516	1496	1342	16129	77069
15:18:01	2224	2674	1268	1764	1451	1168	1528	1466	1319	17283	77069
15:19:01	2023	2706	1367	1853	1578	1097	1585	1598	1327	17008	77069
15:24:01	2145	2655	1299	1894	1528	1129	1542	1560	1385	16211	77069
15:25:01	1869	2658	1278	1842	1526	1083	1537	1568	1370	14756	72372
15:26:01	2072	2756	1280	1769	1578	1076	1511	1578	1340	13657	71820
15:27:01	1932	2497	1256	1804	1496	953	1402	1542	1373	13492	68228
15:28:01	1855	2537	1332	1875	1556	922	1438	1649	1403	13574	68228
15:30:01	2281	2682	1285	1726	1553	1095	1446	1527	1347	14481	71267
15:31:01	2030	2703	1393	1829	1483	1047	1441	1570	1431	14865	71267
15:34:01	2227	2626	1285	1669	1481	1070	1385	1468	1355	14289	66846
15:36:01	2367	2706	1308	1607	1571	1015	1318	1463	1375	14206	65465
15:37:01	2231	2946	1461	1704	1638	1215	1330	1367	1375	14728	69886
15:38:01	1958	2852	1536	1839	1670	1013	1371	1529	1418	13657	68780
Média	2157	2639	1327	1712	1470	1036	1451	1512	1346	16231	73842
Desvio padrão	176	183	103	137	144	111	92	96	86	3210	6019
Correção/Anel										18503	
DLN										33500	65900
Normalizado	2822	3452	1736	2240	1923	1355	1898	1978	1760		

Tabela 13 – 4ª série de medições realizada pelo datalogger. Fonte: Autor.

09 nov. 2006 15:51 HS céu claro	5ª SÉRIE DE MEDIÇÕES REALIZADA PELO DATALOGGER										
	PONTOS INTERNOS									EXTERNA DIFUSA	EXTERNA GLOBAL
	5976	5981	5973	5978	5974	5980	5975	5977	5979	5985	5987
	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux	Lux
Medições	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
15:51:45	1237	482	1381	1620	1436	2669	6929	6635	6016	10745	59387
15:52:45	928	968	1809	2148	1916	2366	6640	7043	6041	9207	59387
15:53:45	1127	893	1722	2148	1936	2450	6592	7094	5991	9536	59110
15:54:45	895	1006	1785	2040	1901	2391	6568	7094	5965	9536	58005
15:55:45	883	931	1837	2178	1854	2461	6664	7043	6041	9427	57453
15:56:45	689	1043	1776	2029	2013	2407	6640	7145	6092	9097	57176
15:57:45	614	1080	1802	2037	1916	2468	6712	7119	6117	9317	56348
15:58:45	967	955	1743	2121	1944	2423	6712	7170	6117	9317	56182
16:00:45	904	936	1769	2172	1901	2516	6809	7195	6168	9097	55242
16:01:45	916	939	1823	2256	2016	2521	6857	7425	6194	9207	54994
Média	916	923	1745	2075	1883	2467	6712	7096	6074	9449	57328
Desvio padrão	181	165	133	176	165	87	118	196	76	482	1641
Correção/Anel										10771	
DLN										12300	61700
Normalizado	756	762	1439	1712	1554	2036	5538	5855	5012		

Tabela 14 – 5ª série de medições realizada pelo datalogger. Fonte: Autor.

ANEXO A – BRISES PADRONIZADOS PELA CONESP

Figura 45 – Brises padronizados pela CONESP. Fonte: CONESP, 1977.

ANEXO B – RESUMO DO LEVANTAMENTO FEITO PELA ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Código de identificação da escola	Orientação	ILUMINAÇÃO NA SALA DE AULA									
		BRISE						AVALIAÇÃO			
		Não há	Tipo				Problemas de manutenção		Boa	Regular	Ruim
Elemento vazado	Chapa de Fibrocimento		Chapa metálica	Outros	Sim	Não					
01.15.032	N/S										
01.15.033	SE/NO										
01.15.034	L/O										
01.17.128	NO/SE										
01.18.125	N/S/O										
01.18.129	N										
01.18.132	SE/NO										
01.18.133	L/O										
01.20.106	SE										
01.23.134	L/O										
01.24.181	N										
01.24.192	O										
01.26.122	L/O										
01.27.117	NE/SO										
01.17.119	L/O										
01.27.120	NO										
01.31.106	NO/SE										
01.31.108	SE										
01.32.156	NE/SO/NO										
01.32.162	N										
01.33.161	NE/SO										
01.33.166	O										
01.33.701	N/NE										
01.35.127	NO/SE										
01.35.139	SO										
01.36.127	L/O										
01.36.128	N/S										
01.36.130	NE SO										
01.23.127	N										
01.27.112	O										

Código de identificação da escola	Orientação	ILUMINAÇÃO NA SALA DE AULA									
		BRISE						AVALIAÇÃO			
		Não há	Tipo				Problemas de manutenção		Boa	Regular	Ruim
			Elemento vazado	Chapa de Fibrocimento	Chapa metálica	Outros	Sim	Não			
00.03.117	N / S										
00.08.125	O										
00.08.126	NE /SO										
00.09.155	SE /NO										
00.15.130	NO /SE										
00.15.134	NE /SO										
00.16.137	SE/NO/SO										
00.17.163	L /O										
00.16.176	L/O/N/S										
00.19.190	NE / SO										
00.30.151	L /O										
00.59.184	NE /SO										
00.159.186	N / S										
00.62.122	L /O										
01.01.113	SE										
01.06.106	SE										
01.05.105	N / S										
01.06.146	NE /SO										
01.06.150	N / S										
01.06.152	SE /NO										
01.08.149	SE /NO										
01.08.155	NE / SO										
01.08.160	NE										
01.09.132	SE										
01.09.133	L /O										
01.11.114	SE										
01.12.116	N / S										
01.13.120	NE / SO										
01.13.122	S										
01.15.022	N / S										

Quadro 4 – Resumo do levantamento das condições de iluminação natural feito pela Escola de Engenharia de São Carlos. Fonte: LIMA, 2002.

ANEXO C – DISPONIBILIDADE DE LUZ NATURAL PARA SÃO PAULO

Gráfico 13 – Valores de disponibilidade de luz natural para solstício de verão em São Paulo. (em kilolux). Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.

Gráfico 14 – Valores de disponibilidade de luz natural para solstício de inverno em São Paulo (em kilolux). Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.

Gráfico 15 – Valores de disponibilidade de luz natural para equinócio de outono em São Paulo (em kilolux). Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.

Gráfico 16 – Valores de disponibilidade de luz natural para equinócio de primavera em São Paulo (em kilolux). Fonte: programa DLN, Scarazzato, 1995.