

BRUNA LUZ

CONDUÇÃO DA LUZ NATURAL

POR SISTEMAS NÃO CONVENCIONAIS

SÃO PAULO  
2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**BRUNA LUZ**

**Condução da luz natural por sistemas não convencionais**

**Orientado pela Profª Drª Márcia Peinado Alucci**



Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre  
em Arquitetura e Urbanismo

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

**São Paulo  
2009**

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.

E-MAIL:bluz.79@gmail.com

Luz, Bruna  
L979c Condução da luz natural por sistemas não convencionais /  
Bruna Luz. -- São Paulo, 2009.  
171 p. : il.

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

Orientador: Márcia Peinado Alucci

1. Iluminação natural (Eficiência) 2. Iluminação natural (Sistemas) I. Título

CDU 043:628.92

**Todos somos luzes.  
O pensamento é o nosso sistema condutor.**



**Aos meus pais pela vida e oportunidades...  
À Sarah pela paciência e incentivo.  
Ao Flávio pelo amor e companheirismo em todos os momentos.**



AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que estiveram ao meu lado nesses três últimos anos, participando, apoiando, colaborando e vivenciando os momentos de aprendizados, dificuldades, descobertas, superações e fé! Partilharam comigo anos que não voltam mais, mas que também não se apagam mais... A vocês meu sincero obrigado!!!

À Deus por proporcionar ao homem a capacidade de pensar e com ela a consciência da nossa pequenez diante da imensidão do conhecimento e do vasto universo a ser descoberto.

À minha família, em especial à minha mãe Maria Benedita e ao meu pai José Roberto pelas oportunidades proporcionadas ao longo da vida, e à minha irmã Sarah por existir em minha vida, ao Flávio por ter entrado em minha vida e preenchido o espaço que é, sempre foi, e espero que sempre seja dele, sem falar do orgulho de ter vocês como referência no mundo, muito obrigada!

Aos amigos Marina Gomes Mendes, Gláucia Fernanda Frederico, Luciano Gobitta, Paulinha e Mauro (Nenê), Cíntia de Lima, Sandy Belmonte Garcez e Anelise Stein, que em todos os momentos estão presente, trazendo um alento, uma palavra de incentivo, um apoio quando parece não haver por onde, vocês tornam a vida uma experiência fantástica.

À minha orientadora e muitas vezes desorientadora (no bom sentido) Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Márcia Peinado Alucci, pelo conhecimento, atenção, oportunidades, paciência e inspiração, sem você, nós, os seus alunos, não seríamos os mesmos.

Aos professores do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (LABAUT – FAUUSP): Prof<sup>a</sup> Joana Carla Soares Gonçalves, pela amizade e incentivo em todos os momentos; Prof<sup>a</sup> Anésia Barros Frota, pelo carinho, oportunidades e conhecimentos dedicados; Prof<sup>a</sup> Denise Helena Silva Duarte, por seu apoio em momentos cruciais; Prof<sup>o</sup> José Fernando Cremonesi, por sua atenção e simpatia todos os dias; e a nossa querida ex-professora do grupo Prof<sup>a</sup> Roberta Kronka, por sua amizade e energia que nos tem feito tanta falta.

Aos amigos do LABAUT/FAUUSP, pós-graduandos, alunos de iniciação científica e secretária(o)/estagiário que de algum modo colaboraram para este trabalho chegar

## AGRADECIMENTOS

ao fim com qualidade e consistência. Ao amigo, orientador honorário, conselheiro, “aureléo”, e mais uma infinidade de qualidades, prestações de serviços e colaborações mil que não haveria papel e tempo no mundo para listá-las Leonardo Marques Monteiro (Léo) sem você essa pesquisa seria outra. À incansável colaboração do amigo para todas as horas Rafael Silva Brandão (Rafinha). À disposição e solidariedade da amiga Alessandra Prata Shimomura (Alê). Ao sincero e divertido apoio moral e por vezes mão na massa da inigualável e inesquecível Anna Christina Miana (Kiquinha). Às Mônica Marcondes (Moniquinha) e Carolina Gaspar Leite (Carol) pela companhia em momentos que só nós mesmo nesse fim de mundo... Aos meus queridos “orientandinhos” Augusto Macieira, Giovanna Seraphim e Amanda Mônaco, sem vocês os ensaios não teriam o mesmo brilho. Aos secretários Alessandra Vialogo, Luiz Alberto Pignatari e Carlos Bayer (Kadu) pelo apoio em diversos momentos. Galera muitíssimo obrigada!!!

Ao Prof<sup>o</sup> Norberto Corrêa da Silva Moura pela amizade, colaboração, paciência, persistência, atenção e esclarecimentos ao longo de toda a pesquisa desde os períodos remotos da iniciação científica.

À Prof<sup>a</sup> Lucila Chebel Labaki por sua disponibilidade, dedicação e contribuições à pesquisa.

Às secretárias Silvana, Viviane e Eliane, do Departamento de Tecnologia (AUT), pela paciência e auxílio em todas as dificuldades burocráticas e cafezinhos de todos os dias.

Aos funcionários do Laboratório de Modelos e Ensaios da FAUUSP (LAME) pelo apoio na confecção dos modelos.

À CEBRACE pelos espelhos doados.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

Bruna Luz

LUZ, Bruna. Condução da luz natural por sistemas não convencionais. 171p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

O objeto desta pesquisa é a condução da luz natural, por sistemas não convencionais, para aproveitamento em ambientes internos. O objetivo é avaliar a eficiência luminosa dos sistemas condutores não convencionais. Especificamente, foram avaliados dutos com seção quadrada de 10cm, 25cm e 40cm e comprimentos de 1m, 1,5 e 2m, revestidos internamente por espelhos Optimirror Plus. O método utilizado é experimental indutivo (ensaio com modelos em escala real e reduzida para aquisição de dados de iluminância) com análise comparativa de resultados, fornecendo subsídios para a proposição de modelagem matemática. Essa é desenvolvida com base nos conceitos e princípios físicos relativos à iluminação natural, verificando-se sua aplicabilidade por meio da correlação de seus resultados com os observados empiricamente nos ensaios realizados. Os produtos finais da pesquisa são: (1) procedimento para ensaio de dutos de luz sob condições de céu real e artificial (modelo caixa cúbica de espelhos); (2) proposição do fator de eficiência em dutos de luz (EDL); (3) eficiência dos dutos de luz espelhados de seção quadrada (10cm, 25cm e 40cm) nos comprimentos 1m, 1,5m e 2m; e (4) modelo preditivo de eficiência luminosa em dutos (MPELD).

Palavras Chave: condução da luz natural, sistemas não convencionais de aberturas, iluminação natural.



LUZ, Bruna. Daylighting conduction by non-conventional systems. 171p. Thesis (Master). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

The object of this research is the conduction of daylighting, by non-conventional systems, for indoor use. The objective is to assess the luminous efficiency of the non-conventional conductor systems. Specifically, ducts with square section of 10cm, 25cm and 40cm and 1m lengths, 1.5 and 2m, Optimirror Plus coated, were assessed. The method adopted is experimental inductive (testing with real scale and models for illuminance data acquisition) and comparative analysis of results, providing support to the proposition of mathematical modeling. This modeling is developed based on physical principles and concepts related to daylighting, verifying its applicability by the correlation of its results with those observed in the empirical tests. The final products of the research are: (1) procedure for testing ducts of light under conditions of real and artificial sky (mirror cubic box); (2) proposition of ducts of light efficiency factor (EDL); (3) efficiency in ducts of light with mirrored square section (10cm, 25cm and 40cm) and length of 1m, 1.5m and 2m; and (4) predictive model of luminous efficiency in ducts (MPELD).

Keywords: conduction of daylighting, non-conventional aperture systems, daylighting.



1	-INTRODUÇÃO .....	25
1.1	OBJETO .....	30
1.2	OBJETIVO .....	30
1.3	MÉTODO .....	30
1.4	RESULTADOS .....	30
1.5	ESTRUTURA .....	30
2	SISTEMAS DE ABERTURA PARA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	35
2.1	CONVENCIONAIS .....	38
2.1.1	SISTEMAS LATERAIS .....	38
2.1.2	SISTEMAS ZENITAIS .....	39
2.1.3	MECÂNIISMOS DE CONTROLE .....	39
2.2	NÃO CONVENCIONAIS .....	41
2.2.1	CAPTADORES .....	44
2.2.2	CONDUTORES .....	45
2.2.2.1	DUTO DE LUZ .....	47
2.2.2.2	GUIAS SÓLIDAS .....	48
2.2.2.3	GUIAS LIQUIDAS .....	48
2.2.2.4	FIBRA ÓPTICA .....	49
2.2.3	DIFUSORES .....	50
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	51
3	CONCEITUAÇÃO E FENÔMENOS RELATIVOS À CONDUÇÃO DA LUZ NATURAL 55	
3.1	FENÔMENOS FÍSICOS .....	55
3.1.1	RADIAÇÃO .....	55
3.1.2	LUZ .....	56
3.1.3	ABSORÇÃO .....	56
3.1.4	DIFUSÃO .....	56
3.1.5	REFRAÇÃO .....	56
3.1.6	REFLEXÃO .....	57
3.1.6.1	REFLEXÃO DIRETA (NORMAL OU ESPECULAR) .....	59
3.1.6.2	REFLEXÃO DIFUSA .....	59
3.1.6.3	REFLEXÃO TOTAL .....	60
3.1.6.4	FUNÇÃO BIDIRECIONAL DE DISTRIBUIÇÃO POR REFLEXÃO DA LUZ (BRDF) .....	61
3.1.7	TRANSMISSÃO LUMINOSA .....	62
3.1.7.1	FUNÇÃO BIDIRECIONAL DE DISTRIBUIÇÃO POR TRANSMISSÃO DA LUZ (BTDF) .....	64
3.2	GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS .....	65
3.2.1	INTENSIDADE LUMINOSA .....	65
3.2.2	FLUXO LUMINOSO .....	65
3.2.3	ILUMINÂNCIA .....	66
3.2.4	LUMINÂNCIA .....	66
3.2.5	EXITÂNCIA .....	67
3.3	CONCEITOS .....	67
3.3.1	ÂNGULO SÓLIDO .....	67
3.3.2	LEI DO CO-SENO OU LEI DE LAMBERT .....	68
3.3.3	LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA .....	69
3.3.4	FATOR DE CONFIGURAÇÃO .....	70
3.3.5	FATOR DE FORMA .....	71
3.3.6	PRINCÍPIO DO ÂNGULO SÓLIDO PROJETADO OU CONCEITO HEMISFÉRIO UNITÁRIO .....	72
3.3.7	PRINCÍPIO DO FLUXO DIVIDIDO .....	74
3.4	FONTES DE LUZ .....	75
3.4.1	CÉU REAL .....	77
3.4.1.1	CLARO .....	78
3.4.1.2	PARCIALMENTE ENCOBERTO .....	78
3.4.1.3	ENCOBERTO .....	79

## SUMÁRIO

3.4.2	CÉU ARTIFICIAL .....	79
3.4.2.1	RETILÍNIO .....	80
3.4.2.2	HEMISFÉRICO.....	81
4	MÉTODOS, MODELOS E FERRAMENTAS DE CÁLCULO .....	85
4.1	MODELOS FÍSICOS.....	85
4.1.1	TIPO E ESCALA DOS MODELOS .....	85
4.1.2	TAMANHO DA FOTOCÉLULA .....	86
4.1.3	O QUE REPRESENTAR.....	86
4.1.4	GEOMETRIA DOS AMBIENTES .....	87
4.1.5	DIAS E HORÁRIOS DAS MEDIÇÕES .....	88
4.1.6	LOCALIZAÇÃO DAS FOTOCÉLULAS .....	88
4.1.7	QUANTIDADE DE FOTOCÉLULAS .....	89
4.1.8	CORREÇÕES .....	89
4.2	MODELOS MATEMÁTICOS .....	91
4.2.1	MÉTODO DOS LUMENS.....	91
4.2.2	MÉTODO DO FATOR DE LUZ DIURNA (FLD).....	92
4.2.2.1	COMPONENTE CELESTE – CC .....	93
4.2.2.2	COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA – CRE .....	94
4.2.2.3	COMPONENTE REFLETIDA INTERNA – CRI.....	95
4.2.3	MÉTODO DA TRANFERÊNCIA DE FLUXOS.....	97
4.2.4	MODELOS COMPUTACIONAIS .....	98
4.2.4.1	MÉTODO DO RAIO TRAÇADO (RAY TRACING).....	100
4.2.4.2	MÉTODO DA RADIOSIDADE (RADIOSITY).....	100
5	ESTUDO EXPERIMENTAL.....	103
5.1	SELEÇÃO DO SISTEMA ENSAIADO .....	103
5.2	CONFECÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS.....	105
5.3	CONDIÇÃO DE EXPOSIÇÃO .....	106
5.3.1	Céu Real .....	107
5.3.2	Céu Artificial .....	107
5.4	LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES FOTOELÉTRICOS (LUXIMETRO).....	108
5.5	TRATAMENTO DOS DADOS .....	110
5.6	ENSAIOS SOB CONDIÇÕES REAIS.....	110
5.6.1	GRUPO 1 – MODELO EM ESCALA REAL .....	110
5.6.2	GRUPO 2 – MODELOS EM ESCALA REDUZIDA.....	113
5.7	ENSAIOS SOB CONDIÇÕES ARTIFICIAIS (CÉU ARTIFICIAL).....	116
5.7.1	GRUPO 3 – MODELO EM ESCALA REDUZIDA .....	116
5.8	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS.....	118
5.8.1	CORRELAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO .....	118
5.8.2	CORRELAÇÃO ENTRE AS ESCALA DOS MODELOS.....	120
5.8.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	121
6	MODELO PREDITIVO DE EFICIÊNCIA LUMINOSA EM DUTOS .....	125
6.1	COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS MEDIDOS.....	131
6.2	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	136
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	139
7.1	INSERÇÃO DA PESQUISA NO ESTADO DA ARTE.....	140
7.2	APLICAÇÃO DOS RESULTADOS .....	141
7.2.1	USOS PRÁTICOS.....	141
7.2.2	USOS TEÓRICOS .....	141
7.3	DESDOBRAMENTOS FUTUROS.....	142
7.3.1	PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA .....	142
7.3.2	OUTRAS POSSIBILIDADES DE PESQUISA.....	142
7.4	CONSIDERAÇÃO FINAL .....	144
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	147
	ANEXOS .....	155
	A. TABELAS COM LEVANTAMENTO DOS SISTEMAS NÃO CONVENCIONAIS DE CAPTAÇÃO, CONDUÇÃO E DIFUSÃO DA LUZ NATURAL.....	155
	B. TABELAS COM OS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS.....	164

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1. Bartenbach – Laboratório Austríaco – pesquisas em iluminação .....	25
Ilustração 2. Monitoramento de dutos de luz em edifício de escritório .....	28
Ilustração 3. Proposta de Sistema não convencional .....	28
Ilustração 4. Ambientes subterrâneos iluminados naturalmente .....	36
Ilustração 5. Daylight Collector - Himawari .....	37
Ilustração 6. Sun Light – luminárias naturais da Robert's Sistemas Industriais .....	37
Ilustração 7. Controle Convencional da Luz Natural – Cobogó- Foto.....	40
Ilustração 8. Fluxograma – Sistemas não convencionais para iluminação natural .....	41
Ilustração 9. Exemplos de sistemas não convencionais que utilizam espelhos.....	42
Ilustração 10. Exemplos de sistemas não convencionais que utilizam lentes.....	42
Ilustração 11. Exemplos de sistemas não convencionais que utilizam prismas.....	42
Ilustração 12. Sistemas móveis para captação da luz.....	44
Ilustração 13. Sistemas fixos para captação da luz.....	45
Ilustração 14. Dutos para a condução da luz.....	45
Ilustração 15. Condutores da luz por reflexão total.....	46
Ilustração 16. Dutos de luz.....	47
Ilustração 17. Exemplo de guia sólida – light rods .....	48
Ilustração 18. Exemplo de guia líquida .....	49
Ilustração 19. Exemplo de fibra óptica .....	50
Ilustração 20. Exemplo de difusores .....	51
Ilustração 21. Distribuição da luz por reflexão em superfícies opacas.....	58
Ilustração 22. Reflexão direta ou especular.....	59
Ilustração 23. Reflexão difusa.....	59
Ilustração 24. Difusor perfeito .....	60
Ilustração 25. Lei de Lambert.....	60
Ilustração 26. Reflexão total da luz .....	61
Ilustração 27. Distribuição bidirecional por reflexão em superfícies opacas.....	62
Ilustração 28. Distribuição da luz por transmissão em superfícies transparentes.....	63
Ilustração 29. Distribuição bidirecional por reflexão em superfícies opacas.....	64
Ilustração 30. Ângulo Sólido.....	67
Ilustração 31. Lei do Co-seno ou Lei de Lambert.....	68
Ilustração 32. Lei do Inverso do quadrado da Distância – representação gráfica.....	69
Ilustração 33. Plano fonte de luz.....	70
Ilustração 34. Hemisfera de raio unitário e sua projeção no plano horizontal.....	72
Ilustração 35. Princípio do Ângulo Sólido Projetado – ABNT 15215 (2005).....	73
Ilustração 36. Princípio do Fluxo Dividido.....	74
Ilustração 37. Condição de Céu – Foto.....	78
Ilustração 38. Céu Retilíneo – Caixa Cúbica de Espelhos .....	81
Ilustração 39. Céu Hemisférico.....	81
Ilustração 40. As Componentes do FLD .....	92
Ilustração 41. Dimensão dos dutos construídos .....	105
Ilustração 42. Detalhe do encaixe do espelho na madeira .....	105
Ilustração 43. Foto dos dutos construídos – modelos em escala real.....	106
Ilustração 44. Foto dos dutos construídos – modelo em escala reduzida.....	106
Ilustração 45. Foto da condição de céu no dia 26/05/2008 .....	107
Ilustração 46. Foto da condição de céu no dia 22/04/2009 .....	107
Ilustração 47. Foto da condição de céu no dia 06/05/2009 .....	107
Ilustração 48. Foto do equipamento Céu Artificial do LABAUT .....	108
Ilustração 49. Gráfico de Calibragem do Equipamento Céu Artificial do LABAUT.....	108
Ilustração 50. Esquema - Posicionamento dos Luxímetros .....	108
Ilustração 51. Esquema - Posicionamento dos Sensores Fotoelétricos.....	109
Ilustração 52. Foto - Posicionamento dos Luxímetros .....	109
Ilustração 53. Foto – Suportes para apoio dos luxímetros.....	109
Ilustração 54. Foto dos dutos construídos – modelos em escala real.....	111
Ilustração 55. Esquema do comportamento da transmissão da luz com difusor .....	111
Ilustração 56. Grupo 1 (26/05/2008) – EDL – sem acrílico.....	112
Ilustração 57. Grupo 1 (22/04/2009 e 06/05/2009) – EDL – com e sem acrílico.....	113

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 58. Grupo 2 – EDL – Pluma – com e sem acrílico. ....	114
Ilustração 59. Grupo 2 – EDL – Optimirror Plus – com e sem acrílico. ....	115
Ilustração 60. Foto dos dutos construídos – modelo em escala reduzida. ....	116
Ilustração 61. Grupo 3 – EDL – Pluma e Optimirror Plus. ....	117
Ilustração 62. Correlação entre os valores de EDL dos grupos 1 e 3. ....	119
Ilustração 63. Correlação entre os valores de EDL dos grupos 2 e 3. ....	120
Ilustração 64. Correlação entre os valores de EDL dos grupos 1 e 2. ....	121
Ilustração 65. Luminâncias projetadas no hemisfério unitário. ....	126
Ilustração 66. Luminâncias projetadas no hemisfério unitário. ....	127
Ilustração 67. Coroas circulares. ....	128
Ilustração 68. Variação do $R^2$ em função da refletância. ....	133
Ilustração 69. Comparação entre EDL medido (modelo em escala real) e calculado ( $\rho=0,86$ ). .....	134
Ilustração 70. Correlação entre os valores de EDL medidos e calculados ( $\rho=0,86$ ). ....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficiente $C_1$ em função do ângulo de obstrução.....	75
Tabela 2. Nº de pontos de medição devidos ao índice do local (k) .....	89
Tabela 3. Fator de correção dos valores de transmitância.....	90
Tabela 4. Softwares para estudos de iluminação .....	99
Tabela 3. Critérios para escolha do sistema a ensaiado .....	104
Tabela 4. Comparação Grupo 1 e 3.....	118
Tabela 5. Comparação Grupo 2 e 3.....	119
Tabela 6. Correlação entre valores medidos e calculados ( $\rho=0,80$ a $\rho=0,90$ ). .....	132
Tabela 7 Captação Zenital por Sistema Fixo .....	155
Tabela 8 Captação Zenital ou Lateral por Sistema Fixo .....	157
Tabela 9 Captação Lateral por Sistema Fixo.....	158
Tabela 10 Captação Zenital por Sistema Móvel .....	159
Tabela 11 Exemplos de Dutos Verticais .....	161
Tabela 12 Exemplos de Dutos Horizontais .....	162
Tabela 13 Difusão por Reflexão da Luz - Refletores .....	162
Tabela 14 Difusão por Reflexão da Luz - Refletores .....	163
Tabela 15. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	164
Tabela 16. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	164
Tabela 17. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	164
Tabela 18. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	164
Tabela 19. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	165
Tabela 20. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	165
Tabela 21. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	165
Tabela 22. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	166
Tabela 23. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	166
Tabela 24. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	167
Tabela 25. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	167
Tabela 26. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	167
Tabela 27. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	168
Tabela 28. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	168
Tabela 29. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real. ....	168
Tabela 30. Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. ....	169
Tabela 31. Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. ....	169
Tabela 32. Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. ....	169
Tabela 33. Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. ....	170
Tabela 34. Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. ....	170
Tabela 35. Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. ....	170
Tabela 36. Grupo 3 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob fonte artificial. ....	171
Tabela 37. Grupo 3 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob fonte artificial. ....	171
Tabela 38. Grupo 3 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob fonte artificial. ....	171



**ABREVIACÕES E SÍMBOLOS**

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>BRDF</b>	Bidirectional Reflectance Distribution Function
<b>BRE</b>	British Research Establishment
<b>BTDF</b>	Bidirectional Transmittance Distribution Function
<b>CC</b>	Componente Celeste
<b>CIE</b>	Comission Internationale d'Éclerage
<b>CRE</b>	Componente de Reflexão Externa
<b>CRI</b>	Componente de Reflexão Interna
<b>DCRL</b>	Diagrama de Contribuição Relativa de Luz
<b>DF</b>	Daylight Factor
<b>EDL</b>	Eficiência em Dutos de Luz
<b>FLD</b>	Fator de luz do dia
<b>IES</b>	Illuminating Engineering Society
<b>IESNA</b>	Illuminating Engineering Society of North America
<b>MPELD</b>	Modelo Preditivo de Eficiência Luminosa em Dutos
<b>NBR</b>	Normas Brasileiras



**CAPÍTULO I**  
**INTRODUÇÃO**



## 1 -INTRODUÇÃO

Iluminar naturalmente por meio de sistemas não convencionais preenche a lacuna deixada pelos sistemas convencionais (janelas e clarabóias) permitindo que a luz natural seja conduzida a espaços e ambientes distantes das aberturas.

A iluminação natural, na arquitetura, não é simplesmente uma questão estética, mas também econômico-social e ambiental. Solucionar antigos problemas e inovar no aproveitamento desse recurso faz parte da preocupação e discussão tanto da sociedade como dos profissionais e pesquisadores do ambiente construído. O potencial energético e o caráter gratuito da fonte são os principais incentivos das pesquisas nessa área. Ressalta-se, ainda, que a influência da luz natural sobre fatores fisiológicos e psicológicos dos seres vivos, com destaque ao homem, juntamente com a qualidade luminosa proporcionada, impulsionam o desenvolvimento de novas soluções para o aproveitamento dessa.



heliostato



duto de luz



estudo de percepção

**Ilustração 1.** Bartenbach – Laboratório Austríaco – pesquisas em iluminação

**Fonte:** [www.bartenbach.com](http://www.bartenbach.com) acessado em 30/10/2009.

Com o avanço das pesquisas surgem inovações tecnológicas e iniciativas direcionadas para o aproveitamento da luz natural (Ilustração 1). Nesse contexto, os dutos de luz são sistemas desenvolvidos para conduzir a iluminação natural a ambientes distantes da abertura, como, por exemplo, salas sem contato direto com o meio externo ou em subsolos.

Os dutos de luz podem conduzir a luz na vertical ou na horizontal. Alguns sistemas captam a luz na cobertura e a conduzem na vertical até o ambiente no qual será distribuída, então a luz passa a ser conduzida por ramificações horizontais até a saída em luminárias difusoras ou focais.

**CAPÍTULO I**

Os sistemas não convencionais de condução da luz natural utilizam mecanismos ópticos para o seu controle, ao captá-la e transportá-la do meio externo para o interior dos edifícios. Desse modo, a condução da luz por esses sistemas ocorre pelos princípios físicos da reflexão, refração e difração. A eficiência do sistema depende da combinação entre as variáveis: dimensão, propriedade dos materiais e arranjo dos componentes. Esses sistemas, normalmente, apresentam-se divididos em três principais partes (captador, condutor e difusor) associadas a suas funções no processo de captação, condução e distribuição da luz no ambiente interno (JENKINS & TARIQ, 2004).

Os sistemas não convencionais com controle óptico, comercializados atualmente, podem ser divididos em quatro categorias principais: luminárias naturais (domus ou clarabóia com controle óptico), vidros e painéis especiais (vidro prismático e painel cortado a laser), condutores por reflexão total (guias líquidas, sólidas e fibra óptica) e dutos de luz. Esses últimos podem ser confundidos com sistemas convencionais zenitais ou com as luminárias naturais.

Desse modo, com relação ao condutor denominado por duto de luz, cabe definir melhor o que foi considerado neste trabalho por este tipo de condutor.

Entende-se por duto de luz as aberturas em que a relação entre a seção e o comprimento apresente-se de modo que o comprimento seja maior que o dobro do diâmetro ou da diagonal da seção. Desse modo, excluem-se da categoria dutos as luminárias naturais dotadas de controle óptico e as zenitais convencionais, mesmo considerando a distância entre a captação e a difusão no ambiente, que pode atingir alguns metros dependendo da altura da viga e da dimensão do telhado. Ou seja, são considerados dutos de luz os sistemas que a conduzem por uma distância superior ao dobro da seção de entrada.

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi realizado um conjunto de levantamentos bibliográficos a cerca dos sistemas não convencionais dotados de controle óptico para a condução da luz natural. Este partiu da pesquisa no meio acadêmico considerando dissertações e teses sobre o tema. Em um segundo momento, buscou-se artigos em periódicos e apresentados em congressos. Por fim, foram pesquisadas as empresas fabricantes e comercializadores desses sistemas, disponíveis no mercado atualmente.

As referências bibliográficas relativas aos sistemas não convencionais dotados de mecanismos ópticos para o controle da luz natural podem ser separadas em seis grupos: (1) coletâneas sobre sistemas existentes, (2) monitoramentos em edifícios que possuem o sistema não convencional instalado, (3) proposição de sistema ou mecanismo, (4) modelagem matemática preditiva, (5) simulações computacionais preditivas e (6) comparações entre a eficiência de sistemas diferentes.

Desse modo observa-se uma carência em pesquisas que estudem o comportamento físico do sistema verificando a eficiência das partes componentes considerando as condições locais para a aquisição da luz natural, desvendando a “caixa preta” (BUNGE, 1974) criada pelos fabricantes ao associar mecanismos ópticos em um único sistema. Por meio da bibliografia levantada observa-se a falta de dados tanto por parte dos fabricantes como por parte das pesquisas em relação à eficiência dos sistemas não convencionais.

Coletâneas contendo sistemas não convencionais para iluminação natural foram encontradas nos levantamentos apresentados em dissertações de mestrado (GARROCHO & AMORIM, 2006) (MACÊDO, 2002), em teses de doutorado (CALLOW, 2003) e artigos, destacando-se o de Ferrón (2005) publicado na argentina pela *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* que lista e classifica grande parte dos sistemas conhecidos e comercializados atualmente.

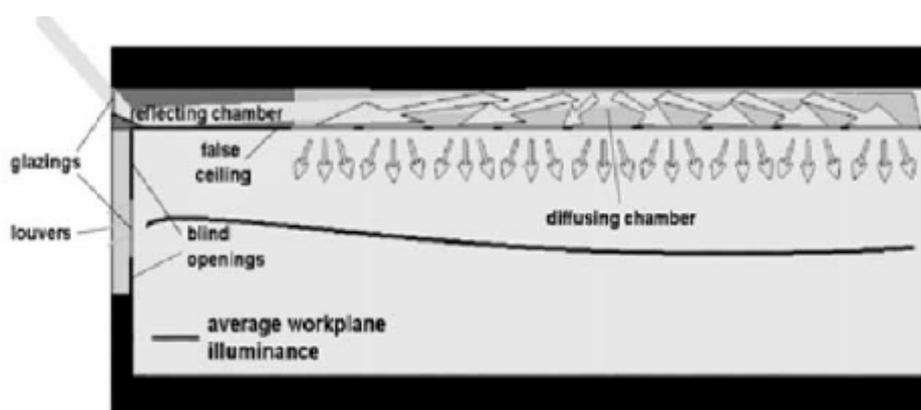
Parte das pesquisas atuais cujo objeto de estudo é o sistema condutor do tipo duto de luz partem da análise de dados coletados em monitoramentos a edifícios existentes com dutos instalados junto a sistemas artificiais e em alguns casos associados a sistemas convencionais (janela lateral) (AL-MARWAEI & CARTER, 2006; OAKLLEY et al., 2000). Esses levantamentos (Ilustração 2), em sua maioria, sofrem a dificuldade de horários para a coleta de dados, visto que os edifícios (normalmente escolas, escritórios e comércios), encontram-se em funcionamento durante os períodos de luz diurna.

**CAPÍTULO I**

**Ilustração 2.** Monitoramento de dutos de luz em edifício de escritório.

**Fonte:** AL-MARWAE & CARTER (2006)

Dentre o grupo das pesquisas que propõem sistemas, a proposta de duto horizontal com captação lateral publicada por Canziani et al. (2004) destaca-se pela simplicidade da solução e eficiência do produto (Ilustração 3). A proposta parte do rebaixamento do forro para inclusão dos dutos espelhados entre a laje e este. A luz é captada acima da janela lateral, que tem a função de comunicação visual com o exterior, sendo redirecionada por reflexão dentro do duto e para ser distribuída por aberturas no forro com difusores. Desse modo a luz é conduzida ao fundo dos ambientes, aumentando o nível de iluminância e melhorando a distribuição e a homogeneidade. Essa solução pode ser aplicada em edifícios existentes, cujo pé direito permita o rebaixamento do forro, melhorando a iluminação com baixo investimento.



**Ilustração 3.** Proposta de Sistema não convencional

**Fonte:** CANZIANI et al. (2004)

No âmbito das modelagens matemáticas foram levantados trabalhos de proposição de modelagem matemática e outros que verificam e comparam tais propostas. Esse é o caso do artigo publicado por Jenkins & Muneer (2004) no qual

são verificadas as vantagens e as deficiências, para cinco diferentes métodos preditivos utilizados na análise de desempenho para dutos de luz. Dentre os modelos propostos destaca-se o trabalho de Swift et al. (2008), devido à proximidade com o objeto de estudo do presente trabalho, apresentando um modelo de cálculo para dutos de luz espelhados de seção retangular,

O grupo das simulações computacionais engloba as proposições de ferramentas preditivas, como as publicadas por Jenkins et al. (2005) e Andersen e Boer (2006), juntamente com os trabalhos que utilizam tais ferramentas para a verificação do desempenho dos sistemas.

O grupo dos trabalhos que comparam sistemas (MACÊDO, 2002) (FANTINELLI, 2005) apresenta a dificuldade de comparar variáveis diferentes, pois um sistema pode ser mais ou menos eficiente para determinada situação e apresentar comportamento diverso quando variado o cenário e a aplicação do mesmo.

Com relação aos fabricantes e comercializadores de sistemas não convencionais, do tipo duto de luz, destacam-se: VELUX<sup>1</sup>, HELIOBUS<sup>2</sup> e SOLATUBE<sup>3</sup>, sendo que esta última está sendo comercializada no Brasil pela NATURALUX<sup>4</sup>. A VELUX comercializa um sistema denominado de “sun tunell”. São dutos rígidos ou flexíveis com dois tipos de refletância possibilitando a adequação à orientação e à disponibilidade de luz desobstruída. A HELIOBUS desenvolve projetos especiais utilizando dutos de alumínio revestidos com película de alta refletividade associando captadores do tipo heliostato com dutos que durante o dia iluminam naturalmente e a noite utiliza a iluminação artificial decorativa. A SOLATUBE tem uma grande rede de distribuidores pelo mundo e comercializa dutos de alumínio com tratamento especial no revestimento interno, material chamado de Spectralight Infinity garantindo alta refletividade (99,7%) segundo informações do catálogo do fabricante.

<sup>1</sup> Disponível em: [www.veluxusa.com](http://www.veluxusa.com), acessado em 30/10/2009.

<sup>2</sup> Disponível em: [www.heliobus.com](http://www.heliobus.com), acessado em 30/10/2009.

<sup>3</sup> Disponível em: [www.solatube.com](http://www.solatube.com), acessado em 30/10/2009.

<sup>4</sup> Disponível em: [www.naturalux.com.br](http://www.naturalux.com.br), acessado em 30/10/2009.

**CAPÍTULO I****1.1 OBJETO**

O objeto desta pesquisa é a condução da luz natural, por sistemas não convencionais, para aproveitamento em ambientes internos.

**1.2 OBJETIVO**

O objetivo é avaliar a eficiência luminosa de sistemas condutores não convencionais. Especificamente, foram avaliados dutos com seção quadrada de 10cm, 25cm e 40cm e comprimentos de 1m, 1,5m e 2m, revestidos internamente por espelhos Optimirror Plus.

**1.3 MÉTODO**

O método utilizado é experimental indutivo (ensaio com modelos de dutos de luz em escala real e reduzida para aquisição de dados de iluminância) com análise comparativa dos resultados. Os resultados do estudo experimental e comparativo forneceram subsídios para a proposição de modelagem matemática. Essa é desenvolvida com base nos conceitos e princípios físicos relativos à iluminação natural, verificando-se sua aplicabilidade por meio da correlação de seus resultados com os observados empiricamente nos ensaios realizados.

**1.4 RESULTADOS**

Os produtos finais da pesquisa são: (1) procedimento para ensaio de dutos de luz sob condições de céu real e artificial (modelo caixa cúbica de espelhos), (2) proposição do fator EDL (Eficiência em Dutos de Luz), (3) eficiência dos dutos de luz espelhados de seção quadrada (10cm, 25cm e 40cm) nos comprimentos 1m, 1,5m e 2m, (4) modelo preditivo de eficiência luminosa em dutos (MPELD).

**1.5 ESTRUTURA**

A dissertação está estruturada em sete capítulos mais referências bibliográficas.

Neste primeiro capítulo realiza-se breve introdução, apresentando as motivações e justificativa para o desenvolvimento do trabalho, objeto, objetivo e métodos da pesquisa.

No segundo capítulo são apresentados os sistemas de abertura levantados para iluminar naturalmente ambientes internos, com a classificação proposta em convencionais e não convencionais, e ainda a análise crítica sobre suas características, limitações e potencialidades.

No terceiro capítulo são apresentados e analisados os conceitos e fenômenos relativos à condução da luz natural, proporcionando embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa.

No quarto capítulo são apresentados os métodos, modelos e ferramentas de cálculo utilizadas na predição da iluminação natural, os quais contribuíram para o desenvolvimento do procedimento de ensaio adotado nos estudos experimentais e para o modelo preditivo proposto.

No quinto capítulo são apresentados os estudos experimentais, incluindo o procedimento para a realização dos ensaios, o tratamento dos dados obtidos e os resultados, os quais foram utilizados nas análises comparativas e na verificação do modelo preditivo proposto.

No sexto capítulo é apresentada a modelagem preditiva da eficiência luminosa em dutos (MPELD), resultante do embasamento teórico do capítulo terceiro, aprofundamento do capítulo quarto e verificação por meio dos resultados obtidos no estudo experimental do capítulo quinto.

No sétimo, e último capítulo, são apresentadas as considerações finais, partindo da síntese conclusiva da pesquisa, incluindo a inserção dessa no estado da arte nacional e internacional, aplicação dos resultados para usos práticos e teóricos, e possíveis desdobramentos futuros, considerando a continuação dessa e outras pesquisas correlatas.



**CAPÍTULO II**

**SISTEMA DE ABERTURA PARA ILUMINAÇÃO NATURAL**



## 2 SISTEMAS DE ABERTURA PARA ILUMINAÇÃO NATURAL

A presente dissertação aborda os sistemas não convencionais para a condução da luz natural e neste capítulo são apresentados os sistemas de aberturas conhecidos para iluminar de modo natural os ambientes construídos. Para isto foi estruturado um panorama que se inicia com os sistemas convencionais e termina com os não convencionais dotados de controle óptico, tendo como foco os sistemas condutores.

As soluções mais simples de utilização da luz natural na arquitetura são as janelas laterais e as aberturas zenitais. No entanto essas soluções deixam lacunas a serem preenchidas por outros sistemas. Na primeira o rendimento diminui ao se afastar da janela, sendo necessário a complementação pela da iluminação artificial. Ressalta-se que o plano iluminado lateral quando no campo visual pode provocar ofuscamentos, mas essa solução permite o contato direto do observador com o meio exterior, sendo a primeira opção na maior parte dos projetos e pelos usuários em geral. A segunda proporciona uma iluminação homogênea desejada para o conforto do usuário, sendo imitada pelos sistemas gerais de iluminação artificial (luz vinda do teto dos ambientes). No entanto, não tem o atrativo da vista exterior e em edifícios com vários pavimentos apenas um pode ser beneficiado diretamente por essa solução.

Segundo Hopkinson et al. (1975), a janela lateral agrega múltiplas funções, dentre elas: iluminar, ventilar e promover a vista do exterior. Apesar da iluminação proveniente deste sistema reduzir à medida que se afasta da abertura e tornar-se mais eficiente quando se utiliza uma janela alta, dificultando a associação da função de iluminar a de visualizar o meio externo, é possível manter essa solução associada a sistemas não convencionais de iluminação. Desse modo, garante-se o nível luminoso mantendo as qualidades que fazem da abertura lateral a primeira opção na maior parte dos ambientes.

Com isto as soluções não convencionais são tentativas de aproveitar a luz natural preenchendo a lacuna deixada pelos sistemas convencionais, atuando de modo eficiente tanto na complementação a esses, como na inovação, ou seja, conduzindo a luz natural até onde seja necessário e onde não se permite a aplicação de soluções convencionais, como por exemplo, nos subsolos.

## CAPÍTULO II

Em climas frios como no Canadá, Áustria, Alemanha, Inglaterra e Japão, entre outros, é comum a ocupação dos subterrâneos e a dificuldade, por determinados períodos, de acesso ao sol e a luz natural. Sendo assim, esses países investem na pesquisa e desenvolvimento de sistemas para condução da luz natural visando iluminar esses espaços e eliminar os problemas de saúde gerados pela baixa exposição à radiação luminosa natural.

Por meio de alternativas tecnológicas torna-se possível levar a luz natural aos ambientes, aos quais, recentemente, só era possível de modo artificial. A luz natural pode ser obtida através de sistemas providos de controle óptico, capazes de captar e conduzi-la para o ambiente interno. Esses sistemas são divididos em três partes principais, vinculadas a sua função: captador, condutor e difusor. No anexo A encontra-se uma tabela com os sistemas, para controle óptico da luz natural, levantados, com suas principais características e aplicabilidades. Essa tabela expressa o panorama atual dos sistemas existentes e suas aplicações, além de identificar seus fabricantes e comercializadores.



Sun Spots



UFO Project

**Ilustração 4.** Ambientes subterrâneos iluminados naturalmente.

**Fonte:** [www.bartenbach.com](http://www.bartenbach.com) acessado em 30/10/2009.

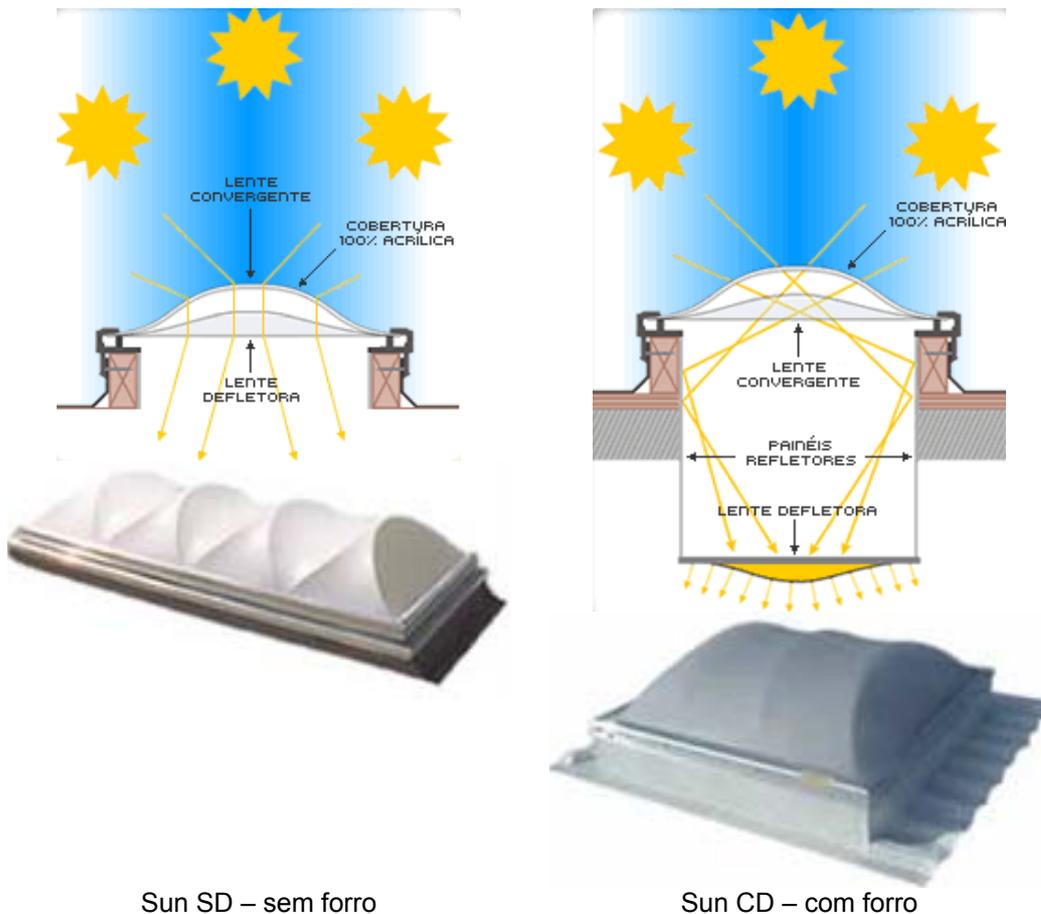
No Japão, os sistemas de condução da luz natural são utilizados para o cultivo de vegetação em subterrâneo (Ilustração 5), o captador de luz solar Himawari é um concentrador desenvolvido para maximizar a quantidade de luz conduzida por fibra óptica para locais distantes da captação.



**Ilustração 5.** Daylight Collector - Himawari.

**Fonte:** <http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-4.htm>, acessado em 30/10/2009.

Para ocupar o espaço deixado pelos sistemas convencionais é possível utilizar mecanismos que maximizem o desempenho das aberturas, utilizando para sistemas laterais: prateleiras de luz, persianas reflexivas, vidros especiais e painéis prismáticos. Para as aberturas zenitais podem ser adotados fechamentos com controle óptico como os domos da empresa brasileira ROBERT'S (Ilustração 6) entre outros compostos por prismas e painéis cortados a laser.



Sun SD – sem forro

Sun CD – com forro

**Ilustração 6.** Sun Light – luminárias naturais da Robert's Sistemas Industriais.

**Fonte:** [www.roberts.com.br](http://www.roberts.com.br), acessado em 30/10/2009.

## CAPÍTULO II

A iluminância exterior pode atingir altos níveis (100.000 lux com radiação direta do sol), o que representa um grande potencial como fonte de energia e luz. Para utilizá-lo na iluminação interna dos edifícios são necessários mecanismos que permitam a entrada ou busquem capturar a luz e conduzi-la ao interior. Esses mecanismos podem ser as tradicionais janelas laterais, clarabóia e lanternis zenitais ou sistemas não convencionais dotados de prismas, lentes e espelhos.

### 2.1 CONVENCIONAIS

As aberturas convencionais mais comuns são as janelas laterais e a clarabóia ou domus zenitais, assim como suas derivações. Essas aberturas configuram um rasgo na vedação, um elemento de passagem, conexão simples entre o meio externo e o meio interno. A preocupação comum com o controle da entrada da luz por esse tipo de abertura, em grande parte dos projetos e edificações existentes, resume-se a venezianas ou persianas internas. No período do modernismo brasileiro houve uma preocupação com a colocação de brises<sup>5</sup>, mas muitos projetos optaram por tal solução visando à uniformidade da fachada, não priorizando a iluminação natural e em alguns casos até prejudicando esta.

#### 2.1.1 SISTEMAS LATERAIS

Como afirmado anteriormente, as aberturas laterais são frequentemente adotadas para sistema de iluminação, mesmo não sendo, sempre, a solução mais eficiente ou simples de controlar, devido às demais funções embutidas nesse sistema, que contribuem para ser tão comum nas edificações. Tais funções são, em muitas situações, conflitantes, levando ao excesso de carga térmica, ofuscamento e níveis inadequados de iluminâncias. Os principais problemas para a iluminação vinda de aberturas laterais são: queda do nível de iluminância com a profundidade do ambiente e presença do plano iluminado no campo visual do observador causando ofuscamento.

No entanto, a janela lateral quando projetada adequadamente pode proporcionar ambientes lúdicos além de emoldurar a paisagem externa. Essa ainda pode estar associada a elementos de controle como, por exemplo, as venezianas, permitindo a multiplicidade de usos para um mesmo espaço. Os ambientes com

---

<sup>5</sup> Brises: proteção solar, normalmente, placas verticais ou horizontais aplicadas externamente à fachada.

janelas que permitam a vista do exterior e a ventilação destes são considerados mais saudáveis e adequados à permanência prolongada.

O pano envidraçado também conhecido por “pele de vidro” configura outro tipo de abertura lateral, com grandes dimensões. Por meio dessas torna-se possível proteger o ambiente das intempéries sem perder a comunicação visual com o exterior, deixando a sensação de espaço semi-confinado. Esse tipo de solução dificulta o controle dos níveis de iluminância e do ganho de carga térmica, sendo mais indicado para espaços de convívio temporário e ou de transição.

### 2.1.2 SISTEMAS ZENITAIS

A abertura zenital ao contrário da lateral proporciona boa homogeneidade de distribuição da luz. Este tipo de solução é muito encontrado em ambientes que levem à reflexão interior, como igrejas, museus e biblioteca. A luz proveniente dessas aberturas pode apresentar caráter lúdico e produzir sensações de conforto. Em alguns projetos arquitetônicos, a luz direta, proveniente de aberturas zenitais, é utilizada para criar cenários que são alterados ao longo do dia e do ano.

Os domus, clarabóias e teto com dupla inclinação são soluções similares para abertura zenital cujo controle da luz é dificultado devido à entrada da radiação direta em grande parte do ano para latitudes semelhantes à brasileira.

O lanternin e o shed são aberturas localizadas na cobertura dos edifícios que capta a luz de forma semelhante à janela lateral alta e a distribuí no ambiente de modo zenital. Muito utilizado em fábricas e galpões industriais associados a sistemas de ventilação natural. O shed, em função da sua forma geométrica produz um rebatedor, que reflete a luz direta de modo difuso pelo ambiente.

### 2.1.3 MECÂNIISMOS DE CONTROLE

Os sistemas convencionais utilizados para controlar a quantidade e a qualidade da luz natural nos ambientes podem ser externos como os brises e demais elementos de proteção solar acoplados nas fachadas ou internos como as persianas e cortinas. Estes últimos têm as vantagens de serem controlado pelo usuário e serem fáceis para a manutenção, no entanto, ao barrar a luz não evitam a entrada do calor.

**CAPÍTULO II**

Elementos externos para controle da luz solar foram bastante utilizados na arquitetura brasileira do período modernista. Esses elementos barram a radiação solar direta e permitem a entrada da luz natural difusa, quando corretamente dimensionados.



(a) brise  
MEC - RJ



(b) prateleira de luz  
Ash Creek Intermediate School  
in Monmouth, Oregon



(c) cobogó  
Parque Guinle - RJ



(d) muxarabi  
Al-Hambra,  
Granada, Espanha

**Ilustração 7.** Controle Convencional da Luz Natural – Cobogó- Foto.

(a) **Fonte:** <http://www.vitruvius.com.br/minhacidade/mc192/mc192.asp>  
acessado em 30/10/2009.

(b) **Fonte:** <http://www.uoregon.edu/~akwok/VSCS/AshCreek/lighting/images.html>  
acessado em 30/10/2009.

(c) **Fonte:** <http://fotola.com/beryllium/carmim/document-carmim42eec16a104a8.html>  
acessado em 30/10/2009.

(d) **Fonte:** <http://gazetaarabe.blogspot.com/2009/03/arquitetura-arabe.html>  
acessado em 30/10/2009.

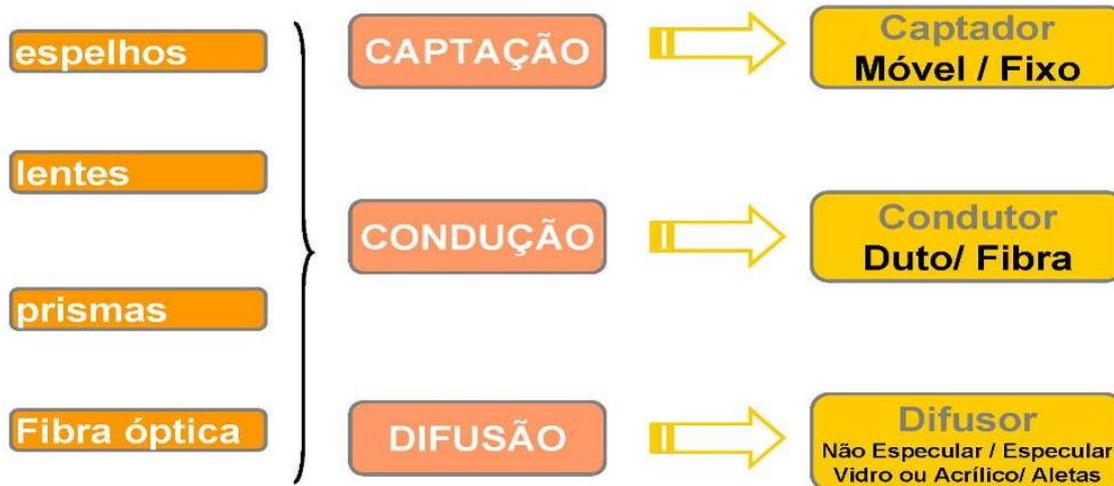
Chama-se de brises os elementos de controle da luz solar direta, geralmente acoplados externamente às fachadas. Esses elementos podem ser de diversos materiais e com dimensões variadas. Os mais comuns são as placas horizontais e verticais, em materiais como o concreto, fibro-cimento, cerâmicos e mais recentemente em alumínio e vidro.

As prateleiras ou bandejas de luz (light shelf) configuram o aprimoramento da proteção solar brise soleil, ou seja, não apenas barram a radiação solar direta, mas são uma tentativa de aproveitá-la no ambiente interno. Esse mecanismo é localizado entre o ambiente externo e interno, parte da placa passa para o lado interno e esta não deve ser justaposta ao forro permitindo a reflexão da luz por cima da mesma. Deste modo é possível diminuir o nível luminoso na região próxima a janela e redirecionar a luz refletida na placa horizontal para áreas um pouco mais distante desta. Esse tipo de solução contribui para suavizar a queda no nível de iluminância com a profundidade do ambiente e o ofuscamento devido a alta luminosidade próxima a abertura.

O Cobogó, geralmente cerâmico, e o Muxarabi, compostos por trama em madeira, comum na arquitetura de influência árabe, filtram a luz e promovem a visão do exterior garantindo a privacidade do ambiente interno, colaboram para o conforto térmico e luminoso dos ambientes.

## 2.2 NÃO CONVENCIONAIS

No campo da inovação tecnológica existem diversos estudos e iniciativas voltadas para o aproveitamento da luz natural, desde soluções simples e intuitivas como as garrafas pet com água, utilizadas como lâmpadas naturais, até sofisticados dutos espelhados de luz. Estes são sistemas geralmente compostos por captador (lente, prismas, espelhos ou domus acrílico), condutor (duto podendo ser espelhado e ou ramificado, guia sólida, guia líquida e fibra óptica) e abertura de saída, dotado ou não de elemento difusor (lentes, prismas ou aletas metálicas) (JENKINS & TARIQ, 2004).



**Ilustração 8.** Fluxograma – Sistemas não convencionais para iluminação natural..

Desse modo os sistemas não convencionais contam com o controle óptico da luz devido aos fenômenos produzidos pelos materiais componentes destes, ou seja, o fluxo luminoso é transportado por meio de espelhos, lentes, prismas e ou fibra óptica e desse modo, reflexão, transmissão e refração produzem os efeitos desejados para o controle na captação, condução e distribuição da luz.

**CAPÍTULO II**



(a) captação



(b) condução



(c) difusão

**Ilustração 9.** Exemplos de sistemas não convencionais que utilizam espelhos.

(a) Fonte: [www.heliobus.com](http://www.heliobus.com) acessado em 30/10/2009.

(b) Fonte: [www.heliobus.com](http://www.heliobus.com) acessado em 30/10/2009.

(c) Fonte: [http://www.ecobuildings.info/PDF/22\\_9\\_dtmb\\_jakobiak-erhorn.pdf](http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf) acessado em 30/10/2009.



(a) captação

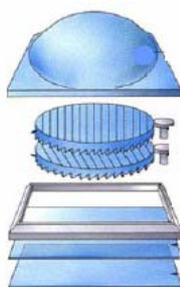


(b) difusão

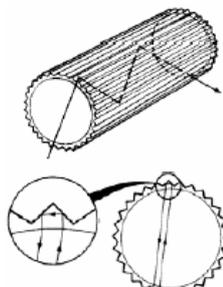
**Ilustração 10.** Exemplos de sistemas não convencionais que utilizam lentes.

(a) Fonte: [www.bartenbach.com](http://www.bartenbach.com) acessado em 30/10/2009.

(b) Fonte: [www.solatube.com](http://www.solatube.com) acessado em 30/10/2009.



(a) captação



(b) condução



(c) difusão

**Ilustração 11.** Exemplos de sistemas não convencionais que utilizam prismas.

(a) Fonte: <http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-1.htm> acessado em 30/10/2009.

(b) Fonte: SAXE, 1989.

(c) Fonte: [www.solatube.com](http://www.solatube.com) acessado em 30/10/2009.

Os sistemas não convencionais atualmente mais difundidos e comercializados estão dentro de quatro principais categorias: luminárias naturais (domus ou clarabóias), painéis e vidros especiais, condutores por reflexão total e os dutos de luz.

**Luminárias naturais (domus ou clarabóia):** são sistemas que utilizam mecanismos ópticos como os captadores com espelhos móveis ou associação entre lentes e prismas para controle da luz na própria abertura, não havendo a etapa de condução ou transporte, a luz é emitida no próprio ambiente em que está a abertura. Esses sistemas podem ou não possuir difusores na saída da luz para o ambiente. Essas luminárias são geralmente sistemas zenitais.

**Painéis e vidros especiais:** são as soluções mais simples do controle da luz por sistemas não convencionais, utilizam um material especial (vidro prismático, painel cortado a laser), fabricado para este fim. São aplicados em aberturas laterais e zenitais para o controle da aquisição da luz natural, filtrando e redirecionando essa no momento da captação, não havendo a etapa de condução ou transporte, a luz é emitida no próprio ambiente em que está a abertura.

**Condutores por reflexão total:** são as fibras ópticas, guias líquidas e sólidas. Esses por utilizarem a reflexão total apresentam o mínimo de perda na condução da luz e percorrem longas distâncias com pequenos diâmetros de material. Algumas empresas já estão comercializando sistemas com esse princípio, por exemplo, a PARANS<sup>6</sup> que utiliza fibra óptica na condução, lentes na captação e diversas luminárias para a luz difusa ou com foco direcional no ambiente.

**Dutos de luz:** são sistemas condutores de luz natural. Esses podem ser horizontais e verticais, ramificados ou não, com captação da luz natural na lateral ou na zenital, com ou sem o auxílio de captador acoplado na entrada do duto. A vantagem desse sistema é o transporte da luz para longe da abertura na qual esta foi captada. Esse sistema dentre os demais condutores de luz (fibras ópticas, guias líquidas e guias sólidas) é o único a não utilizar o princípio da reflexão total (ver item 3.1.6.3), no entanto é um sistema simples e pode ser construído *in locu*, em obras de pequeno e grande porte. A eficiência desse tipo de sistema está relacionada à refletância do material de revestimento interno.

---

<sup>6</sup> Parans – empresa que comercializa o Sky Port, sistema não convencional que utiliza fibra óptica para a condução da luz natural – [www.parans.com](http://www.parans.com)

**CAPÍTULO II****2.2.1 CAPTADORES**

Captar ou coletar a luz natural disponível é um problema que possibilita inúmeras soluções arquitetônicas. Essas geram sistemas que podem ser fixos ou móveis. Quando fixos são projetados para captarem determinada faixa de céu e horários de sol de acordo com a latitude e disponibilidade de luz local. Quando móveis são dotados de mecanismos que seguem o sol, o mais comum é um motor do tipo marca passo que localiza o sol por meio de um sensor fotoelétrico, que identifica as áreas de maior luminosidade na abóbada celeste. Alguns utilizam placas fotovoltaicas para a obtenção da energia necessária para a automação do sistema.

Os materiais componentes dos mecanismos captadores da luz natural podem ser espelhos (planos ou esféricos), lentes convergentes e divergentes quando associadas à outra convergente, prismas e painéis cortados a laser.



(a) Espelho Parabólico



(b) Lentes Fresnel



(c) Painel Prismático

**Ilustração 12.** Sistemas móveis para captação da luz.

(a) Fonte: [www.tapthesun.com](http://www.tapthesun.com) acessado em 30/10/2009.

(b) Fonte: [www.parans.com](http://www.parans.com) acessado em 30/10/2009.

(c) Fonte: [www.siteco.com](http://www.siteco.com) acessado em 30/10/2009.

Os mais simples são os jogos de espelhos planos também chamados de heliostatos. Esses equipamentos apresentam grandes proporções e são instalados em locais desobstruídos. Hopkinson et al., em 1975, já indicava o heliostato como sistema eficaz para a captação da luz solar, potencializando a aquisição da luz natural em locais ou ambientes de difícil acesso dessa.

As lentes, os prismas e os painéis acrílicos cortados a laser normalmente encontram-se protegidos por domus ou chapas de acrílico ou vidro. Em alguns

casos o captador é apenas o domus, podendo ser de vidro ou acrílico com seleção para a radiação infravermelha ou não.



(a) Domus Acrílico

(b) Heliostato

(c) Micro Prisma

**Ilustração 13.** Sistemas fixos para captação da luz.

(a) **Fonte:** [www.solatube.com](http://www.solatube.com) acessado em 30/10/2009..

(b) **Fonte:** [http://www.ecobuildings.info/PDF/22\\_9\\_dtmb\\_jakobiak-erhorn.pdf](http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf) acessado em 30/10/2009.

(c) **Fonte:** [www.bellevue.com.br](http://www.bellevue.com.br) acessado em 30/10/2009.

## 2.2.2 CONDUTORES

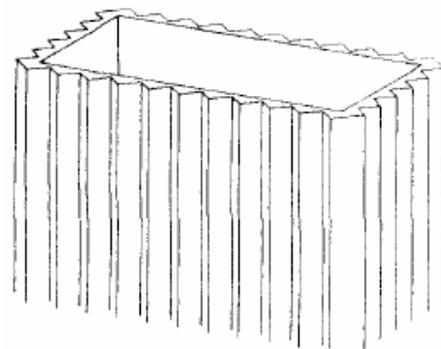
Os condutores de luz natural podem ser classificados em quatro tipos: dutos de luz, guias sólidas, guias líquidas e fibra óptica. Desses, os três últimos trabalham aplicando o princípio físico da reflexão total (ver item 3.1.6.3).



(a) Espelhos



(b) Spectralight Infinity



(c) filme prismático

**Ilustração 14.** Dutos para a condução da luz.

(a) **Fonte:** [www.heliobus.com](http://www.heliobus.com) acessado em 30/10/2009.

(b) **Fonte:** [www.solatube.com](http://www.solatube.com) acessado em 30/10/2009.

(c) **Fonte:** SAXE, 1989.



(a) Guias Sólidas – Light Rods



(b) Guias Líquidas



(c) Fibra Óptica

**Ilustração 15.** Condutores da luz por reflexão total

(a) **Fonte:** CALLOW, 2003.

(b) **Fonte:** <http://www.newport.com/Liquid-Light-Guides/378731/1033/catalog.aspx> acessado em 30/10/2009.

(c) **Fonte:** [www.tapthesun.com](http://www.tapthesun.com) acessado em 30/10/2009.

A condução da luz ocorre por reflexões, seja proporcionada pelo próprio material constituinte do condutor (guias sólida, líquidas e fibra óptica) ou pelas propriedades reflexivas das superfícies internas a este (duto).

A quantidade de luz que chega ao plano de trabalho será resultante das múltiplas reflexões e conseqüentes perdas ocorridas no percurso desta. A absorção da luz natural, quando entra em contato com as superfícies envolventes do sistema condutor, reduz a quantidade de luz à medida que é transportada. Desse modo, a condução da luz natural depende da quantidade obtida a partir da captação e da relação entre as múltiplas reflexões (desde a entrada da luz no sistema até a sua distribuição no ambiente a ser iluminado) e as múltiplas perdas devido à absorção nesse percurso.

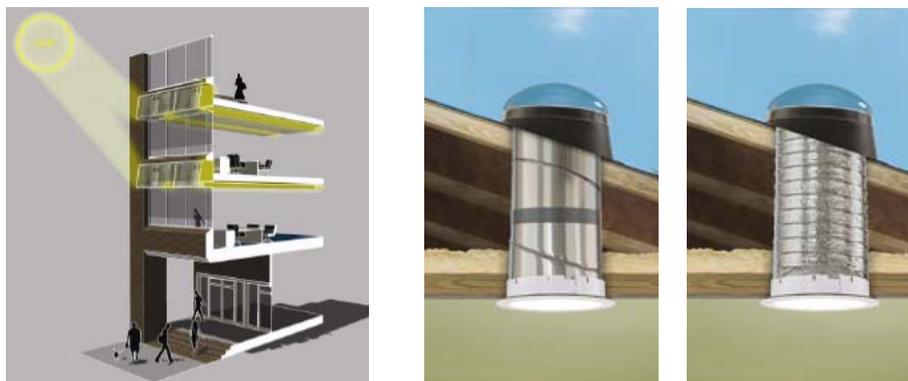
As dimensões dos condutores variam de acordo com o material condutor (fibras e guias) ou do tipo e aplicação do condutor (dutos). Se o meio condutor da luz natural forem guias líquidas ou fibras ópticas, a geometria é definida pelo próprio material, sendo canos ou cilindros de diversos diâmetros, mas todos inferiores as dimensões dos sistemas do tipo duto de luz. Caso a condução ocorra por meio de guia sólida, a geometria vai depender da forma e do processo industrial de fabricação. A guia sólida light rod (CALLOW, 2003) apresenta geometria cilíndrica de pequenas seções e comprimentos variados.

Já para os dutos, as configurações geométricas são múltiplas, podendo apresentar seções quadradas, retangular, circular ou outras várias. Nesse caso, dimensão e geometria são relevantes na definição, pois sistemas convencionais zenitais, por exemplo, os domus, podem ser tomados como duto.

### 2.2.2.1 DUTO DE LUZ

Nos dutos de luz, a condução, depende das propriedades físicas dos materiais e acabamentos internos. Este pode ser de alumínio polido, de material cromado, revestido com tintas ou materiais reflexivos ou utilizar filme prismático.

A luz pode ser conduzida por dutos na vertical ou na horizontal, sendo que tanto a obtida na captação lateral como na zenital podem ser redirecionadas para o ponto desejado por uma rede de dutos verticais e horizontais.



(a) duto horizontal  
 Solar Canopy Illumination System

(b) duto vertical  
 Velux – rígido e flexível

**Ilustração 16.** Dutos de luz.

**(a) Fonte:** <http://www.physics.ubc.ca/ssp/solar-canopy-illumination-system/>  
 acessado em 30/10/2009.

**(b) Fonte:** <http://www.veluxusa.com/products/residentialSkylights/sunTunnels/>  
 acessado em 30/10/2009.

Esses dutos podem ser revestidos por tintas ou materiais reflexivos, podendo ser cromado, espelhados ou com filme prismático. No entanto, os mais comuns são os de alumínio polido. As pesquisas atuais estão buscando aprimorar o desempenho dos dutos por meio de materiais especiais como, por exemplo, o alumínio tratado da SOLATUBE.

A SOLATUBE, empresa alemã, que comercializa dutos revestido com um novo material chamado Spectralight Infinity, cuja refletância interna atinge 99,7%, segundo dados divulgados no catálogo do fabricante.

Um duto pintado de branco pode conduzir luz (shaft), nesse caso o princípio físico encontrado é o da reflexão difusa (ver item 3.1.6.2), pois a superfície pintada de branca está mais próxima de um difusor que de um espelho. No entanto para a eficiência do condutor quanto mais especular for à reflexão melhor (ver item 3.1.6.1).

**CAPÍTULO II**

No caso de um duto revestido de espelho, as características de fabricação e instalação desses espelhos contribuirão para o desempenho do condutor, bem como a espessura do vidro e a manutenção do mesmo. No entanto, esses podem ser construídos em obras de pequeno porte com boa qualidade e desempenhos satisfatórios e com custos inferiores a sistemas mais sofisticados.

**2.2.2.2 GUIAS SÓLIDAS**

Guias Sólidas são bastões de acrílico que conduzem a luz por reflexão total, dependendo da composição química e do índice de refração do material acrílico podem permitir ou barrar faixas de radiação a serem transportadas. Essas guias podem ser retilíneas ou apresentar curvas. A luz incidente na extremidade externa ao ambiente é conduzida por reflexões totais, devido à diferença de índice de refração entre o meio acrílico e o ar, sendo emitida na extremidade interna ao ambiente. Para difundir a luz no ambiente basta lixar (promover desgastes na camada superficial) o bastão acrílico promovendo o escape da luz.



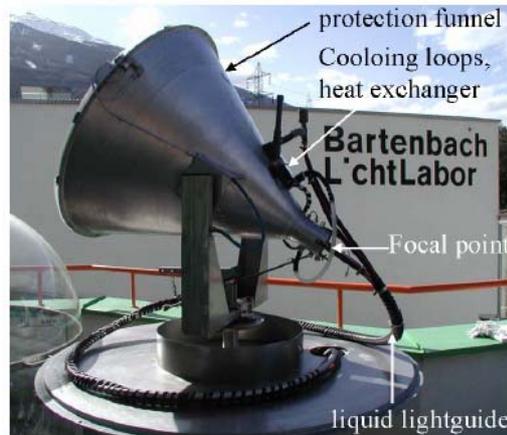
**Ilustração 17.** Exemplo de guia sólida – light rods.

**Fonte:** CALLOW, 2003.

**2.2.2.3 GUIAS LIQUIDAS**

As guias líquidas de luz (liquid light guide) utilizam luz artificial e são comercializadas para usos hospitalares e tratamentos medicinais entre outros fins. Mas existem pesquisas que utilizam tais guias para conduzirem a luz em sistemas para a iluminação natural de ambientes, como, por exemplo, o projeto desenvolvido no laboratório austríaco BARTENBACH intitulado *Project UFO*<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Disponível em [www.bartenbach.com](http://www.bartenbach.com) acessado em 30/10/2009.



**Ilustração 18.** Exemplo de guia líquida.

**Fonte:** [www.bartenbach.com](http://www.bartenbach.com) acessado em 30/10/2009.

Essas guias apresentam diversas espessuras e apresentam encapamentos rígidos, semi-flexíveis ou flexíveis. O líquido condutor pode ser água, óleo mineral ou outro fluido. As propriedades específicas desse líquido podem contribuir para a redução da radiação infravermelha, minimizando os indesejáveis problemas de carga térmica.

#### 2.2.2.4 FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica pode ser plástica<sup>8</sup>, atualmente utilizada na iluminação artificial, ou vítrea, utilizada nas telecomunicações. Elas apresentam dimensões microscópicas (telecomunicações) ou dimensões visíveis a olho nu (iluminação artificial). A fibra plástica é flexível e são utilizadas em feixes envoltos por encapamento plástico mais resistente. A vítrea é rígida e frágil e também revestida por polímero protetor.

A empresa sueca PARANS comercializa o sistema chamado de Sky Port<sup>9</sup> que utiliza lentes Fresnel<sup>10</sup> na captação da luz natural e fibra óptica na condução desta e para difundir a luz no ambiente interno são comercializadas luminárias, similares as utilizadas para iluminação artificial. O sistema funciona com um captador composto por diversas lentes Fresnel que pode ser localizado na cobertura ou na fachada da edificação, essas lentes concentram a luz da abóbada

<sup>8</sup> FASA - fabricante de fibra óptica - [www.fibraotica.com.br](http://www.fibraotica.com.br)

<sup>9</sup> Disponível em [www.parans.com](http://www.parans.com) acessado em 30/10/2009.

<sup>10</sup> Lentes Fresnel são lentes com grande abertura e curta distância focal. Estas aumentam a área de captação da luz solar quando utilizadas para esse fim.

**CAPÍTULO II**

celeste que passa a ser conduzida por feixes de fibra óptica até as luminárias no interior dos ambientes.



**Ilustração 19.** Exemplo de fibra óptica.

**Fonte:** [www.parans.com](http://www.parans.com) acessado em 30/10/2009.

A fibra óptica conduz a luz utilizando o princípio da reflexão total. Desse modo é possível com pequenas dimensões transmitir a informação (telecomunicações) ou o fluxo luminoso (iluminação artificial e natural) por longas distâncias com perdas mínimas.

### 2.2.3 DIFUSORES

Para difundir a luz em um ambiente, seja ela proveniente de fontes naturais ou artificiais, faz-se necessário a utilização de materiais e mecanismos difusores. Na iluminação artificial é comum a adoção de aletas refletoras de material cromado ou alumínio polido para o redirecionamento e distribuição da luz segundo curvas fotométricas calculadas e medidas em laboratório. Encontram-se também luminárias dotadas de material translúcido como o vidro jateado e o acrílico leitoso utilizados para a distribuição da luz por elas emitidas, nesse caso a transmissão da luz ocorre de modo difuso devido ao comportamento do material que se aproxima do difusor perfeito.

Para a iluminação natural por meio de sistemas convencionais, as “prateleiras de luz”, os rebatedores e mesmo as superfícies das paredes agem como refletoras ou difusores da luz no ambiente. Quando se trata dos sistemas complexos de abertura, os sistemas dotados de controle óptico para a iluminação natural, a difusão da luz se aproxima das soluções encontradas para a iluminação artificial, ou seja, a luz chega ao ambiente em aberturas similares (dimensão e posicionamento) as das luminárias artificiais. Desse modo, para sistemas complexos de aberturas utilizam-se difusores translúcidos (vidro jateado e acrílico

leitoso), aletas refletoras, lentes difusoras e prismas para o redirecionamento e distribuição da luz pelo ambiente.



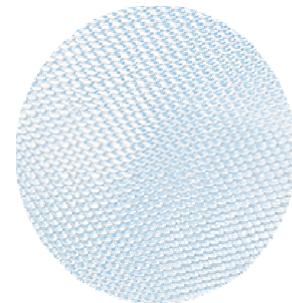
(a) Vidro Jateado



(b) Espelhos



(c) Lentes



(d) Prismas

**Ilustração 20.** Exemplo de difusores.

(a) Fonte: [www.solatube.com](http://www.solatube.com) acessado em 27/06/2007.

(b) Fonte: [http://www.ecobuildings.info/PDF/22\\_9\\_dtmb\\_jakobiak-erhorn.pdf](http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf) acessado em 30/10/2009.

(c) Fonte: [www.solatube.com](http://www.solatube.com) acessado em 27/06/2007.

(d) Fonte: [www.solatube.com](http://www.solatube.com) acessado em 27/06/2007.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando de luz natural, o controle, seja geométrico (seleção angular) ou óptico (espelhos, lentes e prismas), é fundamental. Neste sentido os sistemas de abertura dotados de controle óptico são especiais, visto que sua concepção parte do controle da luz disponível.

Para o controle da luz natural é necessário observar as questões relativas à sazonalidade e condição de exposição ou disponibilidade da fonte natural, sol e céu. Para tanto, o conhecimento dos fenômenos físicos inerentes à iluminação e às condições de clima local auxiliam no processo de projeto, aplicação de recursos disponíveis e seleção do sistema mais adequado para iluminar naturalmente qualquer ambiente, de fácil ou de difícil acesso.

Ao iluminar naturalmente, por meio de sistemas complexos de abertura dotados de controle óptico, é necessário o conhecimento do comportamento dos materiais componentes e de seu funcionamento para garantir a eficiência desses.



**CAPÍTULO III**  
**GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS RELATIVAS À**  
**CONDUÇÃO DA LUZ NATURAL**



### 3 CONCEITUAÇÃO E FENÔMENOS RELATIVOS À CONDUÇÃO DA LUZ NATURAL

Neste capítulo são apresentados os conceitos e fenômenos relativos à condução da luz natural para embasar os demais capítulos e possibilitar a compreensão dos estudos experimentais (capítulo 5) e modelagem matemática proposta (capítulo 6).

#### 3.1 FENÔMENOS FÍSICOS

Para a compreensão da condução da luz é necessário o entendimento dos fenômenos físicos relativos à luz natural e à iluminação proveniente desta. A luz por não ser palpável, mas visível por meio da reflexão, é um fenômeno abstrato e de difícil compreensão. Desse modo, o entendimento dessa energia e dos efeitos provocados ou associados a sua propagação estão comentados neste capítulo.

A reflexão e a refração luminosa são os fenômenos responsáveis por tornar a luz visível, visto que o que enxergamos são os efeitos da distribuição ocasionados pela reflexão da luz ao incidir em determinada superfície e banhar os objetos ou da refração ao ser transmitida através um meio transparente ou translúcido.

A princípio está apresentada a definição de radiação, para iniciar o entendimento a cerca da energia luminosa, com isto torna-se possível definir o que entende-se por luz e a partir daí explorar os fenômenos físicos da reflexão, refração, absorção e difusão da luz.

##### 3.1.1 RADIAÇÃO

“Energia sob a forma de ondas ou partículas eletromagnéticas” (HOPKINSON et al., 1975). A radiação por ser uma energia pode ser percebida pelos órgãos sensoriais humanos, mesmo quando essa percepção não é explícita.

## CAPÍTULO III

### 3.1.2 LUZ

Hopkinson et al. (1975) define a luz de duas maneiras distintas. A primeira como sendo “a banda de energia radiante situada entre determinados comprimentos de onda, que pode ser medida sem a ajuda dos órgãos visuais humanos”, e a segunda como sendo “a manifestação visual da energia radiante e conseqüentemente, está intimamente relacionada com as sensações humanas”.

Em termos físicos, poderíamos defini-la como sendo a faixa de comprimentos de onda de radiação eletromagnética capaz de sensibilizar o olho humano. Os comprimentos de onda de tal radiação estão compreendidos entre 380 e 780nm.

Essa radiação capaz de sensibilizar o olho humano sensibiliza outros órgãos no organismo físico beneficiando a saúde e influenciando nas sensações e no aproveitamento do indivíduo. Devido a isto, recentemente estão crescendo os estudos relativos à influência da luz natural no rendimento profissional de trabalhadores em determinadas atividades, geralmente privados da luz do dia, confinados em ambientes com luz artificial.

### 3.1.3 ABSORÇÃO

“Transformação da energia radiante numa forma diferente de energia, por intervenção da matéria” (HOPKINSON et al., 1975).

Quando a luz incide em uma superfície parte da radiação é absorvida, parte é refletida e parte pode ser transmitida (materiais transparentes ou translúcidos). A quantidade absorvida será determinada pelas propriedades dos materiais.

### 3.1.4 DIFUSÃO

“Alteração da distribuição espacial de um raio de luz: após reflexão numa superfície ou passagem através de um meio, transmite-se em vários sentidos” (HOPKINSON et al., 1975).

### 3.1.5 REFRAÇÃO

A refração ocorre quando a luz, ao longo de sua trajetória, muda de meio, por exemplo, a luz natural proveniente do sol ao se propagar no ar passa por um material transparente ou penetra na água modificando a direção inicial do raio.

Desse modo, quando um raio passa de um meio menos denso para outro mais denso, a luz é desviada em direção à normal da superfície e, ao passar de um meio mais denso para outro menos denso, afasta-se da normal. (MOURA, 2007)

A lei de Snell correlaciona os índices de refração dos meios com os ângulos de incidência e refração conforme a equação 1:

$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_i = n_2 \cdot \text{sen} \theta_r \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$n_1$  Índice de refração do primeiro meio;

$\theta_i$  Ângulo de incidência;

$n_2$  Índice de refração do segundo meio;

$\theta_r$  Ângulo de refração.

### 3.1.6 REFLEXÃO

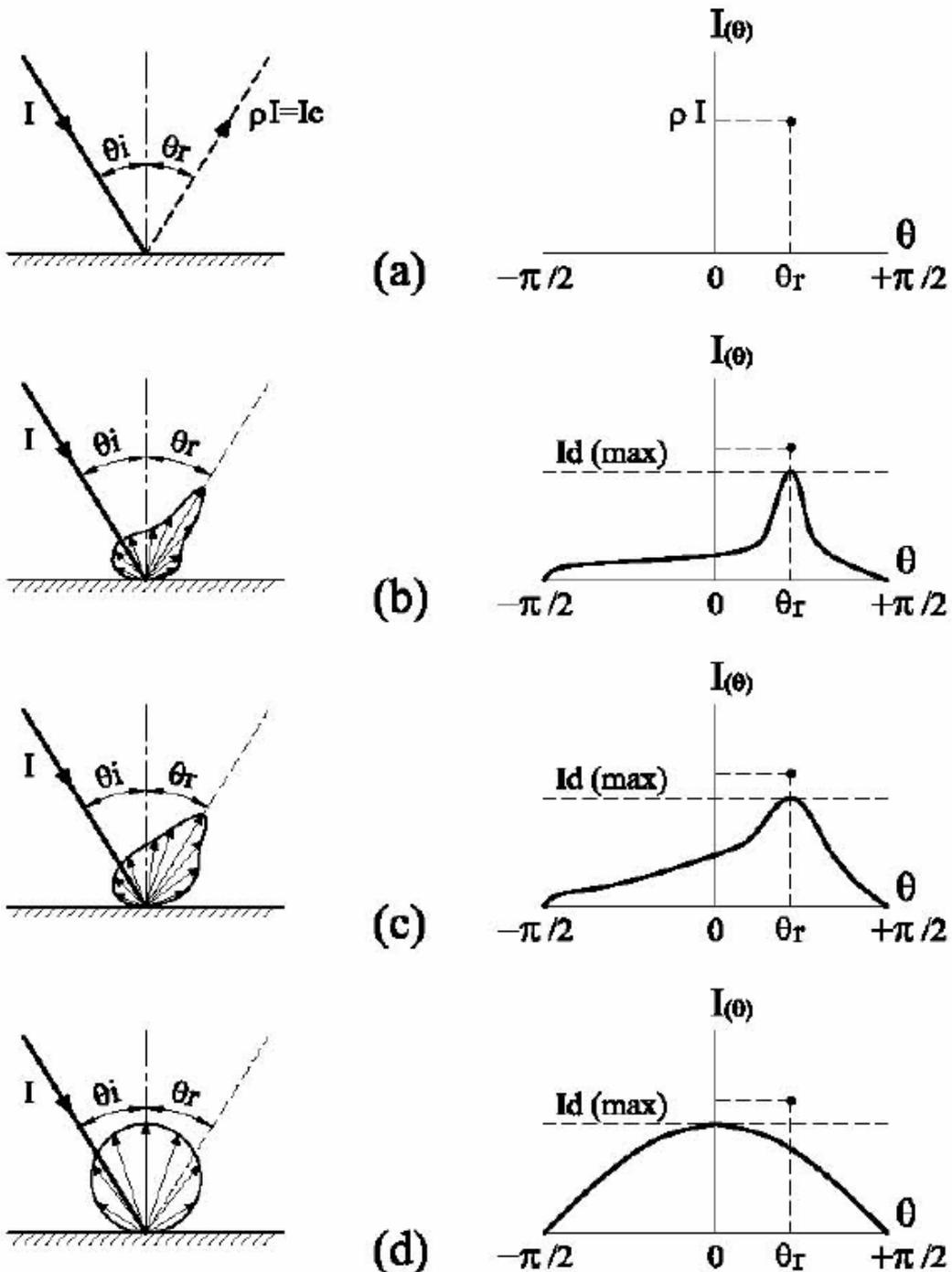
Reflexão é o fenômeno que consiste no fato de a luz voltar a se propagar no meio de origem, após incidir na superfície de separação desse meio com o outro. A reflexão da luz em uma superfície vai estar entre dois extremos ideais: a reflexão direta (normal ou especular) e a reflexão difusa.

O que determina a qualidade e o tipo de reflexão são as propriedades dos materiais, ou seja, as refletâncias ( $\rho$ ) das superfícies destes. Isto é a capacidade de redirecionar a radiação incidente e o modo como ocorre a distribuição da luz refletida.

A distribuição da luz vai variar de acordo com a superfície entre os extremos (refletor perfeito e difusor perfeito), faixa na qual se encontram todas as superfícies reais.

**CAPÍTULO III**

A ilustração 21 exemplifica como ocorrem as reflexões em superfícies opacas entre os extremos da distribuição direta (especular) e difusa.



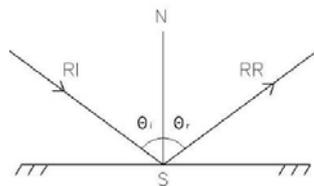
**Ilustração 21.** Distribuição da luz por reflexão em superfícies opacas.

Fonte: MOON, 1936, p250, adaptado por MOURA, 2007, p53.

### 3.1.6.1 REFLEXÃO DIRETA (NORMAL OU ESPECULAR)

“Reflexão feita de acordo com as leis da óptica, como por exemplo, num espelho” (HOPKINSON et al., 1975).

De acordo com as Leis da Reflexão, o raio incidente, a reta normal no ponto de incidência e o raio refletido são co-planares. Sendo que o ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão, ou seja:



$$\theta_i = \theta_r \quad \text{Equação 2}$$

**Ilustração 22.** Reflexão direta ou especular.

Fonte: NEWTON et al., 2001.

Sendo:

RI = raio incidente

RR = raio refletido

N = reta normal ao plano de incidência

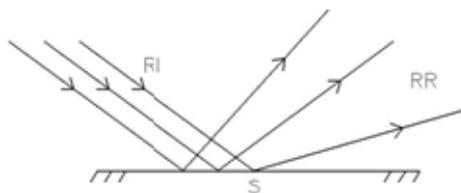
S = superfície polida e refletora

$\theta_i$  = ângulo de incidência (formado pelo raio incidente e a normal)

$\theta_r$  = ângulo de reflexão (formado pelo raio refletido e a normal)

### 3.1.6.2 REFLEXÃO DIFUSA

É quando a luz ao incidir em uma superfície com irregularidades é espalhada para diversas direções, ocorrendo à difusão por reflexão.



**Ilustração 23.** Reflexão difusa.

Fonte: NEWTON et al., 2001.

**CAPÍTULO III**

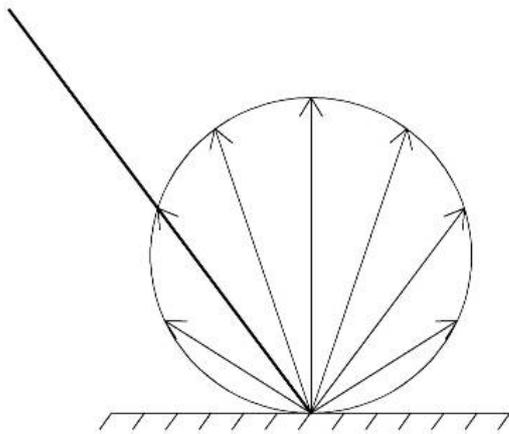
Sendo:

RI = raios incidentes

RR = raios refletidos

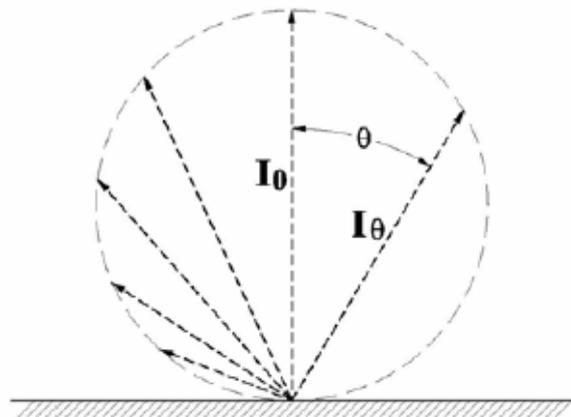
S = superfície refletora irregular

O caso “ideal” ocorre quando a difusão por reflexão é uniforme, tal que a luminância é a mesma em todos os sentidos e a absorção é zero. (HOPKINSON et al., 1975). Isto ocorre quando a superfície é um difusor perfeito.



**Ilustração 24.** . Difusor perfeito.

Fonte: NEWTON et al., 2001.



**Ilustração 25.** . Lei de Lambert.

Fonte: VIANNA & GONÇALVES, 2007, p73.

A superfície “difusora perfeita” também conhecida como superfície lambertiana segue a equação 3 na distribuição da luz por esta refletida.

$$I_{\theta} = I_0 \cdot \cos \theta \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$I_0$  Intensidade Luminosa perpendicular à Superfície;

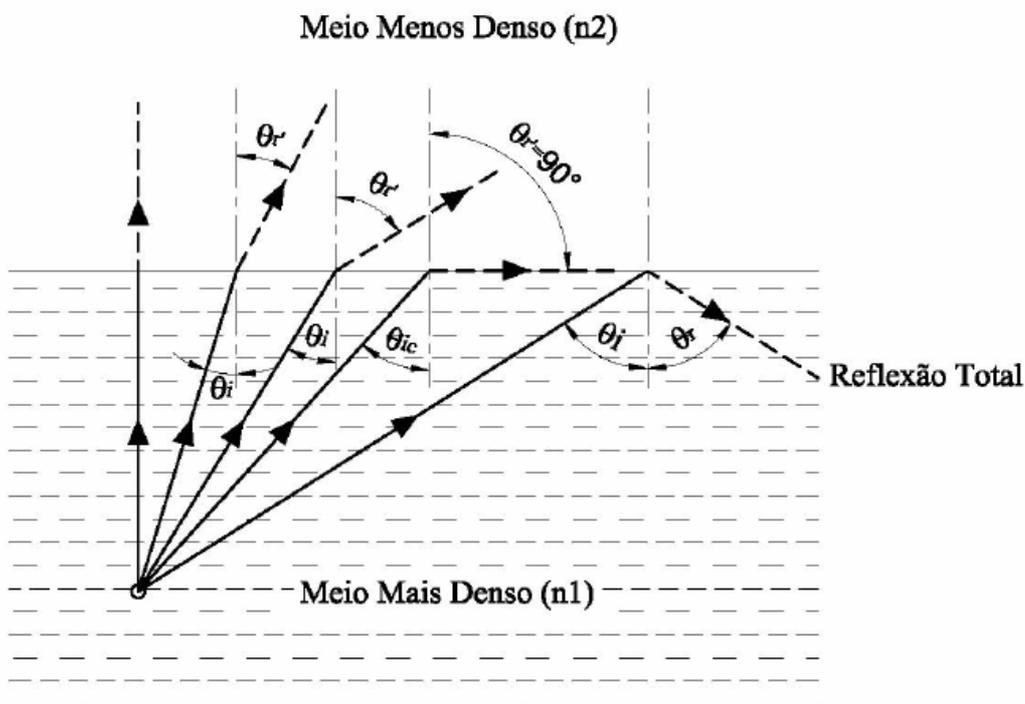
$I_{\theta}$  Intensidade Luminosa na direção  $\theta$  ;

**3.1.6.3 REFLEXÃO TOTAL**

Quando um raio de luz vai de um meio mais denso para um meio menos denso existe um ângulo crítico de incidência para o qual a luz não consegue passar para o outro meio, com isto ocorre o fenômeno chamado de reflexão total da luz.

Este fenômeno é decorrente da refração e inicia-se com ângulo crítico de refração  $\theta_r$  igual a  $90^\circ$  redirecionando toda a luz incidente de volta para o mesmo meio, sem escapar. Este é o fenômeno utilizado pelas fibras ópticas para o transporte de luz e informações.

Na arquitetura estão surgindo aplicações de sistemas de iluminação que utilizam fibras ópticas, guias líquidas e sólidas no transporte da luz natural para aproveitamento em ambientes internos.

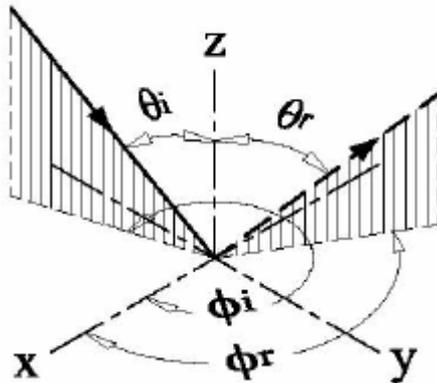


**Ilustração 26.** Reflexão total da luz.

Fonte: IESNA, 2000, cap1, p18, adaptado por MOURA, 2007, p57.

### 3.1.6.4 FUNÇÃO BIDIRECIONAL DE DISTRIBUIÇÃO POR REFLEXÃO DA LUZ (BRDF)

A luz ao incidir em uma superfície opaca será refletida conforme a refletância própria do material para diversas direções que nem sempre estão em um mesmo plano. Para analisar a distribuição resultante dessas reflexões utiliza-se a função bidirecional de distribuição por reflexão da luz (IESNA, 2000).



$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} (sr^{-1}) \quad \text{Equação 4}$$

**Ilustração 27.** . Distribuição bidirecional por reflexão em superfícies opacas.

**Fonte:** IESNA, 2000, pG-4, adaptado por MOURA, 2007, p55.

Onde:

$dL_r$  Diferencial de luminância refletida em determinada direção;

$dE_i$  Diferencial de iluminância incidida em determinada direção;

$\theta_i$  Ângulo de incidência;

$\phi_i$  Azimute de incidência;

$\theta_r$  Ângulo de reflexão;

$\phi_r$  Azimute de reflexão;

Essa função considera as diversas direções que o raio de luz toma após refletir em uma superfície, em todos os planos possíveis. Desse modo é possível estudar situações complexas como, por exemplo, sistemas ópticos de controle que espalham a luz em diversas direções.

### 3.1.7 TRANSMISSÃO LUMINOSA

Transmissão luminosa ocorre quando a luz atravessa uma superfície transparente ou translúcida sendo distribuída do outro lado. Ao atravessar uma superfície transparente ou translúcida parte da energia luminosa é refletida, parte é absorvida pelo material e a parte transmitida será redistribuída no ambiente de modo semelhante ao que ocorre com a reflexão por superfícies opacas, ou seja, apresentando distribuição direta (normal ou especular) e difusa.

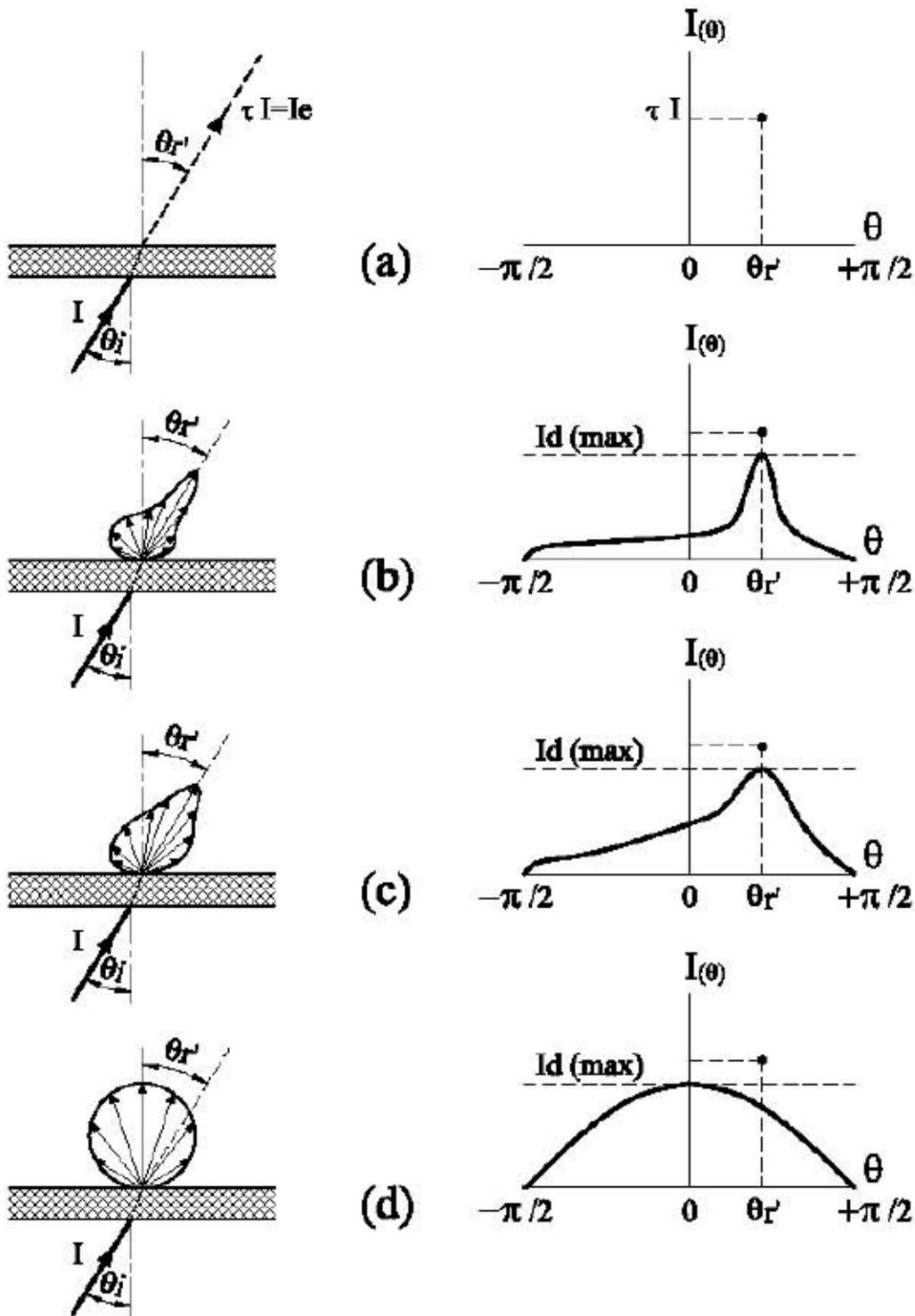


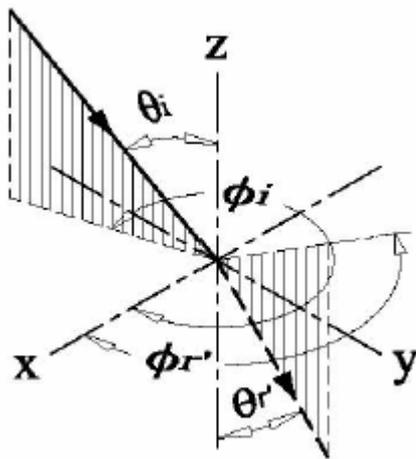
Ilustração 28. Distribuição da luz por transmissão em superfícies transparentes.

Fonte: MOON, 1936, p253, adaptado por MOURA, 2007, p54.

**CAPÍTULO III**

**3.1.7.1 FUNÇÃO BIDIRECIONAL DE DISTRIBUIÇÃO POR TRANSMISSÃO DA LUZ (BTDF)**

Como ocorre com a reflexão em superfícies opacas, a luz ao ser transmitida por uma superfície transparente ou translúcida será distribuída conforme as características do material pelo qual foi transmitida em diversas direções que nem sempre estão em um mesmo plano. Para analisar a distribuição da luz por meio dessas transmissões utiliza-se a função bidirecional de distribuição por transmissão da luz (IESNA, 2000).



$$f_t(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_t(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} (sr^{-1}) \quad \text{Equação 5}$$

**Ilustração 29.** . Distribuição bidirecional por reflexão em superfícies opacas.

**Fonte:** IESNA, 2000, pG-4, adaptado por MOURA, 2007, p55.

Onde:

$dL_t$ : Diferencial de luminância transmitida em determinada direção;

$dE_i$ : Diferencial de iluminância incidida em determinada direção;

$\theta_i$ : Ângulo de incidência;

$\phi_i$ : Azimute de incidência;

$\theta_r$ : Ângulo de refração do raio transmitido;

$\phi_r$ : Azimute do raio transmitido.

Assim são consideradas todas as direções que o raio de luz toma após ser transmitido, independente do plano em que esse passe a propagar.

## 3.2 GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS

Grandezas fotométricas são unidades de medidas utilizadas para quantificar a luz, seja ela emitida por uma fonte ou refletida por superfícies. Para o estudo da iluminação natural é necessário o conhecimento das quatro principais grandezas fotométricas: Intensidade luminosa, fluxo luminoso, iluminância e luminância.

O conceito dessas grandezas é simples, mas a compreensão é complexa devido à abstração necessária ao entendimento do comportamento da luz.

### 3.2.1 INTENSIDADE LUMINOSA

Quantidade de energia emitida (potência) por um objeto em uma dada direção. A unidade no Sistema Internacional de Unidades para medida de Intensidade luminosa é a candela (cd) (HOPKINSON et al., 1975). Segundo Moura (2007) é um conceito relacionado a um vetor que representa o raio de luz partindo de uma fonte pontual numa única direção.

### 3.2.2 FLUXO LUMINOSO

Fluxo luminoso é a quantidade de energia radiante com intensidade de uma candela (cd) emitida por uma fonte pontual isotrópica dentro de um ângulo sólido (ver item 3.3.1) de um esferorradiano (sr) (MOURA 2007).

“Quantidade característica de fluxo radiante que exprime a sua capacidade de provocar uma sensação luminosa, avaliada de acordo com os valores de rendimento luminoso relativo” (HOPKINSON et al., 1975).

A unidade do fluxo luminoso no Sistema Internacional de Unidades é o Lúmen, medida esta que relaciona o fluxo luminoso dentro de um cone de 1 esferorradiano (1 ângulo sólido unitário) emitido por um ponto luminoso com intensidade de 1 candela (em todas as direções).

$$\phi = I \cdot \omega \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

$\Phi$  = Fluxo Luminoso em um ângulo sólido [lm];

I = Intensidade Luminosa [cd];

$\omega$  = Ângulo sólido [sr];

**CAPÍTULO III****3.2.3 ILUMINÂNCIA**

“É a distribuição de luz sobre uma superfície e exprime-se em termos de lúmens por unidade de área”.  $\text{Lm/m}^2$  (HOPKINSON et al., 1975). Ou seja, é a soma de toda a luz que chega a determinada superfície vinda de uma ou mais fontes.

A unidade de medida da iluminância é o lux (lx) que equivale ao  $\text{Lm/m}^2$ . Essa pode ser aferida por equipamentos chamados luxímetros ou fotocélulas, ambos são dotados de um sensor fotoelétrico.

**3.2.4 LUMINÂNCIA**

A luminância é a intensidade luminosa (cd) emitida por uma área em uma dada direção. Esta área pode ser a fonte de luz ou uma superfície que está refletindo a luz vinda de outra fonte.

“Quociente da intensidade luminosa, no sentido dado, de um elemento infinitamente pequeno da superfície que contém o ponto considerado, pela área de projeção ortogonal deste elemento num plano perpendicular ao sentido acima referido” (HOPKINSON et al., 1975).

$$L = \frac{I}{S} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:

L = Luminância [ $\text{cd/m}^2$ ]

I = Intensidade Luminosa [cd]

S = superfície aparente [ $\text{m}^2$ ]

Segundo Moura (2007) a luminância de um difusor perfeito é constante para todas as direções, esta grandeza está intimamente ligada às propriedades da superfície emissora ou refletora não dependendo apenas da relação entre o ângulo da superfície e a linha de visão do observador.

Pode ser definida também como a quantidade física de brilho, que pode ser medida por um fotômetro físico. (HOPKINSON et al., 1975) ou como “a intensidade luminosa de uma superfície qualquer em uma dada direção por unidade ou projeção de área de uma superfície vista nessa direção” (ANDER, 1995). Ou seja, é a luz emitida por uma fonte em uma dada direção. A luminância pode ser medida por equipamentos chamados luminâncímetros e é expressa em candelas/ $\text{m}^2$ .

### 3.2.5 EXITÂNCIA

É a densidade de fluxo luminoso emitido por um ponto de uma superfície. Essa grandeza é expressa em  $\text{lm}/\text{m}^2$  (MOURA, 2007).

$$M = \frac{\phi}{S} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

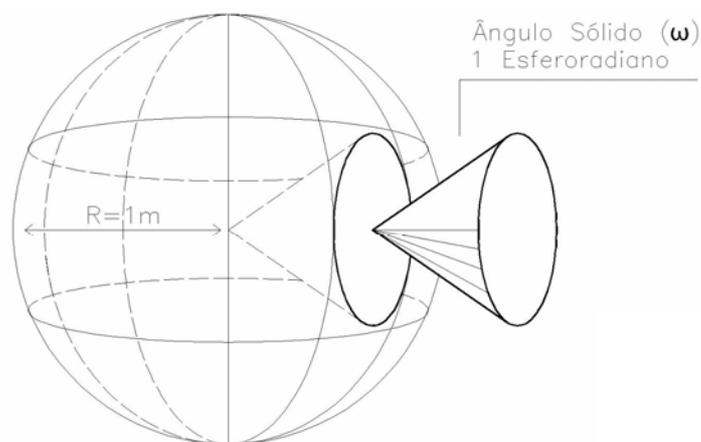
$\Phi$  = Fluxo Luminoso [lm];

S = Área

### 3.3 CONCEITOS

#### 3.3.1 ÂNGULO SÓLIDO

O ângulo sólido ( $\omega$ ) é o sólido formado entre o olho do observador e um alvo a uma distância física (D) no espaço, ou seja, é definido pelo sólido formado a partir do ângulo de visão de um objeto ou superfície (IESNA, 2000). Segundo Moura (2007), em termos gerais é a medida da porção do espaço definida por uma superfície cônica. Um exemplo comum de ângulo sólido é o ângulo cônico definido a partir do centro de uma esfera (Ilustração 30), mas esse também pode ser configurado por um ponto no centro de uma mesa unindo as extremidades de uma janela estendendo-se até a abóbada celeste. Este segundo exemplo é normalmente utilizado nos estudos de iluminação natural.



**Ilustração 30.** Ângulo Sólido.

**Fonte:** NEWTON et al., 2001.

**CAPÍTULO III**

O ângulo sólido é fundamental no estudo da iluminação natural, estando vinculado à definição das grandezas fotométrica além de possibilitar relações entre elas:

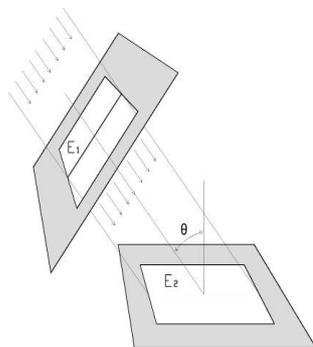
- Qualquer superfície luminosa (difusor perfeito) dentro do mesmo ângulo sólido produz a mesma Iluminância (E) no vértice deste ângulo se as superfícies tiverem a mesma luminância (L).
- A iluminância no centro do hemisfério é igual à área projetada na base do hemisfério (da parcela de céu visível pelo ponto) multiplicada pela luminância do céu.
- A divisão da área projetada na base do hemisfério (da parcela de céu visível pelo ponto) por  $\pi$  é a componente celeste (fator de configuração).

O ângulo sólido  $\omega$  é obtido pela razão entre área S da calota externa definida e o quadrado do raio r. Sua unidade de medida é o esferorradiano (sr).

$$\omega = \frac{S}{r^2} \quad \text{Equação 9}$$

**3.3.2 LEI DO CO-SENO OU LEI DE LAMBERT**

Pela lei do co-seno ou lei de Lambert a intensidade radiante observada a partir de uma superfície lambertiana (difusor perfeito) é diretamente proporcional ao co-seno do ângulo  $\theta$  entre a linha de visão do observador e a direção normal à superfície.



Desse modo são obtidas as relações:

$$E_2 = E_1 \cdot \cos \theta \quad \text{Equação 10}$$

$$I_\theta = I_0 \cdot \cos \theta \quad \text{Equação 11}$$

**Ilustração 31.** Lei do Co-seno ou Lei de Lambert.

**Fonte:** IESNA, 2000, cap.2, p.3

Sendo:

$E_1$  = iluminância no plano perpendicular aos raios [lux];

$E_2$  = iluminância no plano inclinado [lux];

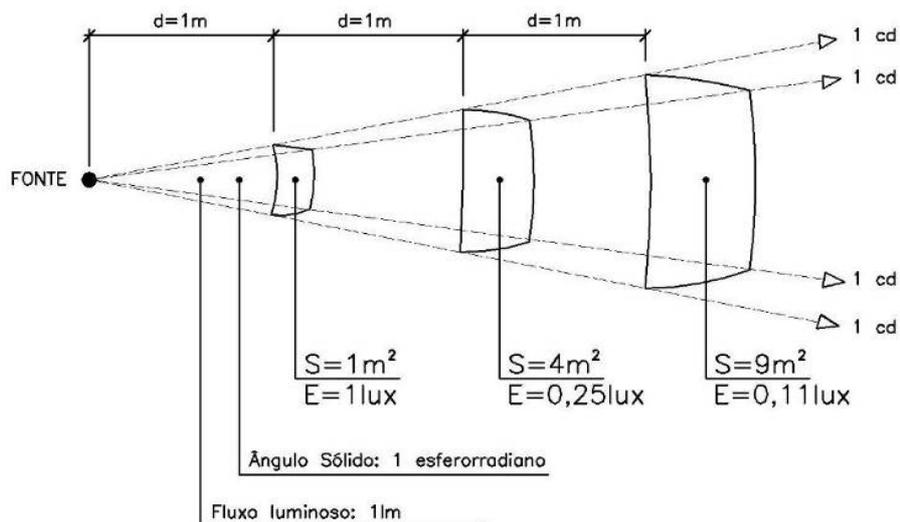
$\theta$  = ângulo formado entre os raios incidentes e a normal à superfície 2;

$I_0$  = intensidade luminosa perpendicular à superfície;

$I_\theta$  = intensidade luminosa na direção  $\theta$ ;

### 3.3.3 LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA

Por esta lei o fluxo luminoso decresce à medida que a distância é elevada ao quadrado.



**Ilustração 32.** Lei do Inverso do quadrado da Distância – representação gráfica.

**Fonte:** IESNA, 2000, cap.2, p.3, adaptado por MOURA, 2007, p19.

Desse modo a iluminância em uma superfície  $S$  é resultante do fluxo luminoso emitido por uma fonte pontual.

$$E = \frac{\phi}{S} = \frac{I}{d^2} \quad \text{Equação 12}$$

**CAPÍTULO III**

Sendo:

$E$  = iluminância na superfície  $S$  [lux]

$\Phi$  = fluxo Luminoso;

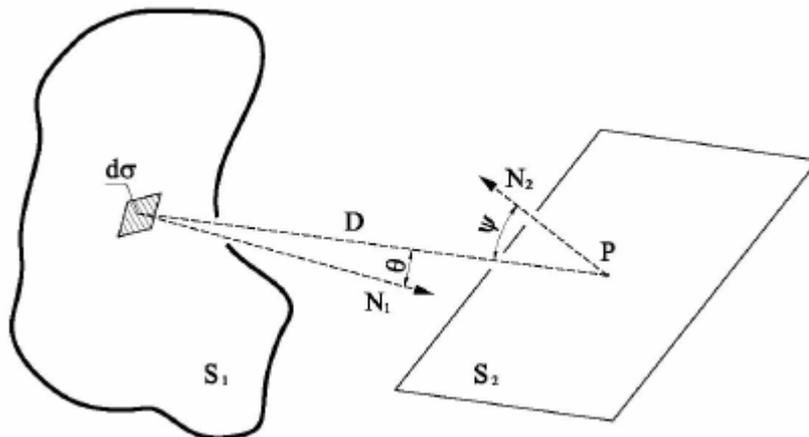
$S$  = superfície de incidência da luz;

$I$  = intensidade Luminosa [cd]

$d$  = distância entre a fonte e a superfície  $S$ ;

**3.3.4 FATOR DE CONFIGURAÇÃO**

Por meio do fator de configuração se tem a iluminação em um ponto proporcionada por uma fonte com características de superfície iluminada, por exemplo, a abóbada celeste. Desse modo o fator de configuração é a iluminação produzida em um ponto por uma fonte superfície ou plano iluminado.



**Ilustração 33.** Plano fonte de luz.

**Fonte:** MOON, 1936, p258, adaptado por MOURA, 2007, p82.

Considerando o plano iluminado  $S_1$ , um difusor perfeito de luminância  $L$  e exitância  $M$  constantes, e o ponto  $P$  no plano  $S_2$  receptor do fluxo luminoso emitido por  $S_1$ , se obtêm o fator de configuração  $C$  de modo simplificado pela equação 13 (IESNA, 2000).

$$E_p = M \cdot C \qquad \text{Equação 13}$$

Sendo:

$E_p$  é a iluminância no ponto P em  $S_2$ ;

Onde:

$$C = \frac{1}{\pi} \int \frac{\cos \theta \cdot \cos \psi}{D^2} \cdot d\sigma \quad \text{Equação 14}$$

Este fator é aplicado à transferência de fluxo de uma superfície a um ponto e varia conforme a forma e a posição desta superfície (fonte de luz) com relação ao ponto estudado. Este fator é obtido por meio de equações matemáticas complexas com difícil visualização geométrica e devido a isto alguns autores fornecem tabelas com as equações para geometrias simples do fator de configuração, facilitando sua utilização (MOURA, 2007).

### 3.3.5 FATOR DE FORMA

O fator de forma é a iluminação de uma superfície vinda de uma outra superfície iluminada, ou seja, ocorre a transferência de fluxos entre superfícies. Segundo Hopkinson et al. (1975) “o fator de forma é a iluminação média na superfície 1 devida à superfície 2, de luminância unitária, uniformemente difusora e tem o símbolo  $f_{12}$ ”.

Moura (2007) ressalta a importância de indicar a direção do fluxo adotando o símbolo  $f_{1 \rightarrow 2}$ , considerando como 1 o plano emissor e 2 o plano receptor. No entanto Hopkinson et al. (1975) não utiliza a seta indicativa da direção do fluxo, mas observa que o primeiro número oposto ao símbolo de fator de forma corresponde à superfície na qual a luz é recebida, ou seja, 1 é o receptor e o 2 é o emissor.

Desse modo o fator de forma que deixa o plano emissor  $A_1$  e atinge o plano receptor  $A_2$  é obtido pela equação 15:

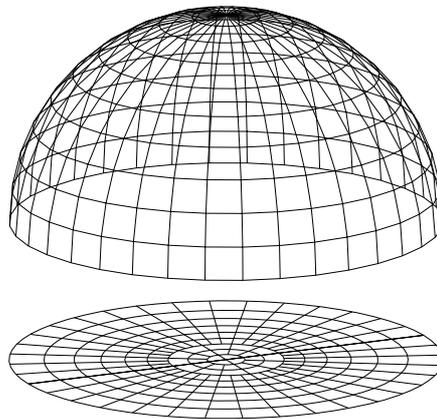
$$f_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi A_1} \int \int \frac{\cos \theta \cdot \cos \psi}{r^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2 \quad \text{Equação 15}$$

## CAPÍTULO III

### 3.3.6 PRINCÍPIO DO ÂNGULO SÓLIDO PROJETADO OU CONCEITO HEMISFÉRIO UNITÁRIO

Este princípio é utilizado por diversos métodos gráficos para a obtenção da componente celeste (CC), possibilitando a obtenção dessa, mesmo quando a área de janela ou fonte luminosa (quando se trata de iluminação artificial) apresenta formato irregular (HOPKINSON et al., 1975).

Para que a distribuição espacial da luz que atinge um ponto P em um plano horizontal seja determinada, é conveniente visualizar o ponto envolto por uma hemisfera de raio unitário (Ilustração 34), composta por círculos de altitude solar e raios de azimute (ABNT 15215, 2005, parte 4).

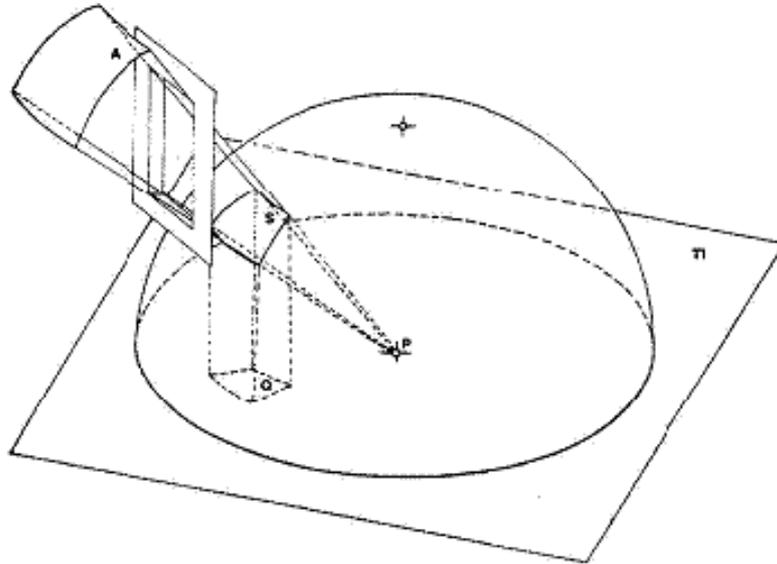


**Ilustração 34.** Hemisfera de raio unitário e sua projeção no plano horizontal.

**Fonte:** ABNT 15215 (2005) – parte 4

Para determinar a iluminação recebida no ponto de interesse P (por exemplo, no centro do plano horizontal de trabalho) por uma abertura qualquer determinada (por exemplo, uma janela lateral) utiliza-se uma hemisfera de raio unitário com centro em P.

Entre o ponto P e as extremidades da abertura forma um ângulo sólido cujo vértice é o ponto P. Projeta-se a área da abertura sobre a calota da hemisfera dentro do mesmo ângulo sólido estabelecido. A área S obtida na hemisfera cobrirá o mesmo ângulo sólido que a abertura (ABNT 15215, 2005, parte 4).



**Ilustração 35.** Princípio do Ângulo Sólido Projetado – ABNT 15215 (2005).

**Fonte:** ABNT 15215 (2005) – parte 4

Considerando o ponto P em um plano vertical temos

$$E_p = L \cdot S \cdot \cos \theta \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$E_p$  é a iluminância em P;

L é a luminância uniforme do céu visível através da abertura;

S é a área obtida na hemisfera pela projeção radial da abertura;

$\theta$  é o ângulo entre a vertical e a direção S;

Considerando a projeção ortogonal de S no plano horizontal como sendo Q temos:

$$Q = S \cdot \cos \theta \quad \text{Equação 17}$$

Substituindo (17) em (16) tem-se que:

$$E_p = L \cdot Q \quad \text{Equação 18}$$

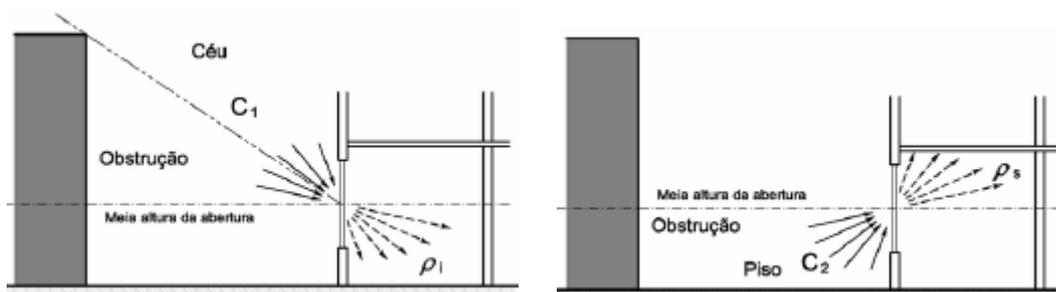
Desse modo é possível afirmar que no ponto P a iluminância  $E_p$  proveniente de uma abertura A é proporcional à projeção Q, no plano de referência, desse trecho de hemisfério do raio unitário compreendido dentro do sólido que tem como vértice o ponto P e como base a abertura A (HOPKINSON et al., 1975).

Sendo assim, é possível à utilização de métodos gráficos que relacionem a geometria e a distância dos objetos ao ponto de referência (ABNT 15215, 2005, parte 4).

### 3.3.7 PRINCÍPIO DO FLUXO DIVIDIDO

Ao estudar a iluminação proveniente de uma janela lateral considera-se o fluxo luminoso dividido em duas porções: uma vinda da parte superior à linha da meia altura da abertura incluindo a luz refletida nas obstruções acima desta e a luz vinda do céu e a outra vinda da parte inferior à linha da meia altura da abertura, sendo o fluxo refletido no chão e nas obstruções abaixo dessa linha.

Esse princípio é utilizado no cálculo da componente de reflexão interna como uma simplificação para as complexas relações envolvidas.



**Ilustração 36.** Princípio do Fluxo Dividido.

**Fonte:** HOPKINSON, 1975, p11, adaptado por MOURA, 2007, p76.

O coeficiente  $C_1$  referente à porção de fluxo acima da linha de meia altura da abertura é dado em função do ângulo de obstrução (Tabela 1).

**Tabela 1.** Coeficiente  $C_1$  em função do ângulo de obstrução

Ângulo de Obstrução (graus)	$C_1$
sem obstrução	39
10	35
20	31
30	25
40	20
50	14
60	10
70	7
80	5

**Fonte:** ROBINS, 1986, p176, adaptado por MOURA, 2007, p76.

O coeficiente  $C_2$  corresponde à porção de fluxo abaixo da linha de meia altura da abertura sendo obtido por meio da razão entre a luminância média das superfícies externas e a luminância média do céu (MOURA, 2007).

$$C_2 = \frac{L_{ei}}{L_c} \times 0,5 \times 100 \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$L_{ei}$  é a luminância média das superfícies exteriores abaixo da meia altura da abertura;

$L_c$  é a luminância média do céu;

0,5 é o fator de configuração;

100 é devido o  $C_2$  ser expresso em porcentagem;

### 3.4 FONTES DE LUZ

Para fins de iluminação, seja de espaços abertos ou de ambientes confinados, necessita-se de uma fonte fornecedora do fluxo luminoso. Essa pode ser artificial ou natural.

A iluminação artificial é resultante de mecanismos desenvolvidos pelo homem (fogueira, tocha, velas, lamparinas, lâmpadas e luminárias) a fim de compensar a falta de luz natural nos períodos sem acesso a esse recurso (noites ou dias de

## CAPÍTULO III

pouca luminosidade) e para suprir as necessidades geradas por construções profundas e ocupação de espaços subterrâneos com difíceis acessos à luz natural.

Define-se como iluminação natural toda aquela provinda do sol, não dependendo de dispêndio energético por parte da edificação. Segundo Mascaró (1991) as principais fontes de luz natural são o sol e a abóbada celeste. O sol é uma fonte primária de luz natural, enquanto que a abóbada celeste é uma fonte secundária. É devido aos fenômenos de difusão atmosférica da luz solar que a abóbada celeste adquire sua luminância.

Para fins de estudo, a avaliação da iluminação natural é feita considerando separadamente a luz direta, que é a luz proveniente diretamente do sol, que só é recebida caso o halo solar esteja visível e a luz difusa, proveniente dos raios solares difundidos pela abóbada celeste. Nesse caso o céu é considerado uma fonte de luz separada, embora tecnicamente toda a luz provenha do sol (SOUZA, 1997).

A luz proveniente do sol é a primeira fonte de luz natural. A difusão desta na atmosfera denomina-se luz de céu e serve como fonte de iluminação natural para ambientes internos. Em dias claros e sem nuvens, a luz do céu limpo pode ser a principal fonte de iluminação de um ambiente, podendo também haver iluminação suplementar considerável da luz do sol refletida no solo ou nos edifícios vizinhos.

A luminosidade vinda do sol apresenta alguns problemas: calor indesejado, brilhos, contrastes excessivos e ofuscamento, sendo necessário seu controle. A maioria dos estudos de iluminação natural considera somente a luz diurna vinda da abóbada celeste, excluindo a luz solar direta sobre os locais de trabalho e considerando condições de céu encoberto.

A aparência luminosa da abóbada celeste é variável durante o dia, devido à trajetória solar própria de cada latitude e às características locais de nebulosidade e fenômenos meteorológicos no decorrer do ano. O sol apresenta um movimento aparente e posições diversas ao longo dos dias e do ano, definidos pelo azimute e pela altura solar. As cartas solares representam a trajetória aparente do sol durante o ano sobre o plano do horizonte do observador, fornecendo dados aos estudos de insolação para diferentes latitudes.

Devido à grande variabilidade das condições de luz da abóbada celeste faz-se necessária uma sistematização das suas características. Normalmente o céu é

classificado de acordo com nebulosidade e transparência à radiação solar. Cada condição de céu apresenta uma modelagem para cálculo ou simulação diferente.

Para estudos de iluminação natural podem ser adotadas fontes de luz naturais ou artificiais. Quando são realizados ensaios ou medições com modelos, geralmente em escala reduzida (ver item 4.1), esses podem ser realizados sob condições de céu real ou por meio de equipamentos que simulem uma ou mais condições de céu (céu artificial).

### 3.4.1 CÉU REAL

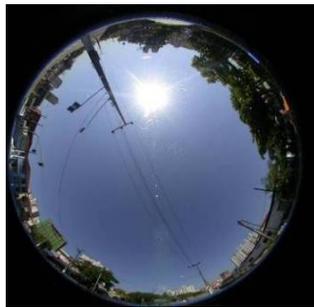
Considera-se como céu real a atmosfera e as condições de nebulosidade que forma juntamente com a radiação vinda do sol e difusa na abóbada celeste a hemisfera visível sobre a cabeça de qualquer indivíduo estando este no centro desta. Esta hemisfera denominada de céu real tem a luminância variável ao longo do dia (posição solar e nebulosidade) e ao longo do ano (sazonalidade) sendo ainda peculiar a latitude própria.

Desse modo, a maioria dos autores afirma que os estudos e simulações em condições de céu real somente obterão observações fotométricas de confiança sob condições de céu relativamente estáveis (encoberto ou claro), uma vez que a luminância e a distribuição de luminâncias do céu natural variam muito, produzindo valores de iluminação não conclusivos para análise. (HOPKINSON et al., 1975 e ANDER, 1995).

Tanto Ander (1995) quanto Hopkinson et al. (1975) não recomendam testes em céu parcialmente encoberto devido à rápida mudança dos níveis de luminância. É também raro que o céu parcialmente encoberto apresente distribuição homogênea de nuvens, o que resulta em baixa correlação entre o céu parcialmente encoberto real e os modelos de cálculo.

Segundo a Norma da ABNT 15215 (2005), para caracterizar as condições de céu deve ser utilizado o método da cobertura do céu preconizado pela NOAA (EUA), sendo que esta é estimada visualmente pela observação do montante de nuvens distribuídas na abóbada celeste. Esta cobertura de nuvens é estimada em percentual e expressa numa escala de 0 a 100%, conforme as seguintes condições de céus: Claro de 0% a 35%; parcialmente encoberto de 35% a 75%; encoberto de 75% a 100%.

**CAPÍTULO III**



Claro



Parcialmente Encoberto



Encoberto

**Ilustração 37.** Condição de Céu – Foto.

**3.4.1.1 CLARO**

O céu claro é definido como tendo no máximo 35% da abóbada celeste coberta por nuvens. Nesse caso a distribuição de luminâncias é anisotrópica, variando de acordo com a posição do sol, sendo assim, o nível total de luminância produzida varia constante e lentamente durante o dia.

Ao contrário do que se acredita, nessas condições o céu é menos brilhante do que quando está encoberto, pois há menor difusão da luz pela atmosfera. No entanto, os níveis globais de luminância, para céu claro, podem ser maiores porque há maior disponibilidade de luz direta e a quantidade de brilho é maior no horizonte do que no zênite (ANDER, 1995).

Visualmente o céu claro apresenta pouca nebulosidade e coloração azul. Quanto mais intenso o azul, menor a luminosidade (BRACARENSE, 2003).

**3.4.1.2 PARCIALMENTE ENCOBERTO**

O céu parcialmente encoberto é definido como tendo de 35% a 75% da abóbada celeste coberta por nuvens e pode possuir uma cobertura de nuvens que varia de muito densa a muito esparsa.

A distribuição de luminâncias varia bastante de uma área do céu para outra e tais variações tendem a ocorrer rapidamente, de acordo com a posição das nuvens em relação ao sol. A presença de luz direta também é inconstante quando se trabalha com este tipo de céu.

### 3.4.1.3 ENCOBERTO

O céu encoberto é definido como tendo no mínimo 75% da abóbada celeste coberta por nuvens. A distribuição de luminâncias é isotrópica, ou seja, não varia de acordo com o azimute, sendo a mesma em todas as direções. A distribuição de luminância também é constante ao longo do tempo, já que variações relativas à posição do sol e distribuição de nuvens não são consideradas.

A iluminância total produzida pelo céu encoberto na superfície da terra pode variar de centenas de lux até milhares de lux, dependendo da densidade das nuvens e da posição do sol (ANDER, 1995).

O modelo de céu encoberto mais utilizado hoje é o modelo Moon e Spencer, adotado como padrão pela Commission Internationale D'Éclairage (CIE), onde considera-se que o zênite é três vezes mais brilhante que o horizonte (CIE, 1994).

Visualmente o céu encoberto possui nuvens que preenchem toda superfície da abóbada celeste e coloração cinza-claro (BRACARENSE, 2003).

### 3.4.2 CÉU ARTIFICIAL

No estudo da luz natural é possível utilizar equipamentos capazes de simular o seu comportamento, criando ambientes de luminosidade totalmente controlável (ANDER, 1995).

Ander (1995) e Robbins (1986) consideram altas as despesas para construção e manutenção de céus artificiais, porém, as medições neles realizadas são relativamente simples.

A principal vantagem do estudo da iluminação natural através deste tipo de simulação é a constância total da iluminância, mas para isso a distribuição dessa deve ser correta, estando de acordo com o tipo de céu desejado (HOPKINSON et al., 1975).

O céu artificial retilíneo, do tipo caixa cúbica de espelhos, é utilizado para medições em condições de céu encoberto, enquanto o céu artificial hemisférico ou de domus é usado tanto para medições de céu claro como de céu encoberto (ROBBINS, 1986).

O céu artificial retilíneo é simples e barato para ser confeccionado. Desse modo, essa ferramenta pode ser aplicada para fins didáticos, pois permite a

## CAPÍTULO III

visualização do fenômeno com baixo custo e facilidade de manuseio. Permite ainda a rápida e fácil troca de elementos acoplados as aberturas, sendo indicado para estudos preliminares e acadêmicos.

De acordo com a norma ABNT15215 (2005), os céus artificiais “proporcionam um ambiente facilmente controlável, estável e reproduzível, permitindo que várias alternativas de projeto sejam testadas exatamente sob as mesmas condições de céu”. A maioria dos céus artificiais simulam condições de céu fixas (uniforme ou encoberto) com ou sem luz direta do sol.

### 3.4.2.1 RETILÍNIO

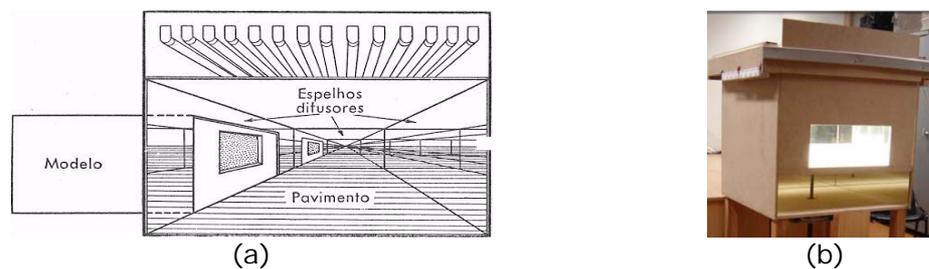
A principal vantagem do céu artificial retilíneo é a sua facilidade de construção, que pode ser realizada em pequenas dimensões para fins didáticos. Este tipo de modelo de céu é composto por uma caixa retilínea com teto luminoso e espelhos planos paralelos nas faces verticais (HOPKINSON et al., 1975).

As dificuldades existentes referem-se à manutenção da temperatura ideal de funcionamento das lâmpadas, o que pode ser solucionado com auxílio de ventilação adequada (HOPKINSON et al., 1975).

Os principais requisitos de um céu artificial são:

1. Superfície Luminosa com distribuição de Luminância conhecida e controlada (caixa de lâmpadas que representa o céu).
2. Superfície de Refletância conhecida (representa o solo).
3. Horizonte corretamente colocado em relação aos modelos a serem usados (calibração da distribuição das luminâncias).

O céu deve ter uma distribuição de luminâncias corretas. Isto pode ser obtido pela seleção adequada dos materiais refletores e difusores além da correta colocação das lâmpadas, podendo-se alcançar uma distribuição muito semelhante a do céu padrão CIE. No modelo de céu “caixa cúbica de espelhos” é possível obter condições próximas ao céu padrão CIE por meio da calibração, ou seja, garantindo que devido à absorção da luz no espelho e em virtude das múltiplas reflexões, considerando a refletância deste, a relação de área espelhada proporcione que no horizonte seja menos brilhante que no zênite. Com esta calibragem é possível atingir a proporção de 3 no zênite para 1 no horizonte.



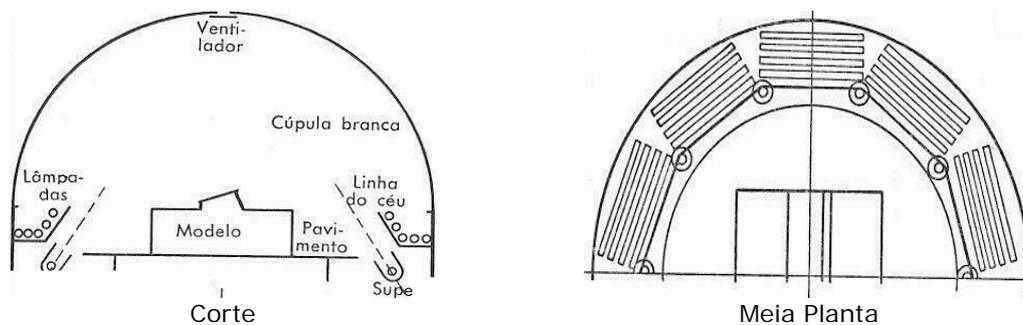
**Ilustração 38.** Céu Retilíneo – Caixa Cúbica de Espelhos.

(a) Fonte: HOPKINSON et al., 1975, p11.

(b) Fonte: Céu artificial retilíneo construído no LABAUT<sup>11</sup> – FAUUSP<sup>12</sup>.

### 3.4.2.2 HEMISFÉRICO

A principal vantagem do céu artificial em abóbada é a fácil compreensão de seu funcionamento por pessoas não especializadas e o principal inconveniente é a relação entre a escala do modelo e a do céu. Desse modo deve haver mecanismos de calibragem que garantam a correta posição da linha do horizonte, que não deve prolongar-se abaixo do topo da janela do modelo. Para obtenção da condição de céu claro, faz-se necessária à correta luminância, o que pode ser conseguido com o uso de lâmpadas da cor correta e em quantidade suficiente (HOPKINSON et al., 1975).



**Ilustração 39.** Céu Hemisférico.

Fonte: HOPKINSON et al., 1975, p11.

Esses equipamentos possuem lâmpadas dimerizáveis que possibilitam a variação da luminância e a simulação do posicionamento do sol na abóbada celeste. A desvantagem do céu hemisférico é a complexidade para a construção e calibragem, bem como os custos embutidos na construção e manutenção dos mesmos. Esses ainda são de grandes dimensões necessitando de grandes espaços disponíveis para o armazenamento e utilização do equipamento.

<sup>11</sup> LABAUT – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAUUSP.

<sup>12</sup> FAUUSP – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.



**CAPÍTULO IV**

**MÉTODOS, MODELOS E FERRAMENTAS DE CÁLCULO**



## 4 MÉTODOS, MODELOS E FERRAMENTAS DE CÁLCULO

Para prever a iluminação natural existem métodos e ferramentas de cálculos baseados em modelos que podem ser físicos ou matemáticos. Estes últimos são aplicáveis por meio de ferramentas analíticas, gráficas e computacionais.

Os principais métodos para a previsão da iluminação natural são: método dos lumens, método das componentes ou fator de luz diurna (FLD) e método da transferência de fluxos.

O modelo físico é uma ferramenta muito utilizada na arquitetura para analisar diversos aspectos durante a fase de projeto. Quando adotada no estudo das soluções para iluminação natural, permite análises qualitativas e quantitativas com poucos recursos.

### 4.1 MODELOS FÍSICOS

Os modelos configuram uma eficiente ferramenta de estudo, apresentando resultados quantitativos precisos mesmo quando modelos simples são utilizados. Devido ao seu comprimento de onda, a penetração, reflexão e comportamento da luz no modelo físico reduzido são idênticos aos do espaço real, dispensando correções de escala necessárias quando se está estudando outros fenômenos (ROBBINS, 1986). Além disso, caso o modelo seja executado de maneira a permitir a troca de parâmetros como largura, altura, pé-direito e área de abertura, tornam-se fácil a comparação de soluções diferentes.

As questões técnicas que envolvem a construção de modelos físicos não exigem o uso de equipamentos caros e, para a resolução de questões simples, o excesso de análise dos dados obtidos também é dispensável, conferindo rapidez e versatilidade a esse tipo de estudo (ANDER, 1995).

Moore (1991) pontua que, através da observação visual ou registro fotográfico, é possível a obtenção tanto de avaliações quantitativas quanto qualitativas.

#### 4.1.1 TIPO E ESCALA DOS MODELOS

O modelo físico destinado a estudos de iluminação deve ser detalhado para atender aos objetivos de cada estudo específico. Desse modo, o projeto e a confecção rigorosa das partes componentes são fundamentais para atingir bons

**CAPÍTULO IV**

resultados, assim como a representação, a mais fiel possível, das propriedades dos materiais representantes das características superficiais de cada elemento. A escala do modelo depende do tipo de informação que se pretende com as medições a serem realizadas.

Para Robbins (1986), os modelos podem ser de quatro tipos e para cada tipo ele sugere uma escala. Em estudos de sombras usam-se modelos de pequena escala, em estudos de impacto da reflexão da luz em outras superfícies ou edifícios e em estudos para avaliação da penetração e distribuição da luz do sol e do céu utilizam-se modelos de grande escala. Já quando o modelo destinar-se a documentação fotográfica, a escala dependerá do equipamento utilizado e suas especificações.

As escalas limite dos modelos de estudo de luz natural são, no máximo 1:5 e 1:4, e no mínimo 1:40, no entanto, o ideal é que a escala dos modelos seja 1:10 ou 1:20 (ABNT 15215, 2005, parte 4).

**4.1.2 TAMANHO DA FOTOCÉLULA**

Moore (1991), Robbins (1986) e Hopkinson et al. (1975) concordam que a escala do modelo, na prática, é limitada pelo tamanho do sensor fotoelétrico utilizado.

A norma brasileira de iluminação natural ABNT 15215 (2005, parte 4) recomenda que não sejam utilizados sensores maiores que 0,03 m<sup>2</sup> na escala do modelo. Caso o sensor seja circular seu diâmetro não deve ser superior a 20 cm na escala do modelo.

**4.1.3 O QUE REPRESENTAR**

A escolha de quais variáveis devem ser representadas e com que nível de detalhamento está intimamente ligado ao tipo de avaliação que se deseja fazer. Caso seja um estudo de vizinhança, verificando o impacto de novas construções nos edifícios vizinhos, por exemplo, o modelo não precisará ter seu interior detalhado, mas o entorno será de grande importância, sendo suficiente uma maquete volumétrica. Já um estudo que pretende avaliar a penetração e distribuição da luz natural exigirá a reprodução de um grande número de detalhes do interior do ambiente estudado. (ROBBINS, 1986).

Em estudos quantitativos, por exemplo, é possível simplificar a representação do mobiliário desde que se tome cuidado em reproduzir com exatidão o acabamento, evitando brilhos que causem reflexões indesejadas e afetem a iluminância interna e os resultados obtidos (MOORE, 1991). O ideal é que todos os materiais utilizados possuam cor, brilho, textura e refletância compatíveis com as superfícies que representam ou pretendem representar (ROBBINS, 1986).

Para os modelos apresentarem todas as vantagens e resultados esperados, é necessário que eles sejam confeccionados de acordo com certos critérios. Para que diferentes alternativas de construção sejam comparadas é necessário que o modelo seja construído de forma modular, permitindo acréscimos e supressões. Devem-se evitar “vazamentos” de luz, não permitindo que a luz penetre pelas junções das paredes ou por qualquer outro ponto que não sejam as aberturas existentes no espaço real, pois isso alteraria os resultados obtidos. Para tanto, as juntas devem ser cobertas com papel alumínio ou fita preta do lado de fora da maquete e os materiais utilizados em sua construção devem ser opacos. Caso não sejam, pode-se utilizar tinta spray (MOORE, 1991).

Os modelos para estudo de distribuição e penetração de luz natural raramente precisam incluir, e não é aconselhado que incluam, vidros nas aberturas. É preferível que o coeficiente de transmitância do vidro seja acrescentado nos dados de penetração obtidos.

Porém, se a principal fonte de luz natural incidir na abertura com ângulo de incidência superior a  $60^\circ$ , o vidro deve ser incluído no modelo para que seja estabelecida a porção de luz refletida (ROBBINS, 1986).

#### 4.1.4 GEOMETRIA DOS AMBIENTES

A profundidade que a luz natural irá penetrar em um ambiente depende da relação entre a altura do teto e o topo da abertura. Uma abertura alta irá permitir que a luz entre no ambiente atingindo o plano do teto e seja refletida no interior do espaço.

A profundidade do ambiente também possui relação direta com a intensidade da iluminação em seu interior. Em um modelo em escala reduzida de um ambiente, se a altura do pé direito, a área e a localização da abertura forem mantidas constantes e a profundidade do ambiente variar, haverá variação da intensidade da

luz em seu interior, pois em ambientes mais profundos, a mesma quantidade de luz incidente tem que ser distribuída por uma área maior (ANDER, 1995).

#### **4.1.5 DIAS E HORÁRIOS DAS MEDIÇÕES**

De acordo com Robbins (1986), juntamente com os dados de iluminância e luminância coletados é útil manter um registro das condições do céu observado nos dias de medições. Dados como existência ou não de nuvens e sua espessura ou densidade são relevantes em se tratando de medições em modelo com céu real. É importante também registrar o dia e a hora da medição.

Não é aconselhável que se realizem medições em horários que o sol apresente altura solar igual ou menor a  $10^\circ$  acima da linha do horizonte, devido às mudanças de eficácia da luminosidade solar nessas alturas. Em geral as medidas são feitas nos horários de funcionamento do edifício testado, sendo recomendável realizar medições no início do horário de funcionamento, no meio do dia e no fim do expediente.

Em condições de céu claro são importantes a hora do dia e a altura solar, tornando-se necessária varias medições durante o dia.

O melhor horário para a realização das medidas é entre as 9:00h e as 15:00h. Para obtenção de dados satisfatórios são necessárias, no mínimo, três medições ao dia, levando-se em consideração o melhor horário para realização das medidas, estas deveriam ser feitas as 9:00h, ao 12:00h e as 15:00h.

#### **4.1.6 LOCALIZAÇÃO DAS FOTOCÉLULAS**

Segundo Robbins (1986), para realizar medições de iluminação natural em modelos com escala reduzida, devem-se colocar, além das fotocélulas no interior do modelo localizadas na altura do plano de trabalho, pelo menos uma fotocélula no exterior, todas em plano horizontal.

No interior do modelo as fotocélulas podem ser organizadas de três maneiras distintas: pontual, utilizando apenas uma fotocélula; linear, usando uma série de fotocélulas localizadas em uma reta; e em grade, utilizando uma série de fotocélulas configurando-se uma grelha.

Quando se mede em um único ponto, a fotocélula deve ser colocada em local crítico pré-determinado. A medida linear é a mais comum em medições de

iluminância absoluta, podendo ser localizada na vertical ou na horizontal e necessita de no mínimo de três fotocélulas em uma mesma linha. A grelha é usada para mapear a iluminância dentro do modelo e apresenta resultados mais minuciosos

#### 4.1.7 QUANTIDADE DE FOTOCÉLULAS

Segundo a norma brasileira ABNT 15215 (2005, parte 4) para determinar o número mínimo de pontos necessários para verificação do nível de iluminação natural, com erro inferior a 10%, deve-se determinar o Índice do Local (K) pela equação 20 e recorrer à tabela 2:

$$K = \frac{C \cdot L}{H \cdot (C + L)} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

L - largura do ambiente, em metros [m].

C - comprimento do ambiente, em metros [m].

H - distância vertical em metros entre a superfície de trabalho e o topo da janela, em metros [m].

**Tabela 2.** Nº de pontos de medição devidos ao índice do local (k).

K	Nº de Pontos
$K < 1$	9
$1 \leq K < 2$	16
$2 \leq K < 3$	25
$K \geq 3$	36

#### 4.1.8 CORREÇÕES

“As componentes individuais da iluminação natural sofrem influências: da distribuição de luminâncias no céu; da obstrução causada por caixilhos de envidraçados e obstáculos; perda de luz nos vidros; da limpeza dos vidros e da manutenção das propriedades refletoras das superfícies interiores e exteriores” (BRACARENSE 2003).

**CAPÍTULO IV**

Hopkinson et al. (1975) sugere alguns fatores para correção dos valores de transmitância de alguns materiais:

**Tabela 3.** Fator de correção dos valores de transmitância.

	Fatores de Correção
<i>Vidros transparentes:</i>	
Normal	1,0
Polido	1,0
Polido Armado	0,95
<i>Vidros texturados e difusores:</i>	
Normal (1/8")	0,95
Rugoso (1/4")	0,95
Rugoso Armado (1/4")	0,90
Catedral	1,0
Martelado	1,0
Arctico	0,95
Ondulado (meia-cana)	0,95
<<Small Morocco>>	0,90
<i>Vidros especiais:</i>	
Absorvente de calor colorido, liso	0,90
Absorvente de calor colorido, rugoso	0,60 – 0,75
Isolador laminado	0,60 – 0,70
<i>Chapas de plástico:</i>	
Ondulada, armada com fibras de vidro:	0,90
Moderadamente difusora	0,75 – 0,90
Fortemente difusora	0,65 – 0,80
Muito fortemente difusora	0,65 – 0,90

Nota: Usualmente utiliza-se 0,8, ou seja, 20% de perda de iluminação, tanto para correções dos fatores de vidro como para fatores de caixilho e manutenção.

## 4.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Dos três principais modelos matemáticos utilizados na predição da iluminação natural – método dos lumens, fator de luz diurna (FLD) e método da transferência de fluxos – o primeiro é o mais simples, permitindo o cálculo manual, o FLD é o mais usados, sendo aplicado em métodos gráficos e analíticos e o último é o mais complexo e predominantemente utilizado por ferramentas computacionais.

### 4.2.1 MÉTODO DOS LUMENS

O método dos lúmens para cálculo de iluminância é similar ao método das cavidades zonais (zonal cavity) para iluminação artificial e é suficientemente simples para permitir o cálculo manual (IESNA, 2000). Parte do princípio que a luz obtida em um ponto no plano de trabalho é função da luz disponível no plano das aberturas.

Esse método fornece os resultados em valores de iluminância [lx] para o ponto estudado e o cálculo é válido somente para a condição de céu e o horário especificado.

A equação básica para o cálculo da iluminância nesse método é:

$$E_i = E_x \cdot NT \cdot CU \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

$E_i$  – iluminância interior [lux];

$E_x$  – iluminância exterior [lux], no plano da abertura;

NT – transmitância líquida;

CU – coeficiente de utilização;

O processo para determinar a transmitância líquida e o coeficiente de utilização quando a abertura é lateral difere do processo para abertura zenital. Caso os dois tipos de sistemas estejam sendo utilizados, a iluminância deve ser calculada separadamente para cada sistema e depois somada para produzir efeito combinado (IESNA, 2000).

Pelo fato do método dos lumens ser baseado em um processo de interpolação dos dados de teste, sua precisão é limitada ao tipo geral do ambiente, janelas e

condições testadas (um ambiente em que o topo da janela está no nível do teto, o peitoril está na altura do plano de trabalho, etc.). Com cautela essas condições podem ser expandidas para que abranjam uma grande variedade de tipos de edifícios (MOORE, 1991).

#### 4.2.2 MÉTODO DO FATOR DE LUZ DIURNA (FLD)

O Método do fator de luz diurna (FLD), método das componentes ou método do daylight factor (DF) são o mesmo método com nomenclaturas diferentes, os quais estabelecem uma relação entre a iluminância em um ponto do ambiente (iluminância interna –  $E_{hi}$ ) e a existente em um ponto localizado em um plano horizontal desobstruído no exterior (iluminância externa –  $E_{he}$ ). Neste método a luz direta do sol é excluída e o tipo de céu utilizado era, inicialmente, o uniforme ou o encoberto padrão CIE (CIE, 1994). Atualmente já se usa o método para céu claro, desde que se exclua da avaliação a luz direta.

$$FLD = \frac{E_{hi}}{E_{he}} \cdot 100$$

Equação 22

Segundo Hopkinson (1975) “O Fator de Luz do Dia é uma medida da iluminação natural num ponto de um dado plano, expressa como uma relação da iluminação no plano dado e no ponto em causa, com a iluminação exterior simultânea num plano horizontal proveniente da totalidade de um céu não obstruído com uma distribuição de luminâncias suposta ou conhecida. A luz solar direta exclui-se de ambos os valores de iluminação (interior e exterior). Esse conceito é expresso em percentagem”.

O FLD é composto por três principais componentes: a componente de céu (CC), a componente refletida exterior (CRE) e a componente refletida interior (CRI).



**Ilustração 40.** As Componentes do FLD

**Fonte:** ABNT 15215 (2005)

Estas componentes em seus valores percentuais são somadas e o resultado desta soma é multiplicado pelos redutores devido à manutenção, transmissão do vidro e caixilho.

$$FLD = (CC + CRE + CRI) \cdot Kt \cdot Km \cdot Kc$$

Equação 23

Onde:

$Kt$  é a transmitância do vidro;

$Km$  é o fator de manutenção;

$Kc$  é o coeficiente do caixilho (área transparente da abertura);

Existem alguns métodos para o cálculo de FLD, sendo que a norma brasileira de iluminação natural recomenda o procedimento desenvolvido por Souza (1997), no qual são utilizadas ferramentas gráficas para calcular a componente celeste, tanto para céu claro como para o encoberto.

Para entender como se compõem as componentes refletidas é necessário recorrer à definição de fator de configuração (ver item 3.3.4), pois aquelas são definidas em função deste.

#### 4.2.2.1 COMPONENTE CELESTE – CC

A componente celeste CC é a parcela de céu vista por cada ponto, devendo ser descontadas as obstruções. O cálculo dessa componente tem por base o princípio do ângulo sólido projetado ou conceito do Hemisfério Unitário.

Esta componente pode ser calculada por método analítico ou gráfico, no entanto são mais usuais os métodos gráficos, tais como: DCLR – diagramas de contribuição relativa de luz (ABNT), diagramas de pontos (PLEIJEL e MOORE), diagramas de área igual (WALDRAM) e os transferidores de iluminação natural (BRE). Destes somente os transferidores de iluminação BRE não adotam o traçado de mascaras no cálculo da componente celeste, considerando as obstruções, mas por outro procedimento.

**4.2.2.2 COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA – CRE**

Somente é necessário calcular a CRE quando a entrada de luz natural em um ambiente for limitada por obstruções externas. Tais obstruções podem ser iluminadas ou não pelo sol.

A CRE pode ser obtida pelo cálculo da componente celeste. A parcela de céu ocupada pela obstrução é definida como componente de obstrução  $C_{ob}$  e determinada por qualquer um dos métodos descritos anteriormente para o cálculo da componente celeste.

Segundo Hopkinson et al. (1975) é comum adotar uma simplificação para esse cálculo, considerando a luminância da parcela obstruída como uma fração  $F_{ob}$  da luminância do céu. Quando essa fração não é conhecida, adota-se para céu uniforme  $F_{ob} = 0,1$  e, para céu encoberto CIE, os fatores  $F_{ob} = 0,1$ , se for considerada a luminância média de todo o céu, ou  $F_{ob} = 0,2$ , se for considerada apenas a luminância próxima ao horizonte.

A componente de reflexão externa CRE é obtida, em porcentagem, pela multiplicação da componente de obstrução  $C_{ob}$  e o fator  $F_{ob}$  (MOURA, 2007):

$$CRE = C_{ob} \cdot F_{ob}$$

Equação 24

A NBR 15215 (2005) separa o cálculo da CRE em duas opções: quando a obstrução não é iluminada pelo Sol direto, o cálculo é semelhante aos demais métodos citados, mas recomenda, para o fator  $F_{ob}$ , o coeficiente de reflexão da superfície externa da obstrução. Quando a superfície da obstrução é iluminada diretamente pelo Sol, a contribuição é calculada em valor absoluto ( $CRE_{abs}$ ), cujo resultado é obtido em iluminância, não em valor percentual, e deverá ser somado no cômputo final do cálculo (MOURA, 2007).

#### 4.2.2.3 COMPONENTE REFLETIDA INTERNA – CRI

A componente refletida interna é o resultado do cálculo de todas as inter-reflexões da luz nas superfícies interiores, sendo complexo para procedimento manual, devido a isto são necessárias algumas simplificações.

Desse modo, esta pode ser calculada pelo método de Arndt, apresentado por Hopkinson et al. (1975):

$$CMR = \frac{E_w \cdot W \cdot R}{E_h \cdot A \cdot (1 - R)}$$

Equação 25

Onde:

CMR é a componente média refletida;

$E_w$  é a iluminação vertical da janela;

$E_h$  é a iluminação horizontal do céu desobstruído;

$W$  é a área da janela;

$A$  é a área total do compartimento (teto, paredes e pavimento);

$R$  é a refletância média do teto, paredes e pavimento;

A razão entre  $E_w$  e  $E_h$  é o fator de configuração vertical da janela.

Outro modo de obter esta componente é por meio da equação de inter-reflexão da BRE (ROBINS, 1986), a qual está baseada no princípio do fluxo dividido (ver item 3.3.7).

$$CRI = \frac{T_g \cdot A_g}{A \cdot (1 - \rho)} (C_1 \cdot \rho_i) \cdot (C_2 \cdot \rho_s)$$

Equação 26

**CAPÍTULO IV**

Onde:

CRI é a componente de reflexão interna;

$T_g$  é a transmitância difusa do vidro;

$A_g$  é a área de vidro da abertura (descontando partes opacas do caixilho);

$A$  é a área total das superfícies interiores;

$\rho$  é o coeficiente de reflexão médio de todas as superfícies interiores;

$\rho_s$  é o coeficiente de reflexão médio das superfícies superiores do ambiente (acima da meia altura da abertura);

$\rho_i$  é o coeficiente de reflexão médio das superfícies inferiores do ambiente (abaixo da meia altura da abertura);

$C_1$  é o coeficiente da parcela superior do fluxo exterior;

$C_2$  é o coeficiente da parcela inferior do fluxo exterior;

A ABNT 15215 (2005) utiliza um sistema semelhante ao adotado no cálculo das componentes CC e CRE para determinar a CRI. As superfícies do ambiente interno são projetadas em um gráfico com projeção estereográfica e estas são sobrepostas ao diagrama com os fatores de forma. O valor encontrado do fator de forma das superfícies internas,  $FF_{Si}$ , de cada uma das superfícies é multiplicado pela refletância média desta superfície,  $\rho_{mi}$ , obtendo-se assim o valor percentual da contribuição CRI em relação à localização do ponto.

$$CRI = \sum_{n=i}^{n=1} (FF_{Si} \cdot \rho_{mi}) \cdot CC$$

Equação 27

Onde:

$n$  é o número de superfícies;

$FF_{Si}$  é o fator de forma de cada uma das superfícies internas;

$\rho_{mi}$  é a refletância média de cada superfície interna;

### 4.2.3 MÉTODO DA TRANFERÊNCIA DE FLUXOS

Este método é mais complexo e mais preciso que o método dos lumens ou o método do fator de luz diurna, fornecendo resultados tanto em iluminância como em luminâncias. Devido à complexidade de suas equações e a precisão dos resultados obtidos é o método mais empregado nas modelagens computacionais para predição da iluminação natural. Já para o cálculo manual é pouco utilizado.

A transferência de fluxos se dá entre a fonte e o receptor, e estas podem ser pontos ou áreas. Ainda é considerada a distribuição do fluxo que pode ser difusa ou não. Para tanto a IESNA (2000) classifica essas transferências em seis tipos:

1. fonte e receptor pontuais;
2. fonte pontual e receptor em área;
3. fonte em área com receptor pontual e distribuição não difusa;
4. fonte em área com receptor em área e distribuição não difusa;
5. fonte em área com receptor pontual e distribuição difusa;
6. fonte em área com receptor em área e distribuição difusa;

Os tipos 1 e 2 são os mais simples, utilizam a equação básica para fontes pontuais ou superfícies subdivididas em áreas elementares tendo o resultado obtido pela integração e sua equação é a mesma deduzida da lei do inverso do quadrado e da lei do co-seno (ver item 3.3.2 e 3.3.3) (MOURA, 2007).

Os tipos 3 e 4 são os mais complexos e os que melhor representam à realidade, no entanto, as dificuldades em tratar as superfícies não difusas fazem com que estes dois tipos sejam pouco utilizados mesmo com o auxílio dos recursos computacionais (MOURA, 2007).

Os tipos 5 e 6 têm suas equações baseadas nos princípios do fator de configuração e do fator de forma (ver itens 3.3.4 e 3.3.5). Segundo Moura (2007) “o fator de configuração é aplicado na transferência de fluxo da superfície para um ponto, e o fator de forma é utilizado para a transferência de fluxo entre duas superfícies. A superfície fonte luminosa é sempre um difusor perfeito, e a equação que multiplica a exitância desta superfície pelo fator de configuração ou pelo fator de forma fornece, respectivamente, a iluminância no ponto ou a iluminância média na superfície receptora”.

**CAPÍTULO IV****4.2.4 MODELOS COMPUTACIONAIS**

Atualmente é possível utilizar diversos aplicativos computacionais para estudos de iluminação artificial e natural. Estes softwares facilitam a construção de cenários diversos, a alteração das condições de exposição (tipos e condições de céu) e proporcionam o controle das variáveis. São ferramentas extremamente úteis para agilizar a obtenção de resultados.

Os softwares utilizam modelagem matemática associada a ferramentas gráficas e computacionais para calcular e prever a iluminação dos ambientes. O grande problema encontrado nesse tipo de ferramenta é a falta de informação em torno do modelo matemático adotado na construção dos aplicativos computacionais voltados ao estudo da luz natural.

Grande parte dos softwares atuais utiliza o método do raio traçado (ray tracing) (ver item 4.2.4.1) e o método da radiosidade (radiosity) (ver item 4.2.4.2) associados para a construção das cenas e cálculo do percurso da luz nos ambientes virtuais.

Estes dois métodos são conhecidos em computação gráfica por gerarem imagens realistas. Porém o método da radiosidade proporciona imagens menos realísticas que as produzidas por meio do método do raio traçado. A diferença entre eles durante a simulação é o ponto de partida: o método do raio traçado persegue os raios de luz a partir do olho do espectador até a fonte de luz ou da fonte para o olho espectador. Já o método da radiosidade congela a cena e simula a propagação difusa da luz partindo da fonte. Por desenvolverem capacidades complementares o melhor é associar estes dois métodos no cálculo da iluminação.

Para prever o comportamento das aberturas complexas, dotadas de elementos ópticos estão sendo desenvolvidas ferramentas denominadas de goniômetros virtuais, cuja modelagem matemática utiliza funções bidirecionais de transmissão e reflexão da luz – BTDF e BRDF<sup>13</sup>.

Na tabela abaixo estão listados alguns dos softwares disponíveis para estudos de iluminação:

---

<sup>13</sup> BTDF – Bidirectional Transmittance Distribution Function (Função da Distribuição Bidirecional da Transmitância);  
BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function (Função da Distribuição Bidirecional da Refletância).

Tabela 4. Softwares para estudos de iluminação

<b>SOFTWARE / PLATAFORMA</b>	<b>Desenvolvido por:</b>
ADELIN (IBM – PC/DOS)	Fraunhofer Institute for Buildings – IBP – Suíça
APOLUX (WINDOWS)	ANDERSON CLARO E FERNANDO O. R. PEREIRA no LABCON laboratório de conforto ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina no Departamento de Arquitetura
DAYLIGHT (IBM – PC/DOS)	Department of the Built Environment - Anglia Polytechnic - Inglaterra
DAYSIM (IBM – PC/WINDOWS)	CHRISTOPH REINHART no Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems- Canadá
DeLIGHT (IBM PC/DOS)	Lawrence Berkeley Laboratory California EUA
DESKTOP RADIANCE (IBM – PC/WINDOWS)	GREG WARD no Lawrence Berkeley Laboratory California EUA
DLN (WINDOWS)	PAULO SCARAZATO na Universidade de São Paulo na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.
ECOTECH (IBM – PC/WINDOWS)	SQUARE ONE research PTY LTD - AUS
LIGHTSCAPE (IBM - PC/WINDOWS)	DISCREET – AUTODESK EUA
LUMEM MICRO (IBM – PC)	Lighting Technologies Inc. Colorado EUA
LUX 2.0 (WINDOWS)	MARCIA PEINADO ALUCCI na Universidade de São Paulo na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.
LUZ DO SOL (WINDOWS)	MAURÍCIO RORIZ
RADIANCE (Linux , Mac OSX, SGI)	GREG WARD no Lawrence Berkeley Laboratory California EUA
RAYFRONT (Linux, Mac OSX, Windows)	GEORG MISCHLER - Alemanha
RELUX (IBM – PC/WINDOWS)	INFORMATIK AG Alemanha
SKYVISION (IBM – PC/WINDOWS)	Institute for Research in Construction Canadá
TROPLUX (WINDOWS)	RICARDO CARBUS

Fonte: adaptado de Garrocho (2005).

**CAPÍTULO IV****4.2.4.1 MÉTODO DO RAIOS TRAÇADO (RAY TRACING)**

O método do raio traçado adota a transferência de fluxo não difusa, seguindo cada raio da fonte de emissão até o olho do observador ou fazendo o caminho contrário. Esse método é excelente para calcular as reflexões especulares e transparências, representando superfícies espelhadas e as refrações em objetos transparentes (MOURA 2007). No entanto, não é capaz de calcular a reflexão difusa das superfícies.

Suas vantagens sobre os demais são:

1. Considerar a luz solar direta, seja ela incidente no ponto ou refletida pelas superfícies interiores, avaliando inclusive sistemas de iluminação natural indireta;
2. Considerar a luz refletida por áreas adjacentes ao ambiente analisado e a reflexão de superfícies inclinadas ou com outras formas complexas.

Sua principal desvantagem é a complexidade. As cenas utilizando o ray tracing demoram mais para serem calculadas, e quando se deseja mudar a cena ou criar seqüências de cenas, estas serão recalculadas “pixel” a “pixel”. Porém para obtenção somente dos valores de iluminâncias, os resultados calculados podem ser obtidos mais rapidamente com o tempo variando dependendo da complexidade do modelo.

**4.2.4.2 MÉTODO DA RADIOSIDADE (RADIOSITY)**

O método da radiosidade foi desenvolvido na Cornell University e se configura por transferência de fluxos entre superfícies (ARCHITECTURE, v.85, OCT 1996, p. 177-179), partindo do princípio de que todas as superfícies do ambiente são difusores perfeitos, permite a utilização dos conceitos do fator de forma e do fator de configuração, por meio do método de elementos finitos (MOURA, 2007).

Este método é excelente para o cálculo das inter-reflexões entre as superfícies dos objetos, porém não é capaz de calcular os raios e as reflexões especulares.

A vantagem desse método é o cálculo de um cenário independente da cena, ou seja, uma vez criado o ambiente o meio ambiente pode ser alterado e interagir com a cena (RIBA Journal v106, DEC 1999, p. 56-57).

**CAPÍTULO V**  
**ESTUDO EXPERIMENTAL**



## 5 ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os ensaios realizados. Esses tiveram por objetivo verificar a eficiência luminosa em condutores do tipo duto de luz com seção quadrada espelhados internamente, sob condições artificiais e reais de exposição por meio de modelos físicos em escala real e em escala reduzida. A eficiência dos dutos foi verificada levando em consideração as diferentes seções e comprimentos adotados para as duas escalas e condições de exposição ensaiadas.

### 5.1 SELEÇÃO DO SISTEMA ENSAIADO

O sistema a ser ensaiado foi escolhido com base no levantamento dos sistemas não convencionais para a condução da luz natural, apresentados no capítulo 2 desta dissertação, bem como nas possibilidades de obtenção dos mesmos.

Para tanto foram seguidos os seguintes critérios:

1. Tipo de condutor;
2. Materiais e componentes;
3. Dimensões;
4. Possibilidades e restrições na confecção e obtenção dos materiais;

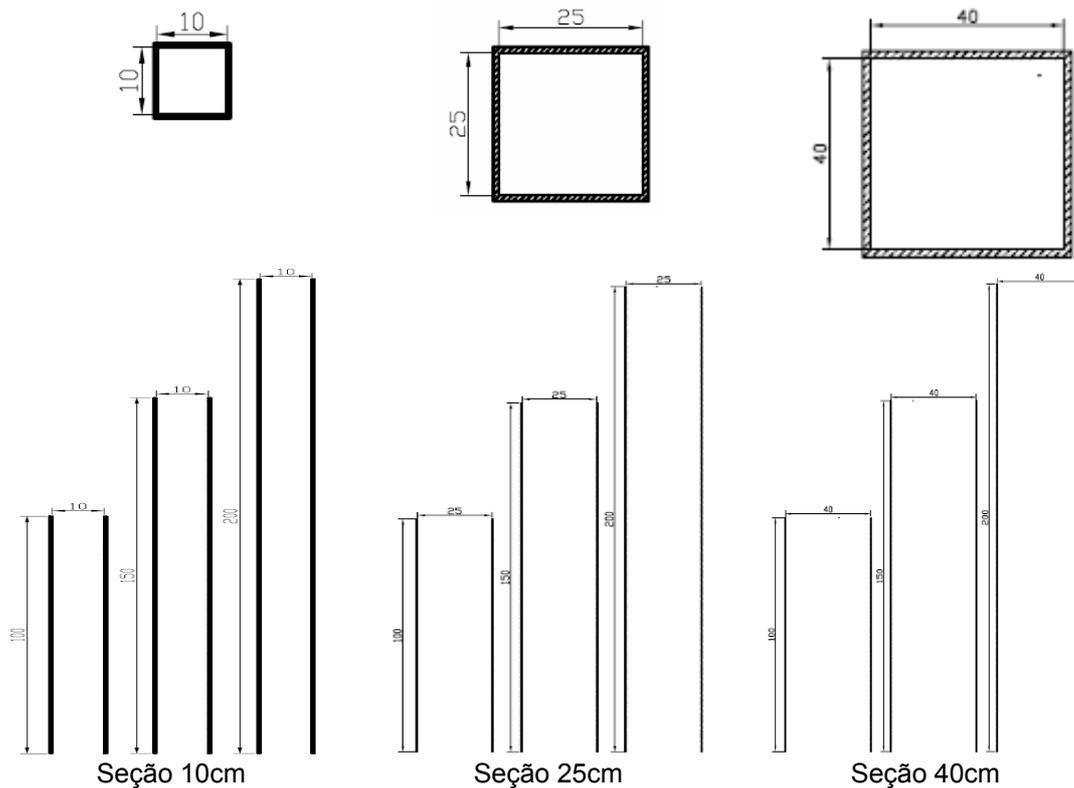
O sistema escolhido para os ensaios realizados foi o duto de luz com seção quadrada revestido internamente por espelhos (ver tabela 5). Considerando as três partes componentes dos sistemas não convencionais de aberturas para captação, condução e difusão da luz (captador, condutor e difusor) e tendo como foco para as análises o elemento condutor, optou-se por não utilizar captadores ou difusores acoplados ao condutor escolhido. No entanto, foi necessária a colocação de um difusor na entrada do duto permitindo a coleta dos dados sem a interferência da radiação direta, desse modo são evitados possíveis erros na aquisição de dados.

**CAPÍTULO V****Tabela 5.** Critérios para escolha do sistema a ensaiado

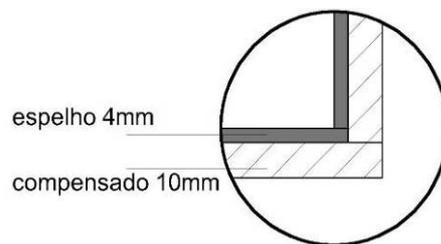
<b>Tipo de condutor:</b>	<b>Duto de Luz:</b> devido à viabilidade e facilidade de aplicação arquitetônica desses elementos no estágio atual da construção civil brasileira e da obtenção dos materiais e componentes necessários além da garantia da mão-de-obra disponível sem adicionais de custos;
<b>Materiais e componentes:</b>	<b>Madeira Compensada:</b> devido à facilidade de manuseio, mão-de-obra qualificada (marceneiros do LAME - Laboratório de Modelos e Ensaio da FAUUSP) e equipamentos disponíveis para a fabricação artesanal; <b>Espelhos Optimirror Plus:</b> espelho de alta qualidade, doados pela CEBRACE e fixados em uma vidraçaria por profissionais especializados. A escolha dos materiais baseou-se em restrições monetárias e da disponibilidade de mão de obra especializada e qualificada para a construção dos dutos;
<b>Dimensões:</b>	<b>Seções 10 cm, 25 cm e 40 cm e Comprimentos de 1m, 1,5m, 2m:</b> Essas dimensões foram adotadas para permitir ensaios comparativos quanto à influência da área de seção com as perdas pela absorção do material reflexivo no interior do duto. A geometria quadra foi adotada para facilitar a construção dos mesmos, pois dutos de seção circular proporcionam inúmeras dificuldades na confecção artesanalmente com qualidade. Os comprimentos foram definidos para proporcionar fácil transporte, estrutura das peças (evitar flambagens e trincas) e manuseio em laboratório durante os ensaios;
<b>Possibilidades e restrições:</b>	<b>FAPESP:</b> os recursos da reserva técnica possibilitaram a aquisição da madeira compensada e dos demais materiais necessários à confecção dos modelos; <b>CEBRACE:</b> doação dos espelhos Optimirror Plus; <b>FAUUSP:</b> mão de obra especializada – marceneiros e equipamentos do LAME - Laboratório de Modelos e Ensaio da FAUUSP;

## 5.2 CONFEÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS

Foram construídos modelos em escala real e em escala reduzida com as dimensões da ilustração 41 e para evitar a entrada de luz pela juntas foi adotado o sistema de encaixe da ilustração 42.



**Ilustração 41.** Dimensão dos dutos construídos



**Ilustração 42.** Detalhe do encaixe do espelho na madeira.

- Modelo em escala real – 9 caixas de madeira compensada com seções quadradas de 10 cm, 25 cm e 40 cm e comprimentos de 1m, 1,5m e 2m espelhadas no lado interno com espelhos Optimirror Plus.

**CAPÍTULO V**

caixa de madeira



dutos espelhados

**Ilustração 43.** Foto dos dutos construídos – modelos em escala real.

- Modelo em escala reduzida - 9 dutos de espelho Optimirro Plus com seções quadradas de 10 cm, 25 cm e 40 cm e comprimentos de 1m, 1,5m e 2m. Estes foram construídos na escala 1:10 e o próprio espelho foi unido com cola apropriada, dispensando mão de obra qualificada. Foram ainda, construídas 9 dutos de mesma escala e dimensão em papel pluma, sendo preto para o exterior e branco internamente (próximo a um difusor perfeito). As juntas do modelo em papel pluma foram reforçadas com fita isolante. A refletância do papel pluma foi medida e o valor encontrado foi de 0,84.



dutos em papel pluma



dutos espelhados



**Ilustração 44.** Foto dos dutos construídos – modelo em escala reduzida.

### 5.3 CONDIÇÃO DE EXPOSIÇÃO

Com os dutos construídos foram realizados ensaios sob condições de céu real e sob condições artificiais de exposição, com o céu artificial retilíneo do LABAUT<sup>14</sup>.

Desse modo, os ensaios foram divididos nos seguintes grupos:

- Grupo 1: ensaio com modelo em escala real sob condição de céu real;
- Grupo 2: ensaio com modelo em escala reduzida sob condição de céu real;
- Grupo 3: ensaio com modelo em escala reduzida sob condições artificiais;

<sup>14</sup> Céu Artificial Retilíneo do LABAUT – Equipamento simulador de condição de céu encoberto construído na iniciação científica da presente aluna com financiamento da FAPESP.

### 5.3.1 Céu Real

Os ensaios sob condições reais de exposição foram realizados nos dias 26/05/2008 das 12:00 as 13:00, 22/04/2009 das 11:00 as 13:00 e 06/05/2009 das 11:00 as 13:00. O céu estava claro nos dias 26/05/2008 e 06/05/2009 e parcialmente encoberto no dia 22/04/2009. Em todos os ensaios havia a presença da radiação direta do sol (Ilustrações 45, 46 e 47).



12:00



13:00

**Ilustração 45.** Foto da condição de céu no dia 26/05/2008



12:00



13:00

**Ilustração 46.** Foto da condição de céu no dia 22/04/2009



12:00



13:00

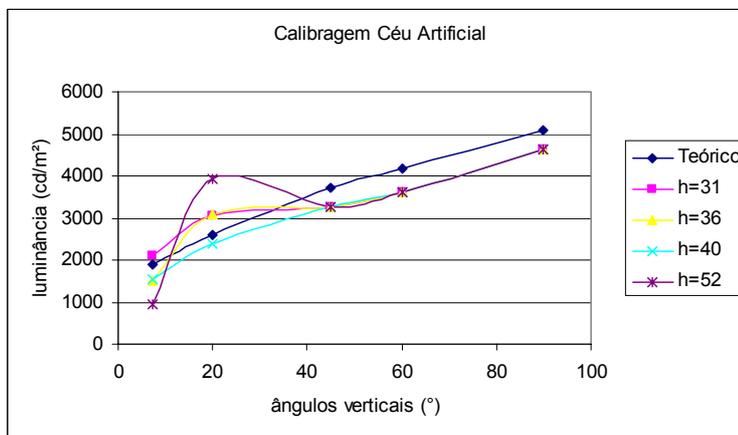
**Ilustração 47.** Foto da condição de céu no dia 06/05/2009

### 5.3.2 Céu Artificial

Com o céu artificial o modelo foi introduzido na caixa espelhada e a altura da fonte foi ajustada para obter distribuição similar a de um céu encoberto, próximo aos valores do céu padrão C.I.E. conforme o gráfico da calibragem do equipamento (Ilustrações 48 e 49)



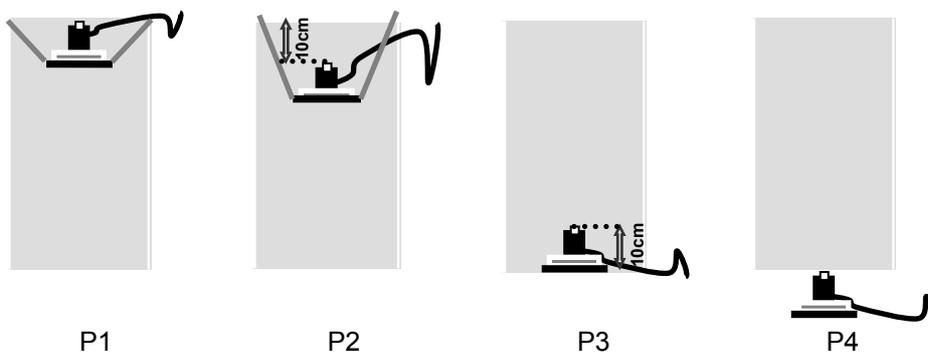
**Ilustração 48.** Foto do equipamento Céu Artificial do LABAUT.



**Ilustração 49.** Gráfico de Calibragem do Equipamento Céu Artificial do LABAUT.

#### 5.4 LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES FOTOELÉTRICOS (LUXIMETRO)

Para os ensaios com modelo em escala real os dados foram coletados em quatro posições distintas P1, P2, P3 e P4 (Ilustração 50). O ponto P4 foi protegido evitando alterações nos valores medidos pela entrada de luz externa ao duto por baixo desse.



**Ilustração 50.** Esquema - Posicionamento dos Luxímetros

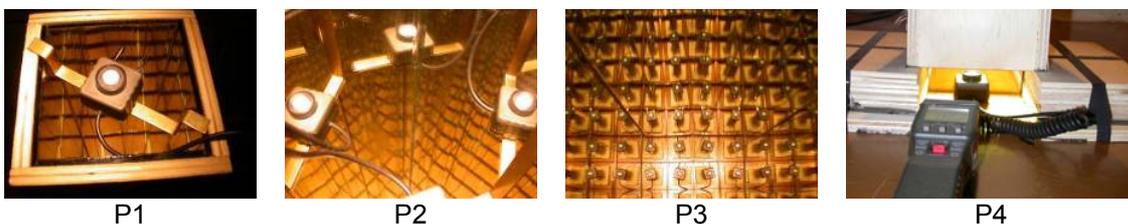
Nos ensaios com modelo em escala reduzida os valores de iluminância foram coletados apenas nas posições P1 e P4 (Ilustração 51), pois não é possível introduzir a caixa do luxímetro que envolve o sensor no interior do duto na escala 1:10.

Nos ensaios do grupo 3 (em céu artificial) visando garantir sempre o mesmo posicionamento do ponto P1 na entrada do duto com relação a distancia da fonte luminosa (plano iluminado do céu artificial) a base do céu artificial foi suspensa mantendo a mesma distancia para todos os comprimentos de dutos. Para a coleta do valor de iluminância no ponto P1 o sensor foi apoiado no topo do duto e para a coleta do ponto P4 o duto foi suspenso e posicionado sobre o sensor no limite da boca de saída do duto.

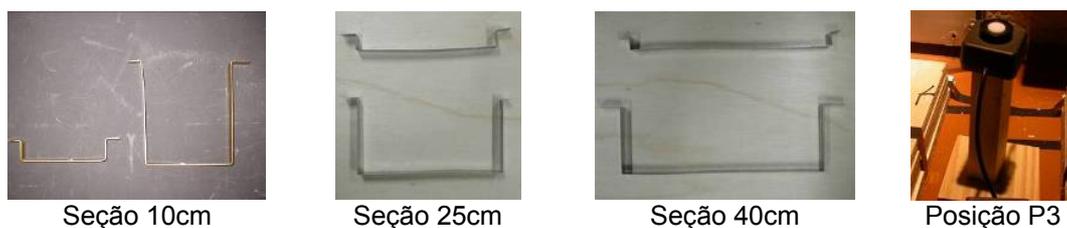


**Ilustração 51.** Esquema - Posicionamento dos Sensores Fotoelétricos

Os sensores foram apoiados nos pontos de medida por meio de suportes confeccionados para garantir a mesma posição e nivelamento em todos os dutos e grupos ensaiados (Ilustrações 52 e 53).



**Ilustração 52.** Foto - Posicionamento dos Luxímetros



**Ilustração 53.** Foto – Suportes para apoio dos luxímetros

**CAPÍTULO V****5.5 TRATAMENTO DOS DADOS**

Com os dados obtidos nos ensaios foi calculado o EDL.

O EDL (Eficiência em Dutos de Luz) é o rendimento ou a eficiência luminosa de determinado duto, ou seja, é porcentagem de luz que chega ao sensor localizado no P4 com relação à disponibilidade de luz na entrada do duto P1 ou num plano horizontal desobstruído considerando uma aplicação real.

$$EDL = \frac{E_4}{E_1} \times 100 \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

E1 é a iluminância no ponto 1

E4 é a iluminância no ponto 4

**5.6 ENSAIOS SOB CONDIÇÕES REAIS**

Foram ensaiados sob condição de céu real os grupos 1 e 2. Estes ensaios visam verificar a eficiência dos dutos em função da área de seção e comprimentos.

**5.6.1 GRUPO 1 – MODELO EM ESCALA REAL**

Objetivo deste ensaio é verificar, para os dutos ensaiados, o efeito da seção e do comprimento na eficiência (EDL) sob céu real.

Estes ensaios foram realizados em 3 dias diferentes, 26/05/2008, 22/04/2009 e 06/05/2009. No ensaio realizado em maio de 2008 foi observado que a luz direta incidia nos dutos formando áreas de luz e sombra em seu interior. A luz emitida pelo duto depende do comprimento deste, ou seja, do número de reflexões internas.

Com essas observações concluiu-se a necessidade de modificar o procedimento de medição, pois dependendo do comprimento do duto e da posição e altura solar a área de sombra gerada na condução é alterada e pode influenciar nos valores dos dados coletados.

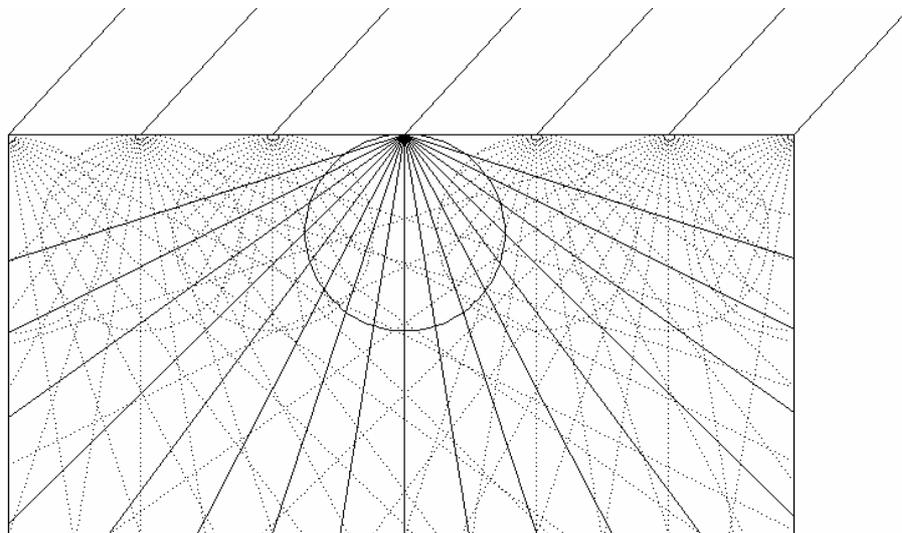
Devido a isto, optou-se por refazer este grupo de ensaios com a colocação de um difusor na entrada do duto, para evitar os vales de sombra e luz direta no interior dos mesmos. Com isto, o comportamento da luz no interior do duto, passa a

ser diferente, ocorre como se este estivesse exposto a condições de céu encoberto, havendo apenas a penetração de luz difusa em seu interior.



**Ilustração 54.** Foto dos dutos construídos – modelos em escala real.

Com o difusor na entrada do duto o comportamento da transmissão luminosa passa a ser semelhante ao esquema da ilustração 55.



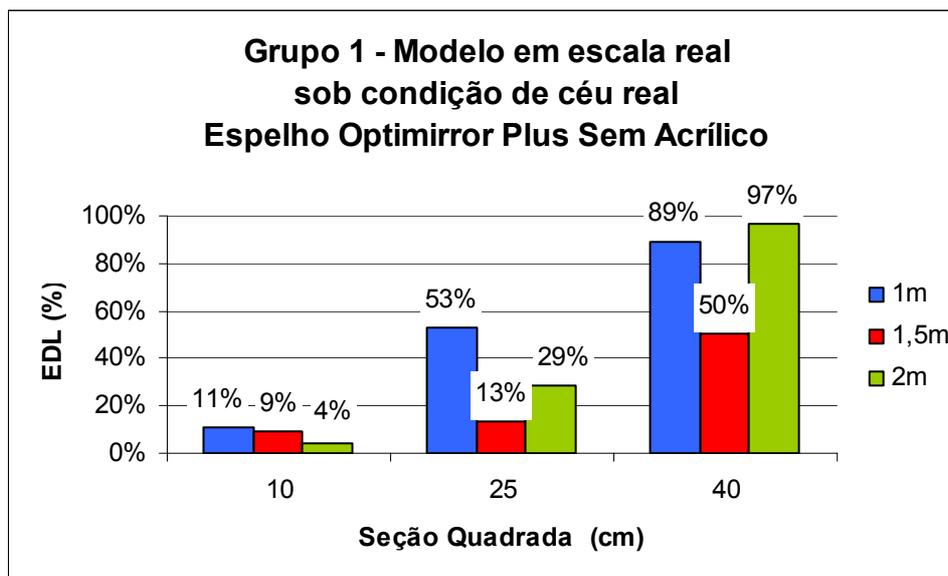
**Ilustração 55.** Esquema do comportamento da transmissão da luz com difusor.

**CAPÍTULO V**

Nesses novos ensaios foi verificado que para seções maiores, obtiveram-se os maiores valores de EDL e os dutos mais compridos apresentaram os menores valores de EDL.

Nota-se ainda que, nos ensaios sem o acrílico, os dados obtidos não são conclusivos, sendo recomendado à utilização de um difusor na entrada, como recurso preventivo, em ensaios sob condições de céu claro ou a realização de ensaios sob condições de céu encoberto, facilitando a aquisição e análise dos dados.

Para ensaios sob condições reais, com penetração de luz solar direta no condutor, necessita-se ainda pesquisar outros procedimentos de coleta dos dados, como por exemplo, o registro fotográfico com posterior conversão das luminâncias registradas.



**Ilustração 56.** Grupo 1 (26/05/2008) – EDL – sem acrílico.

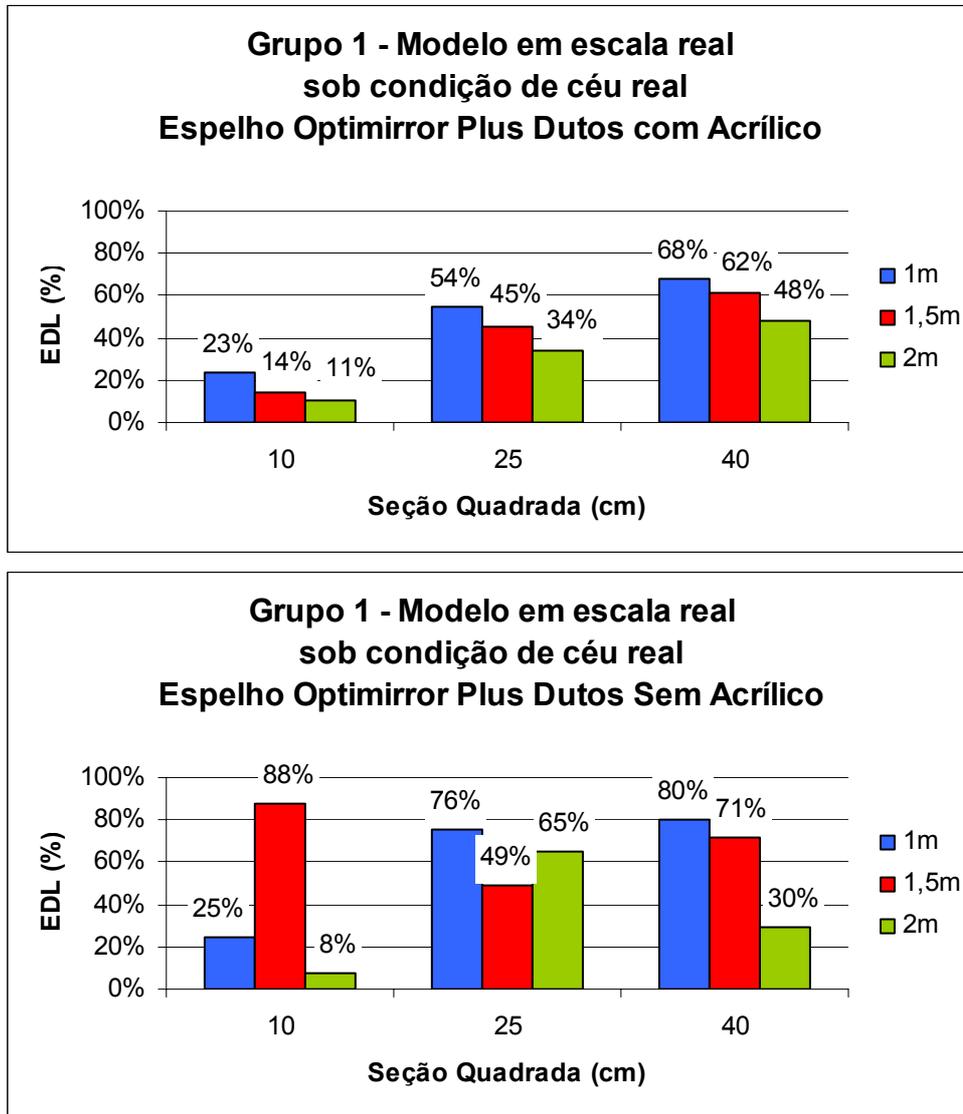


Ilustração 57. Grupo 1 (22/04/2009 e 06/05/2009) – EDL – com e sem acrílico.

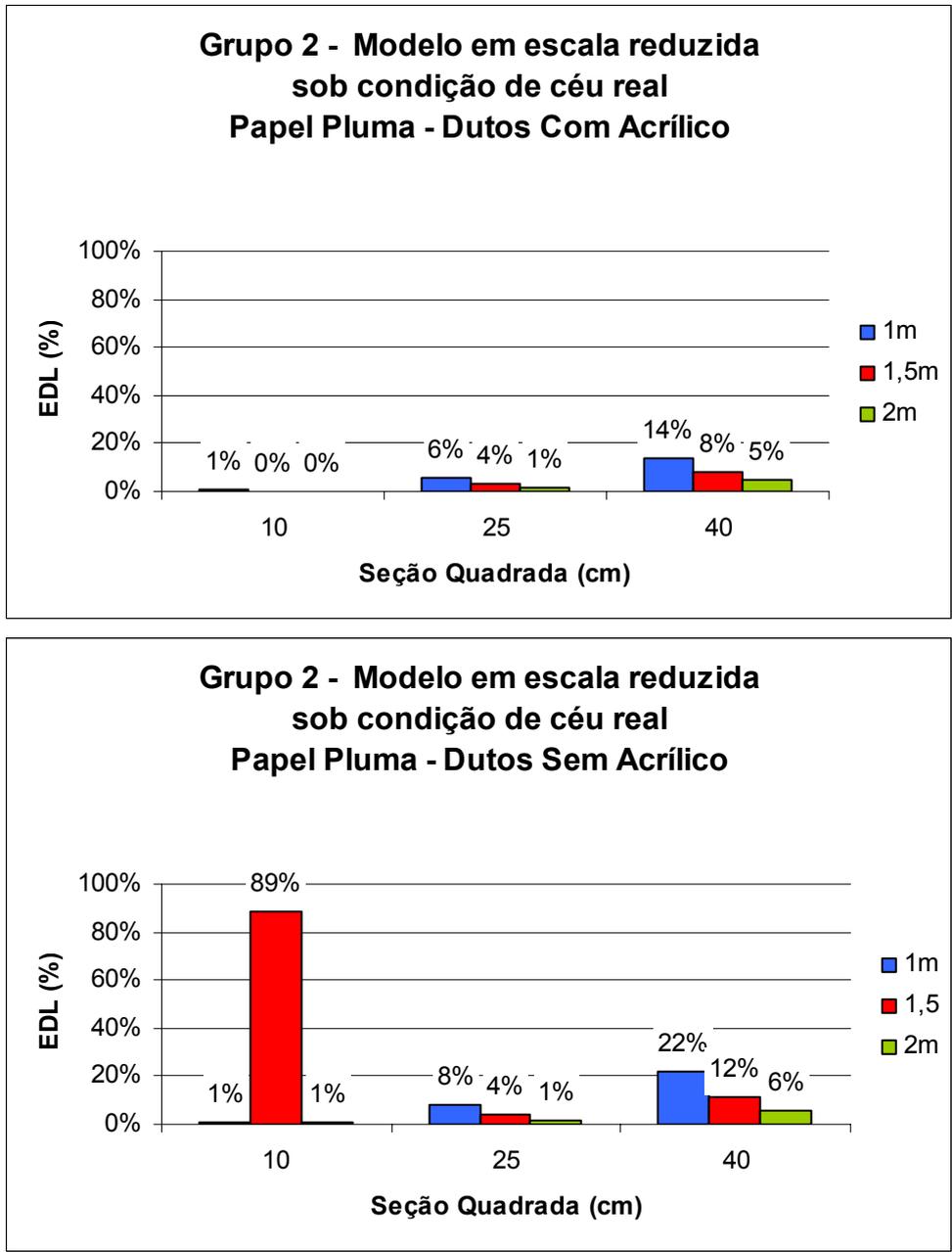
### 5.6.2 GRUPO 2 – MODELOS EM ESCALA REDUZIDA

O objetivo deste ensaio é comparar a eficiência em dutos solares (EDL) sob condições de céu real, por meio de modelos em escala reduzida, variando a refletância interna (duto em papel pluma e duto em espelho Optimirror Plus).

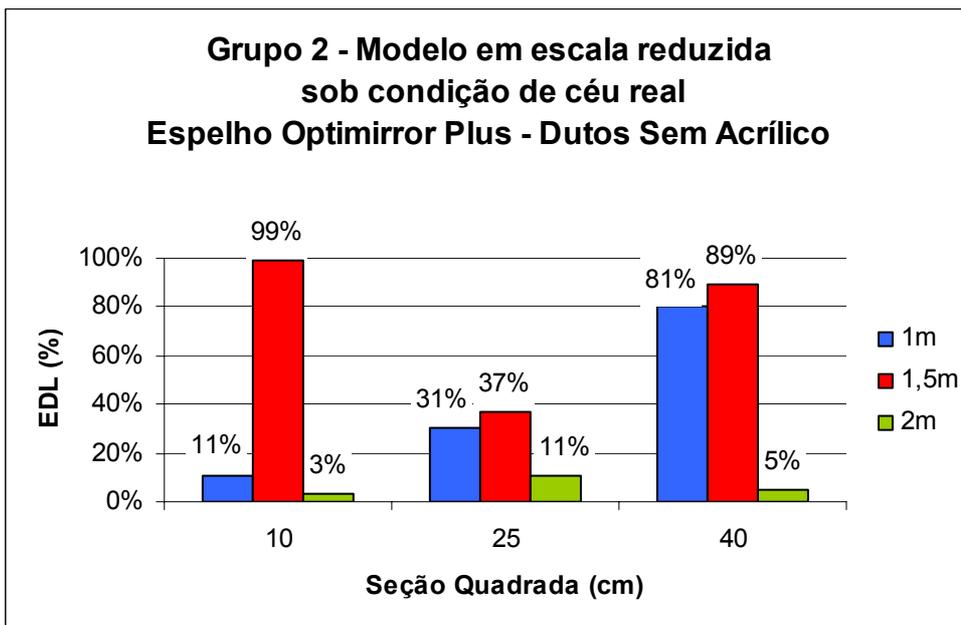
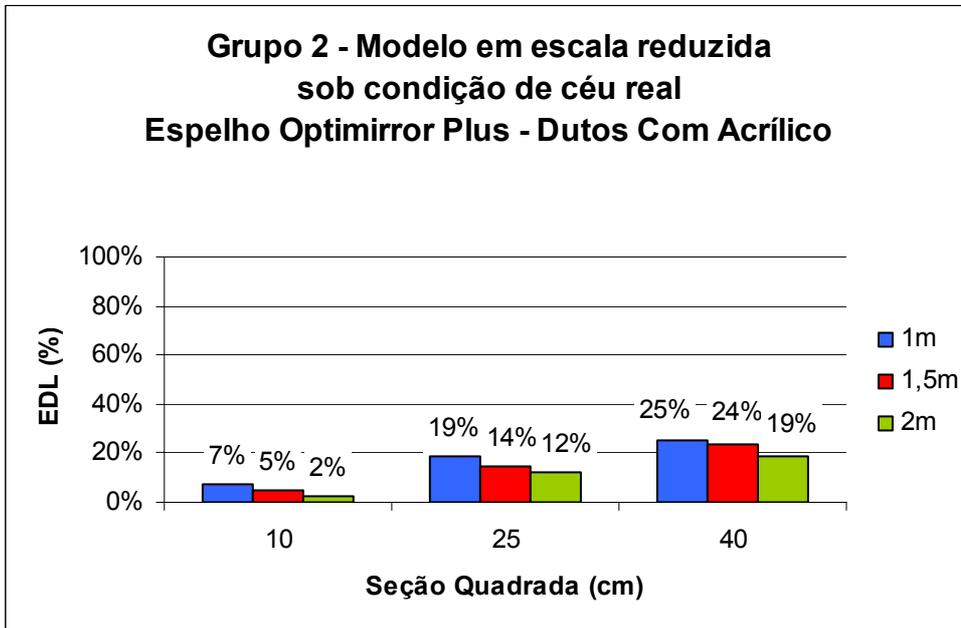
Esse ensaio foi realizado sob condições de exposição reais, no dia 06/05/2009, com céu claro. Foram ensaiados dutos de papel pluma (difusor) com dutos de espelho Optimirror Plus (refletor), para comparar os resultados com a penetração da radiação direta do sol e sem esta, foram tomadas medidas nos dutos com e sem

**CAPÍTULO V**

a colocação de uma peça em acrílico leitoso (com comportamento semelhante a um difusor perfeito) na entrada superior dos mesmos.



**Ilustração 58.** Grupo 2 – EDL – Pluma – com e sem acrílico.



**Ilustração 59.** Grupo 2 – EDL – Optimirror Plus – com e sem acrílico.

Desse modo foi observado que os dutos com acrílico tanto em papel pluma como em espelho Optimirror Plus apresentaram melhores resultados de eficiência para seções maiores e comprimentos menores. Já para os dutos sem acrílico na entrada, os resultados obtidos não são conclusivos, apresentando picos de luminosidade.

Quanto à comparação entre o material de revestimento interno, os dutos em espelho Optimirror Plus apresentaram valores de EDL superiores aos valores

**CAPÍTULO V**

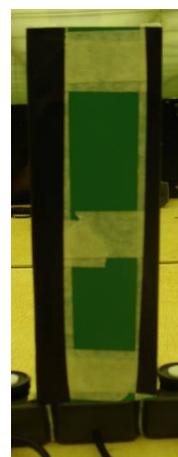
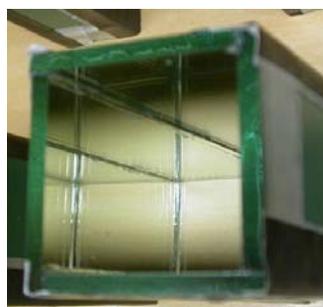
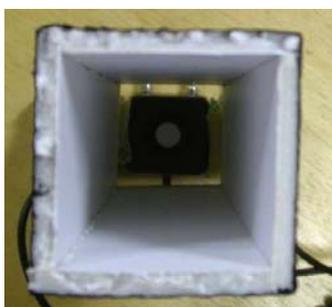
obtidos com os dutos em papel pluma tanto com acrílico na entrada como sem este, exceto para o duto de 2m de comprimento com seção quadrada de 40cm sem o acrílico na entrada.

**5.7 ENSAIOS SOB CONDIÇÕES ARTIFICIAIS (CÉU ARTIFICIAL)**

Em ensaios sob condições artificiais de exposição, a aquisição dos dados é facilitada pela constância da fonte de luz que não sofre os efeitos da sazonalidade diária e anual. Ensaios desse tipo podem ser realizados por um único operador em curto espaço de tempo. Com o ensaio do grupo 3 no céu artificial do LABAUT foi possível coletar dados de iluminância sob condições controladas, os quais serão comparados com os dados obtidos sob condições reais nos ensaios dos grupos 1 e 2 (ver item 5.8).

**5.7.1 GRUPO 3 – MODELO EM ESCALA REDUZIDA**

O objetivo deste ensaio é comparar a eficiência em dutos solares (EDL) sob condições de céu encoberto, por meio de modelos em escala reduzida, variando a refletância interna (duto em papel pluma e duto em espelho Optimirror Plus).



dutos em papel pluma

dutos espelhados

**Ilustração 60.** Foto dos dutos construídos – modelo em escala reduzida.

Os dutos em material refletor tiveram eficiência superior aos dutos em material difusor. A eficiência (EDL) aumentou com o aumento da seção e diminuiu com o aumento do comprimento. Desse modo, a principal conclusão deste ensaio é que o céu artificial retilíneo é uma ferramenta adequada para estudo de dutos de luz com modelos em escala reduzida.

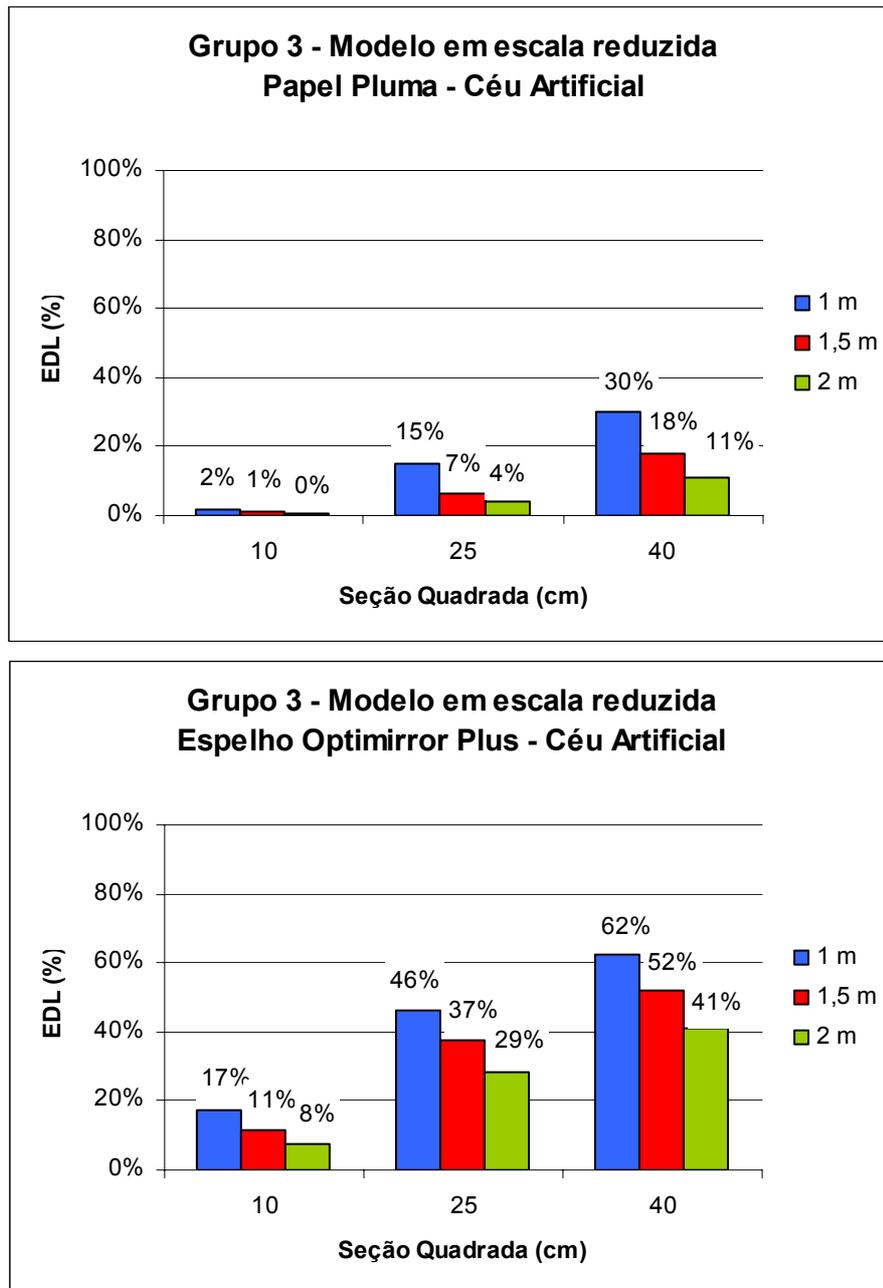


Ilustração 61. Grupo 3 – EDL – Pluma e Optimirror Plus.

**CAPÍTULO V****5.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS**

Este item apresenta a comparação entre os grupos ensaiados. A análise de dados empíricos é complexa devida as variáveis envolvidas no processo de coleta e no procedimento adotado para o ensaio. Existem diversas maneiras para comparar e extrair conclusões, no entanto as correlações evidenciam similaridades e diferenças relevantes para a compreensão dos fenômenos e avanços nas pesquisas, contribuindo para aprimorar os procedimentos de ensaio e validar as ferramentas adotadas.

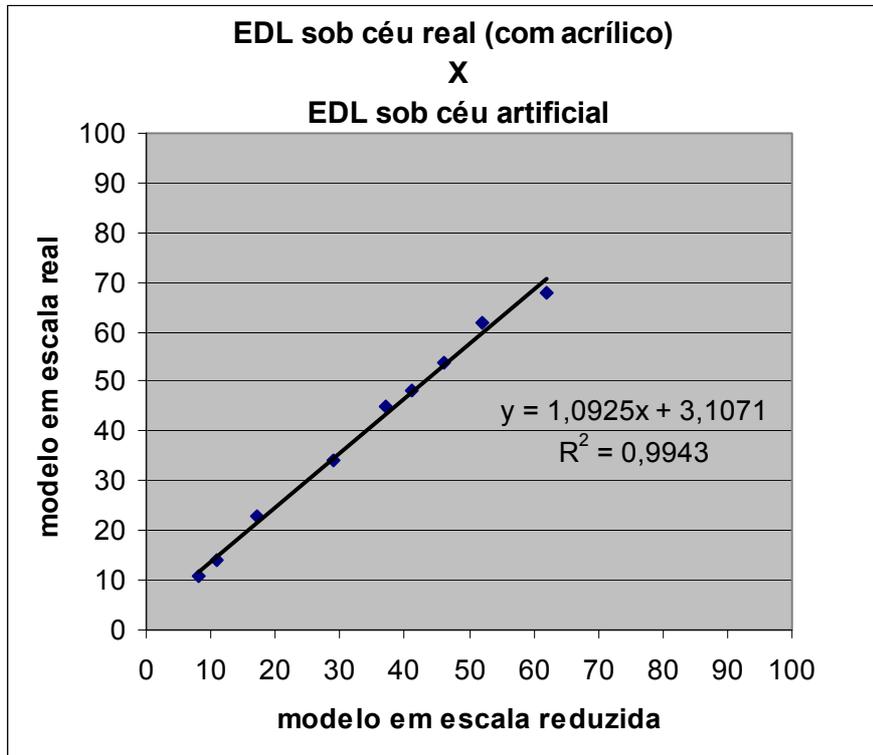
**5.8.1 CORRELAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO**

Esta comparação tem o objetivo de verificar se o desempenho dos dutos ensaiados sob condições de céu real é próximo ou tem alguma correlação com o desempenho dos mesmos quando ensaiados sob condições artificiais, no céu artificial com condição de céu encoberto. Para tanto foram correlacionados os resultados dos ensaios do grupo 1 – modelo em escala real sob céu real com os resultados do grupo 3 – modelo em escala reduzida no céu artificial. Foram ainda correlacionados os resultados do grupo 2 – modelos em escala reduzida sob céu real com os resultados do grupo 3 – modelos em escala reduzida no céu artificial, confirmando o potencial da ferramenta céu artificial do LABAUT para simulações de dutos de luz com modelos em escala reduzida, na escala 1:10.

**Tabela 6.** Comparação Grupo 1 e 3

Comprimento	EDL					
	Seção Quadrada (cm)					
	Modelos em escala reduzida Céu Artificial			Modelos em escala real Céu Real		
				Com Acrílico		
	10	25	40	10	25	40
1m	17%	46%	62%	23%	54%	68%
1,5m	11%	35%	52%	14%	45%	62%
2m	8%	29%	41%	11%	34%	48%

Com o gráfico a seguir, foi verificada a correlação existente (99%) entre os resultados obtidos no ensaio com o céu artificial e os resultados obtidos no ensaio sob céu real.

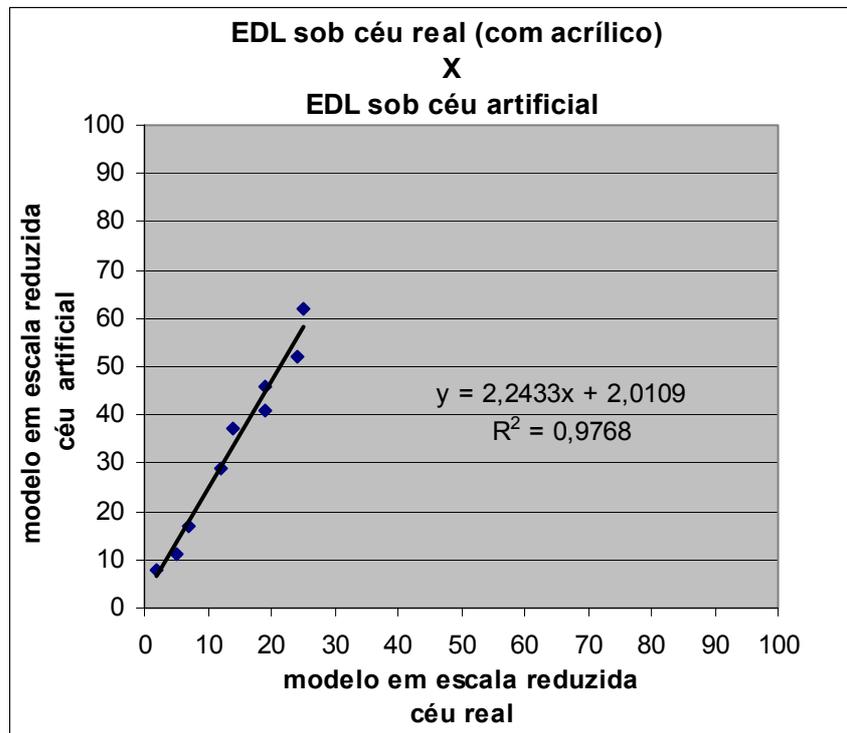


**Ilustração 62.** Correlação entre os valores de EDL dos grupos 1 e 3..

A comparação entre os grupos 2 e 3 reforça as conclusões obtidas por meio da comparação entre os grupos 1 e 3, pois o grupo 2 corresponde aos ensaios sob condição de céu real com modelo em escala reduzida, contribuindo para a validação dos resultados obtidos no ensaio do grupo 3, com o céu artificial.

**Tabela 7.** Comparação Grupo 2 e 3

Comprimento	EDL					
	Seção Quadrada (cm)					
	Modelos em escala reduzida Céu Artificial			Modelos em escala real Céu Real		
				Com Acrílico		
	10	25	40	10	25	40
1m	17%	46%	62%	7%	19%	25%
1,5m	11%	35%	52%	5%	14%	24%
2m	8%	29%	41%	2%	12%	19%



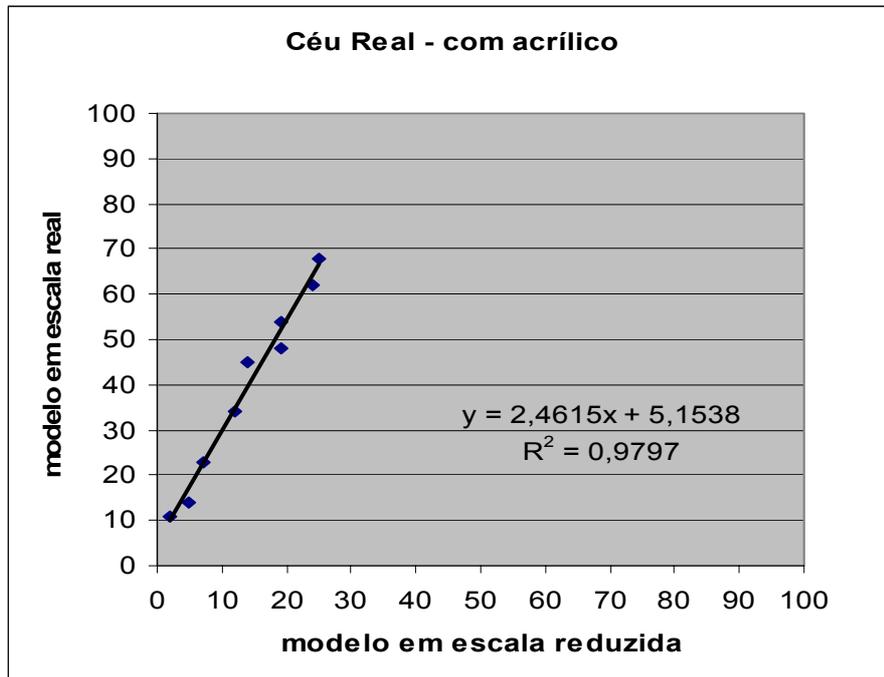
**Ilustração 63.** Correlação entre os valores de EDL dos grupos 2 e 3..

Desse modo, a partir da correlação existente entre as fontes ensaiadas (céu real e céu artificial), a principal conclusão obtida com essas comparações foi que o equipamento céu artificial do LABAUT é uma ferramenta adequada para estudos preditivos de eficiência luminosa em dutos de luz.

### 5.8.2 CORRELAÇÃO ENTRE AS ESCALA DOS MODELOS

A comparação entre o grupo 1 e 2 tem por objetivo verificar a correlação existente entre ensaios com modelos em escala real com ensaios utilizando modelos em escala reduzida sob condições de céu real.

Com o gráfico apresentado na ilustração 64, torna-se claro a correspondência entre os ensaios com modelos em escala real e reduzida (97%), confirmando a viabilidade de realizar ensaios de dutos de luz utilizando maquetes. No entanto recomenda-se a utilização do difusor na entrada do duto, quando exposto a condição de céu claro ou parcialmente encoberto, lembrando que este último não é recomendado para ensaios, devida as constantes variações da luminosidade disponível, o que prejudica a análise dos resultados.



**Ilustração 64.** Correlação entre os valores de EDL dos grupos 1 e 2.

### 5.8.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com os ensaios realizados utilizando fontes artificiais e por meio da comparação destes com os ensaios sob condições reais de exposição conclui-se que:

- O céu artificial retilíneo é uma ferramenta eficaz no estudo com modelos em escala reduzida para a predição da iluminação natural obtida por meio de dutos condutores de luz com seção quadrada.

Ensaio sob condições reais de exposição apresentam inúmeras dificuldades. No entanto, os levantamentos realizados nessas condições possibilitaram:

- Verificar a correspondência com os resultados obtidos por meio de ensaios sob condições artificiais de exposição (céu artificial);
- Verificar a correspondência entre os resultados obtidos com a utilização de modelos em escalas real e reduzida;
- Observar o comportamento da luz natural ao ser conduzida por dutos espelhados;

Desse modo, foram fundamentais para a compreensão e caracterização do sistema estudado.



**CAPÍTULO VI**  
**MODELO PREDITIVO**  
**DE EFICIÊNCIA LUMINOSA EM DUTOS**



## 6 MODELO PREDITIVO DE EFICIÊNCIA LUMINOSA EM DUTOS

Neste capítulo está apresentada uma proposta de modelagem matemática para o cálculo do EDL (Eficiência em Dutos de Luz). Para esta foram considerados os dutos com difusor na entrada, ou seja, eliminando a radiação direta do sol. Desse modo, os fenômenos envolvidos na condução da luz são relativos à condição de céu encoberto e aplicáveis ao comportamento da luz difusa.

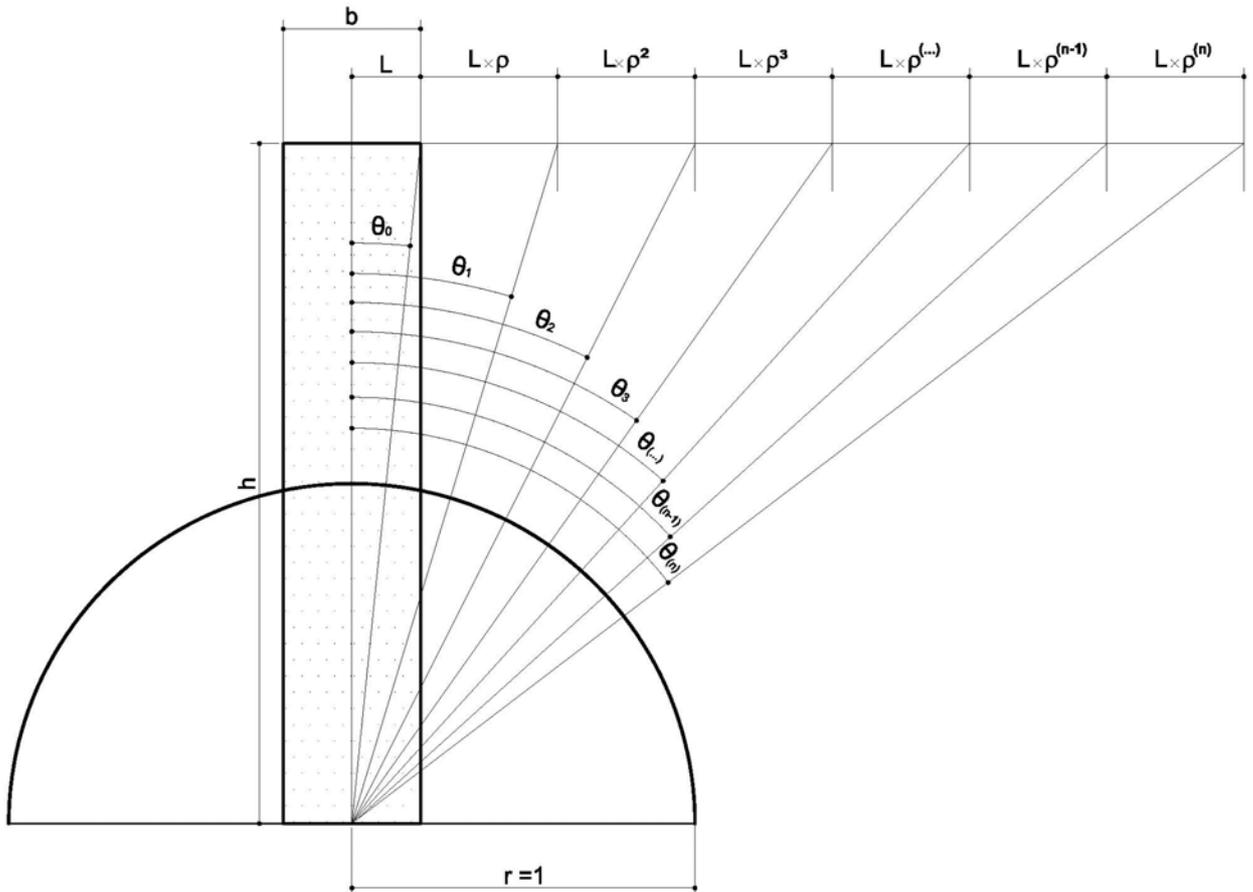
O modelo matemático MPELD (modelo preditivo de eficiência luminosa em dutos) foi baseado no princípio do ângulo sólido projetado ou conceito do hemisfério unitário (ver item 3.3.6). Este considera que a luz ao entrar no sistema (duto condutor de luz espelhado internamente com seção quadrada) foi emitida por uma fonte cujas características são as de um difusor próximo ao “difusor perfeito” (ver item 3.1.6.2). Essa fonte pode ser um céu encoberto ou pode ser um material difusor acoplado à entrada do duto condutor, como foi adotado o acrílico leitoso para o estudo experimental apresentado no capítulo 5.

O acrílico leitoso na seção de entrada dos dutos configura um plano iluminado, que por meio de diversas reflexões nos espelhos internos ao duto, reproduz um hemisfério iluminado como ocorre com o céu artificial retilíneo do tipo caixa espelhada (ver item 3.4.2.1).

Considerando isto, este método calcula o valor do EDL, ou seja, a relação entre a disponibilidade de luz no plano horizontal da entrada com a obtida no ponto central da seção de saída do duto, considerando o plano horizontal da entrada desobstruído.

Para tanto, foi considerada a área de entrada do duto de luz como um plano emissor, cuja luminância deste, bem como de suas imagens refletidas nos espelhos, são projetadas no hemisfério unitário, ou seja, transporta-se a luminância da seção de entrada e de suas reflexões nos espelhos do duto para o hemisfério unitário.

**CAPÍTULO VI**



**Ilustração 65.** Luminâncias projetadas no hemisfério unitário

As luminâncias projetadas no hemisfério unitário estão dentro de ângulos sólidos e formam com o eixo vertical central ao duto ângulos  $\theta_i$ , os quais são os vértices dos triângulos retângulos cuja base é o segmento  $[(b \times i) + b/2]$  (onde  $b$  a largura da seção de entrada do duto) e a altura é a dimensão  $h$  (comprimento do duto). O valor do ângulo  $\theta_i$  é encontrado por meio do arco tangente, conforme a equação 29 a seguir:

$$\theta_i = \text{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

$i$  é o número de reflexões do plano iluminado no interior do duto de luz ou o número de imagens, desse plano, projetadas no hemisfério unitário;

$b$  é a largura da seção do duto;

$h$  é o comprimento do duto;

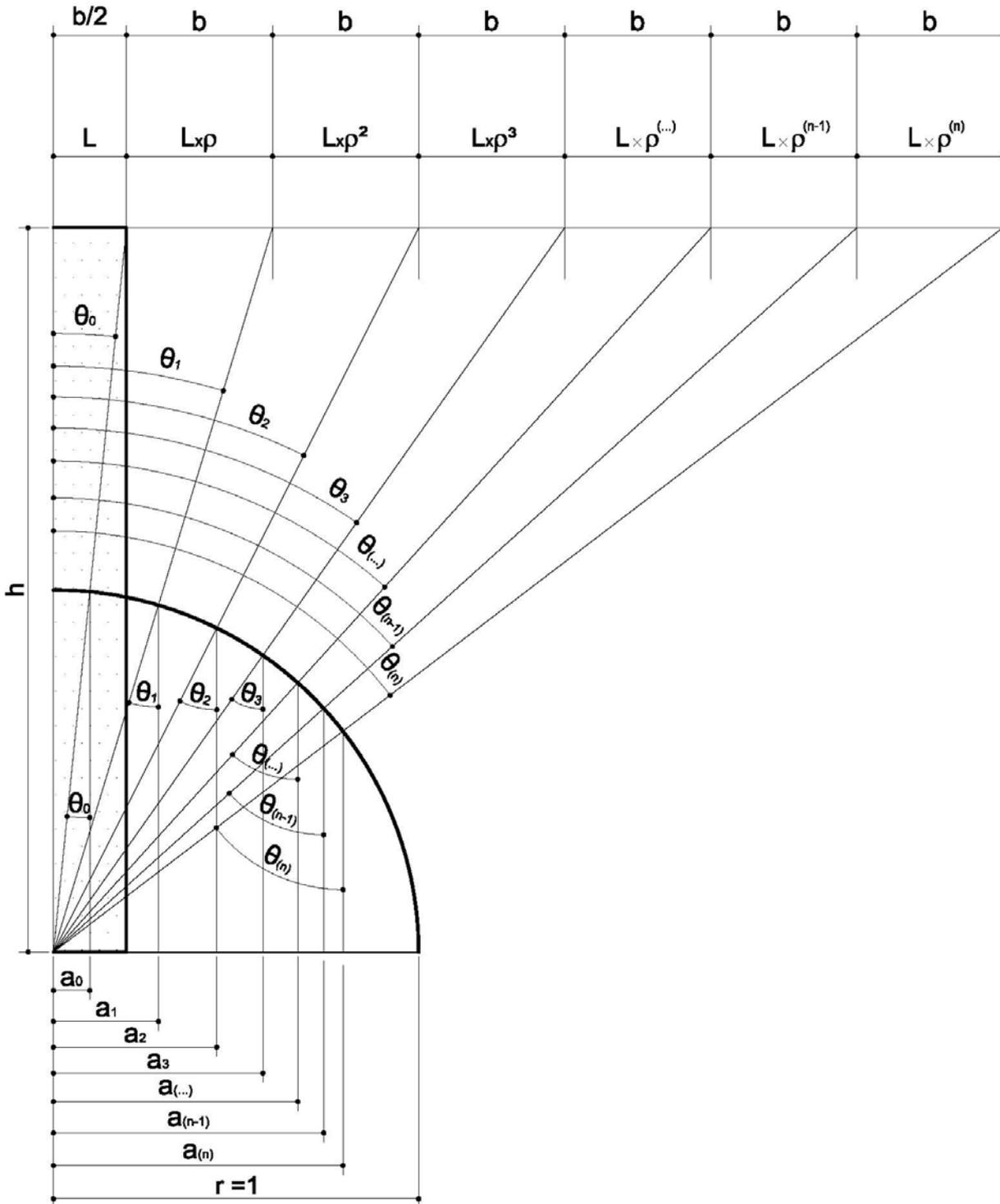


Ilustração 66. Luminâncias projetadas no hemisfério unitário

**CAPÍTULO VI**

As luminâncias projetadas no hemisfério unitário geram setores circulares na base desse hemisfério, cujas áreas ( $A_i$ ) (coroas de circunferências) são definidas segundo as equações 30 e 31 a seguir:

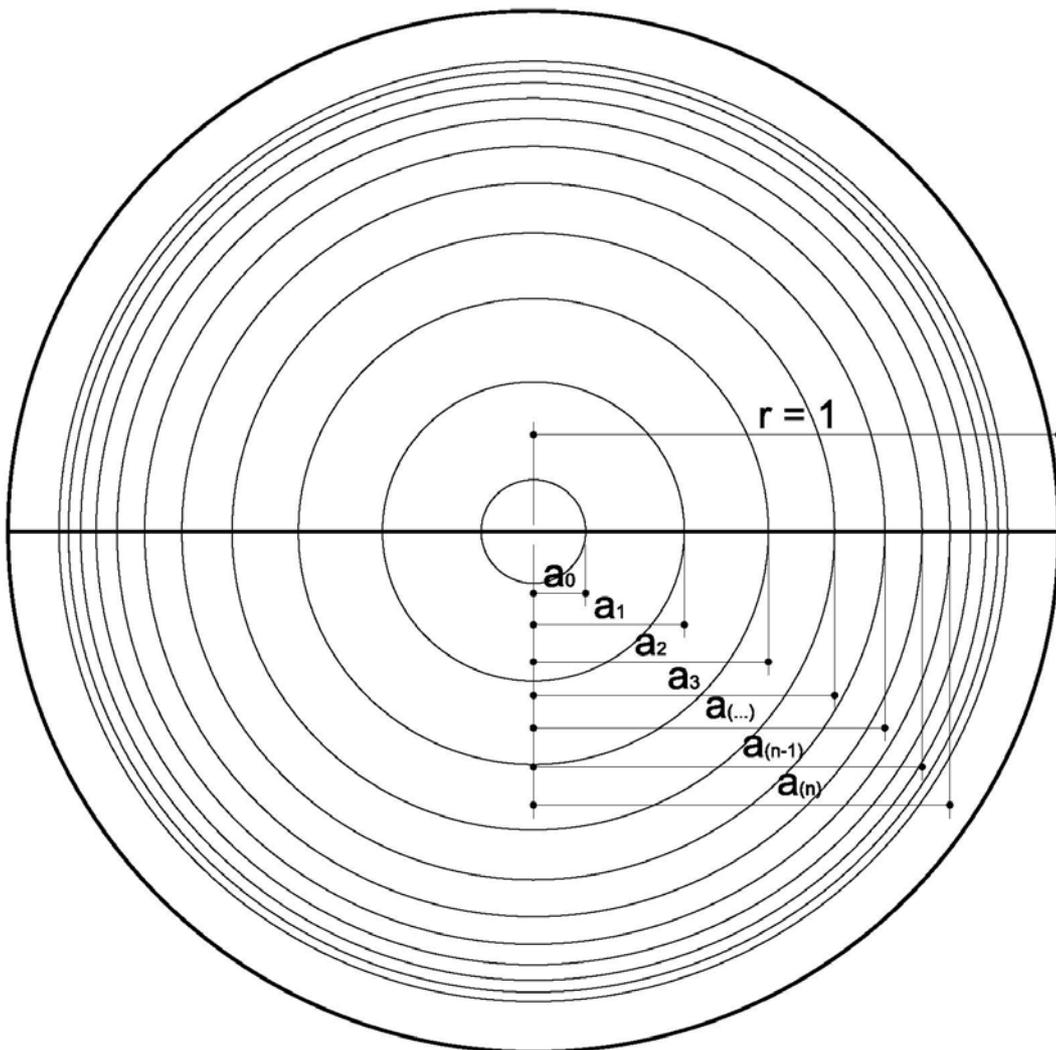
$$a_i = \text{sen} \theta_i \quad \text{Equação 30}$$

$$A_i = (a_i^2 - a_{i-1}^2) \cdot \pi \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

$A_i$  é a área aparente da coroa circular;

$a_i$  e  $a_{i-1}$  são os raios das circunferências concêntricas formadas pela projeção das luminâncias;



**Ilustração 67.** Coroas circulares

**Bruna Luz**

MESTRADO FAUUSP

A iluminância  $E_i$  é à parcela de contribuição de cada coroa circular. O somatório de  $E_i$  para todas as coroas corresponde a iluminância obtida na seção de saída do duto, ou seja, no ponto central do hemisfério de raio unitário.  $E_i$  é obtida por meio da equação 32.

$$E_i = A_i \cdot L_0 \cdot \rho^i \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

$E_i$  é a iluminância de cada coroa circular;

$A_i$  é a área da coroa circular;

$L_0$  é a luminância na entrada do duto;

$\rho$  é a refletância interna ao duto;

Desse modo, com as quatro equações anteriores 29, 30, 31 e 32 obtêm-se o valor de EDL (equação 33):

$$EDL = \frac{E_p}{E_{ext}} = \frac{\sum_{i=0}^n E_i}{\pi \cdot L_0} \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

EDL é a eficiência em dutos de luz;

$E_p$  é a iluminância na saída do duto;

$E_{ext}$  é a iluminância disponível no plano horizontal desobstruído;

$E_i$  é a iluminância de cada coroa circular;

$L_0$  é a luminância na entrada do duto;

$n$  é o número de reflexões do plano emissor, consideradas e incluídas no somatório;

**CAPÍTULO VI**

Assim, com a síntese das anteriores, por meio das substituições a seguir, obtém-se a equação 39.

Substituindo a equação 29 na equação 30:

$$a_i = \text{sen} \cdot \text{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \quad \text{Equação 34}$$

Substituindo a equação 34 na equação 31:

- Para  $i = 0$ ;

$$A_0 = \text{sen}^2 \cdot \text{atg} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h} \right) \cdot \pi \quad \text{Equação 35}$$

- Para  $i > 0$ ;

$$A_i = \left\{ \text{sen}^2 \cdot \text{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] - \text{sen}^2 \cdot \text{atg} \left[ \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \right\} \cdot \pi \quad \text{Equação 36}$$

Substituindo as equações 35 e 36 na equação 32:

- Para  $i = 0$ ;

$$E_0 = \text{sen}^2 \cdot \text{atg} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h} \right) \cdot \pi \cdot L_0 \cdot \rho^0 \quad \text{Equação 37}$$

- Para  $i > 0$ ;

$$E_i = \left\{ \text{sen}^2 \cdot \text{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] - \text{sen}^2 \cdot \text{atg} \left[ \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \right\} \cdot \pi \cdot L_0 \cdot \rho^i \quad \text{Equação 38}$$

Substituindo as equações 37 e 38 na equação 33:

$$EDL = \text{sen}^2 \cdot \text{atg}\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h}\right) + \sum_{i=1}^n \left\{ \text{sen}^2 \cdot \text{atg}\left[\left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{b}{h}\right] - \text{sen}^2 \cdot \text{atg}\left[\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{b}{h}\right] \right\} \cdot \rho^i \quad \text{Equação 39}$$

Onde:

n é o número de reflexões do plano emissor, consideradas e incluídas no somatório;

Os valores absolutos de EDL (eficiência em dutos de luz) obtido por meio da equação 39 devem ser multiplicados por 100 para serem utilizados em porcentagem, assim como ocorre com o fator de luz diurna (FLD), esse valor percentual é a relação entre a disponibilidade de luz no plano horizontal desobstruído e a quantidade obtida após ser conduzida pelo duto de luz.

## 6.1 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS MEDIDOS

Para a comparação dos resultados calculados com o MPELD com os resultados obtidos no estudo experimental (ver capítulo 5) foi adotado o  $n = 30$ , ou seja, com  $i$  variando de 1 a 30. Desse modo foram consideradas 30 reflexões do plano iluminado projetadas no hemisfério unitário.

Foi arbitrado o  $n=30$  para esta comparação após as seguintes verificações:

- Com  $i=30$  o seno  $\theta$  é igual a 0,99, o que resulta em uma área de coroa circular menor que 0,01. Desse modo se for considerado a área total de contribuição, obteremos 3,12 m<sup>2</sup>, ou seja, 99% da projeção total da hemisfera de raio unitário.
- Inserindo a equação 39 no Excel foi possível comparar o resultado entre  $i=30$  e  $i=65535$  (limite de linhas disponíveis no Excel, deixando uma linha para a luminância direta vinda da entrada do duto) não havendo diferença até a quarta casa decimal.

Com MPELD foram calculados os valores de EDL para as mesmas dimensões dos dutos utilizados no estudo experimental, a refletância foi variada de 0,99 a 0,80, pois o fabricante dos espelhos Optimirror Plus (utilizados no estudo experimental) não fornece a refletância dos espelhos, apenas assegura que esta é

**CAPÍTULO VI**

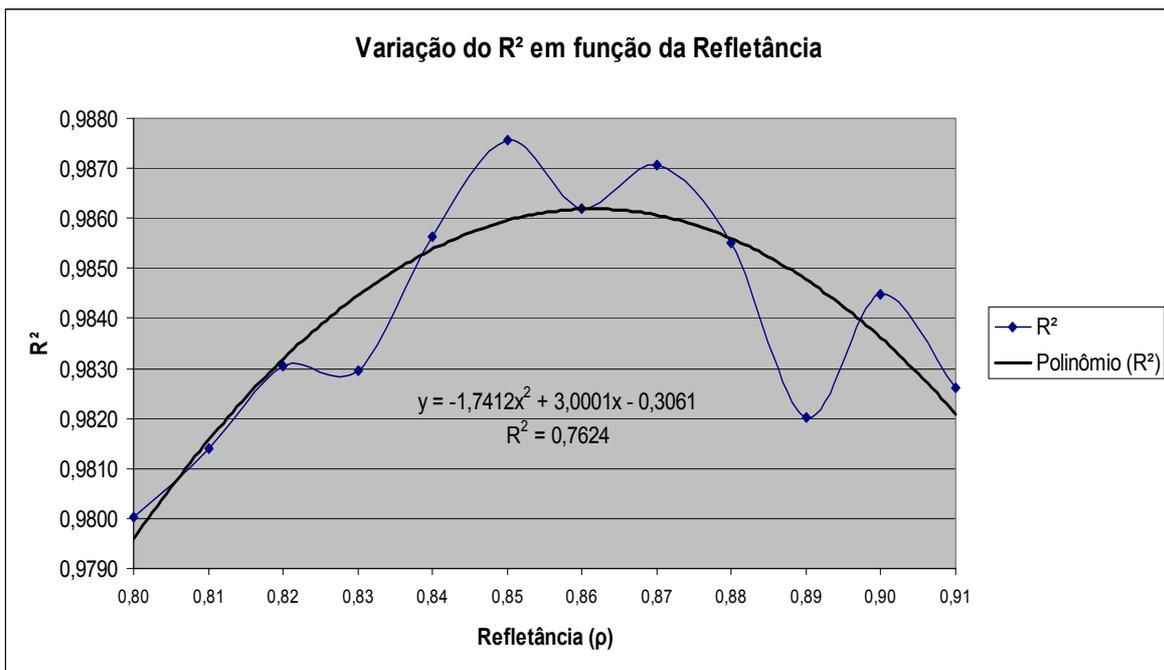
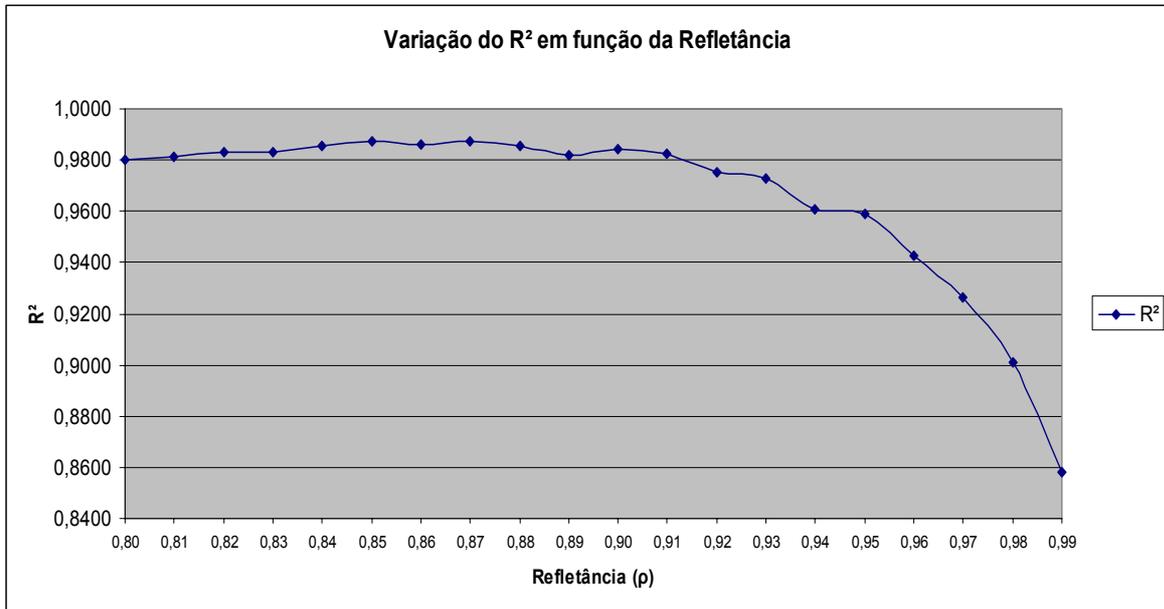
superior a 0,80, justificando que a ABNT exige do fabricante a garantia do mínimo de refletância igual ou superior a 0,80 para espelhos de alta qualidade no processo de sedimentação da prata.

Dos resultados calculados por meio do MPELD com as refletâncias variando de 0,80 a 0,99 foram correlacionados os obtidos com as refletâncias entre 0,80 e 0,90, devido a maior proximidade com os resultados obtidos nos ensaios de campo.

**Tabela 8.** Correlação entre valores medidos e calculados ( $\rho=0,80$  a  $\rho=0,90$ ).

escala real		EDL (%)											
b	h	medido	calculado										
			$\rho=0,80$	$\rho=0,81$	$\rho=0,82$	$\rho=0,83$	$\rho=0,84$	$\rho=0,85$	$\rho=0,86$	$\rho=0,87$	$\rho=0,88$	$\rho=0,89$	$\rho=0,90$
10	100	23	18	19	20	22	23	25	27	29	31	34	36
	150	14	11	12	13	14	15	16	18	19	21	23	25
	200	11	7	8	8	9	10	11	12	14	15	17	19
25	100	54	41	43	44	46	48	50	52	54	56	59	61
	150	45	30	32	33	35	37	39	41	43	45	48	51
	200	34	23	24	26	27	29	31	33	35	37	40	43
40	100	68	54	56	57	59	61	62	64	66	68	70	72
	150	62	43	45	46	48	50	52	54	56	58	60	63
	200	48	35	36	38	40	42	44	46	48	50	53	56
r <sup>2</sup>			0,9800	0,9814	0,9831	0,9829	0,9856	0,9876	0,9862	0,9871	0,9855	0,9820	0,9845

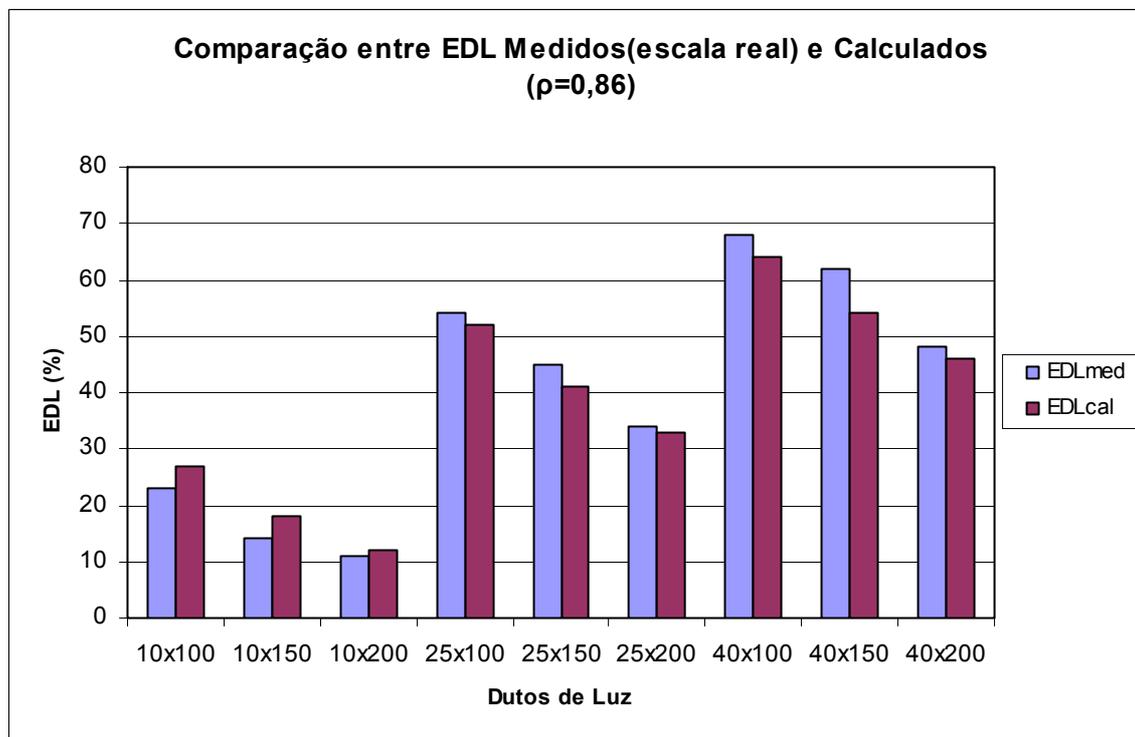
Todas as correlações apresentaram R<sup>2</sup> superior a 0,98. O EDL calculado com  $\rho=0,85$  apresenta o maior 0,9876, no entanto, analisando os resultados obtidos e por meio da curva de tendência traçada no gráfico da ilustração 68 conclui-se que a refletância dos espelhos utilizados nos ensaios está entre 0,85 e 0,87, sendo provavelmente 0,86.



**Ilustração 68.** Varição do R<sup>2</sup> em função da refletância.

Os valores de EDL medidos e calculados não apenas têm correlação alta, mas também apresentam valores absolutos próximos como mostra o gráfico da ilustração 69.

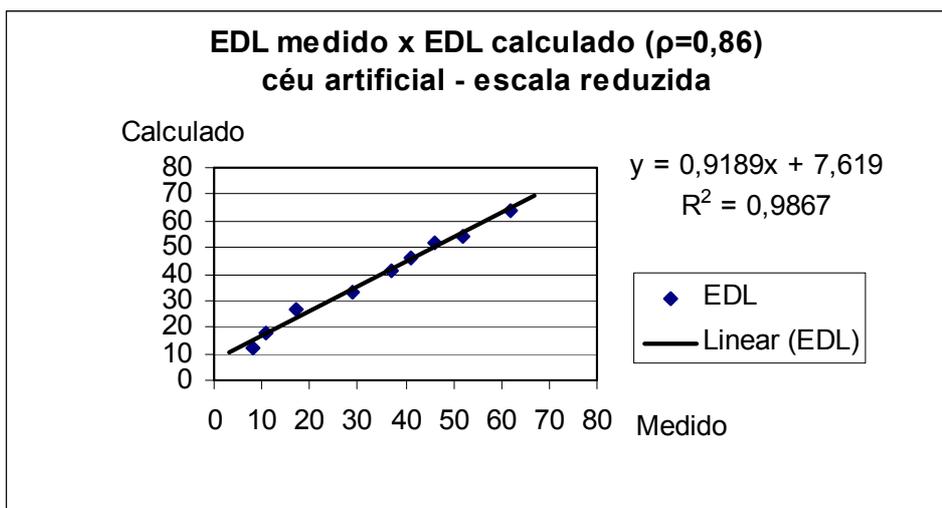
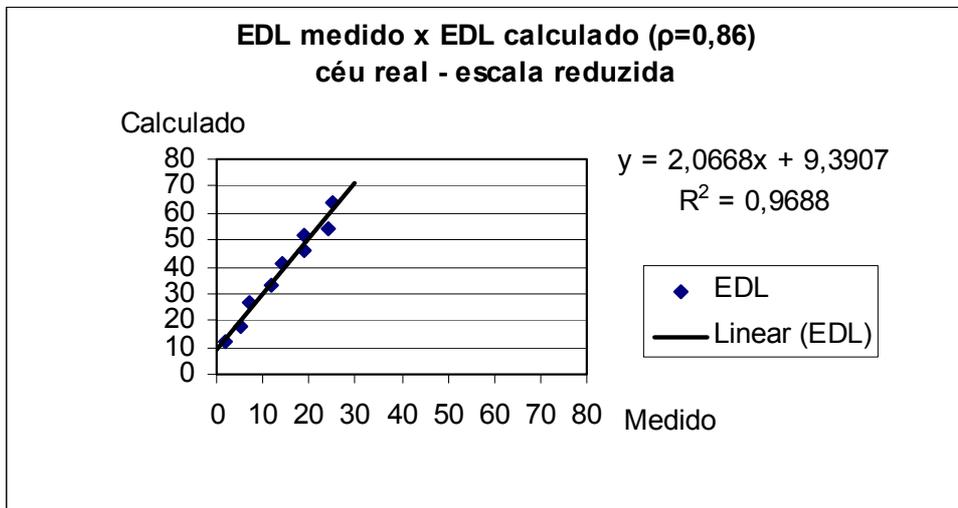
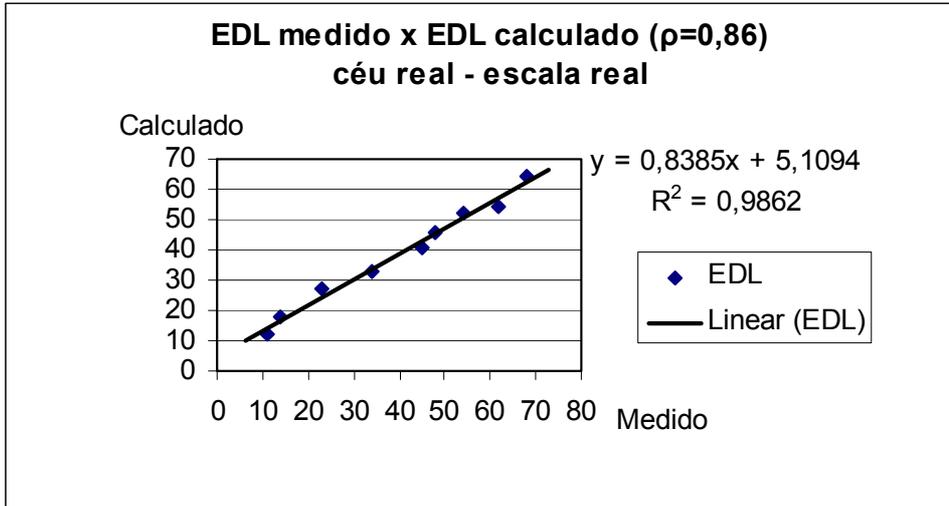
## CAPÍTULO VI



**Ilustração 69.** Comparação entre EDL medido (modelo em escala real) e calculado ( $\rho=0,86$ ).

Os resultados calculados foram comparados com os resultados medidos tanto sob condições de céu real com modelos em escala real e em escala reduzida como também com os resultados dos ensaios com modelo em escala reduzida no céu artificial.

A seguir estão apresentados os gráficos de correlação entre resultados medidos e calculados com a refletância  $\rho=0,86$ , para as duas fontes correlacionadas com os dois modelos utilizados nos ensaios. Nesses fica clara a correlação existente. Portanto, para o duto estudado e ensaiado o modelo proposto corresponde satisfatoriamente.



**Ilustração 70.** Correlação entre os valores de EDL medidos e calculados ( $\rho=0,86$ ).

**CAPÍTULO VI****6.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Com os testes e comparações realizadas até o momento o modelo MPELD apresentou resultados satisfatórios e animadores. Para desenvolvimentos futuros este modelo deve ser testado com outros dutos, aumentando a base de dados por meio de variações das seções e comprimentos bem como dos materiais de revestimento interno, verificando a correspondência para outras refletâncias e comportamento da condução, por exemplo, com um revestimento interno com características difusas. Outro teste futuro interessante é a correspondência deste modelo para dutos com seções retangulares, ampliando a aplicação do mesmo em situações reais.

**CAPÍTULO VII**  
**CONSIDERAÇÕES FINAIS**



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Iluminar naturalmente todos os ambientes onde haja necessidade de luz foi a motivação primeira para o desenvolvimento desta pesquisa. No entanto, existem os ambientes subterrâneos, os localizados longe do contato direto com o meio externo e outros muito profundos. Assim, a primeira dificuldade encontrada foi levar luz natural com qualidade a todos os ambientes. A segunda, conduzi-la a longas distâncias.

Com os sistemas convencionais não é possível conduzir a luz para promover a iluminação de subsolos ou locais muito distantes das aberturas, havendo esta lacuna a ser preenchida. Desse modo, foram iniciadas as buscas por sistemas não convencionais que controlem a aquisição, conduza e permita a distribuição desta em locais longe da captação.

Por meio da revisão bibliográfica foram levantados os sistemas não convencionais para a iluminação natural, apresentados no capítulo 2, identificando que esses são compostos por dispositivos captadores, condutores e difusores da luz.

Considerando como objeto da pesquisa a condução da luz por sistemas não convencionais, os conceitos e fenômenos relativos à condução da luz são apresentados no capítulo 3 e os métodos e modelos são analisados no capítulo 4.

Tendo o objetivo de verificar a eficiência de sistema não convencional na condução da luz, foi selecionado o duto de luz para os estudos experimentais apresentados no capítulo 5.

Com a base empírica levantada no estudo experimental foi possível desenvolver o modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPELD), proposto no capítulo 6.

Finalmente, o capítulo 7 apresenta as considerações finais, sintetizando o desenvolvimento da pesquisa: motivação inicial desta, revisão bibliográfica, bases teóricas, procedimentos de ensaio desenvolvidos e aplicados, bases empíricas, verificação da eficiência do sistema condutor duto de luz e desenvolvimento do modelo preditivo proposto.

**CAPÍTULO VII**

Ainda no capítulo 7 são apresentadas: a inserção da pesquisa no atual estado da arte, tanto em âmbito nacional como no panorama internacional; possíveis aplicações de uso prático e teórico do conhecimento desenvolvido; possibilidades de prosseguimento da pesquisa e desenvolvimento de correlatas.

**7.1 INSERÇÃO DA PESQUISA NO ESTADO DA ARTE**

No Brasil dentre as pesquisas que abordam sistemas não convencionais, e em especial o condutor duto de luz, estão os trabalhos que proporcionam coletâneas de sistemas, comparação entre a eficiência de sistemas diferentes e simulações computacionais preditivas (MACÊDO, 2002; FANTINELLI, 2005; GARROCHO & AMORIM, 2006). A maior parte das pesquisas nacionais levantadas aborda os mecanismos de controle óptico objetivando melhorias na eficiência dos sistemas convencionais.

No panorama internacional é grande o número de estudos voltados ao desenvolvimento de tecnologias para iluminação natural. Dentre esses estudos destacam-se os projetos e sistemas não convencionais desenvolvidos pelo laboratório austríaco Bartenbach<sup>15</sup>. No grupo das coletâneas de sistemas não convencionais ressaltam-se os trabalhos Ferrón (2005) na Argentina e Callow (2003) na Inglaterra. Com relação aos monitoramentos a sistemas implantados destacam-se os trabalhos de Al-Marwae & Carter (2006) e Oaklley et al. (2000). Sobre sistemas propostos Callow (2003) e Canziani et al. (2004) são relevantes. Dentre os softwares e modelos preditivos propostos destacam-se os trabalhos de Andersen & Bôer (2006), Swift et al. (2008) e Kocifaj (2009).

Outras referências nacionais e internacionais contribuíram para a formação do aparato necessário às considerações, análises e discussões desenvolvidas sobre a condução da luz natural por meio de sistemas não convencionais: Whitehead et al. (1984), Saxe (1989), Molteni et al (2000), Miguet & Groleau (2001), Scartezzini & Courret (2002), Jenkins & Muneer (2003), Jenkins & Muneer (2004), Earp et al (2004), Jenkins et al. (2005), Dobrre & Achard (2005), Silva et al. (2005),

Neste contexto a presente pesquisa se insere entre os trabalhos que propõem modelos preditivos com base em levantamentos empíricos. Apresenta uma coletânea de sistemas em conjunto com a análise dos princípios físicos

---

<sup>15</sup> Disponível em: [www.bartenbach.com](http://www.bartenbach.com), acessado em 30/10/2009.

envolvidos na condução da luz por esses. E considera a eficiência do sistema ensaiado (duto de luz) sob condições reais e artificiais (céu artificial) de exposição em função do comprimento e da área de seção de entrada da luz, propondo ainda um modelo preditivo.

## **7.2 APLICAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **7.2.1 USOS PRÁTICOS**

O primeiro uso prático dos resultados obtidos diz respeito ao procedimento desenvolvido e testado para levantamentos empíricos com dutos de luz.

O segundo uso prático se refere ao tratamento dos dados obtidos no estudo experimental, dando origem ao fator EDL (eficiência em dutos de luz).

O terceiro e último uso prático refere-se ao modelo preditivo de eficiência luminosa em dutos, que permite dimensionar dutos de luz a partir da eficiência desejada ou verificar a eficiência de dutos no processo de projeto.

### **7.2.2 USOS TEÓRICOS**

O primeiro uso teórico diz respeito à revisão bibliográfica, a qual engloba o levantamento dos sistemas não convencionais para iluminação natural apresentados no capítulo 2, à conceituação e fenômenos físicos relativos à condução da luz natural considerados no capítulo 3, e os métodos, modelos e ferramentas preditivas descritos e analisados no capítulo 4. Esses capítulos fornecem base de consulta e referência para futuras pesquisas.

O segundo uso teórico diz respeito ao procedimento adotado no levantamento empírico e da avaliação comparativa dos resultados. As discussões acerca do estudo experimental apresentado no capítulo 5 revelam critérios e parâmetros adotados nos ensaios que podem ser aproveitados para estudos futuros e ou modificados para melhor atender outros estudos de caso.

O terceiro uso teórico diz respeito ao modelo preditivo desenvolvido e apresentado no capítulo 6. Por meio dos conceitos e princípios físicos associados a recursos geométricos e analíticos foi possível chegar à equação 39 aplicada para uso prático em casos similares aos estudados. No entanto, os conceitos envolvidos assim como os procedimentos adotados podem contribuir para outros modelos que incluam situações e sistemas não considerados pelo MPELD.

**CAPÍTULO VII**

O quarto uso teórico diz respeito à avaliação crítica do estudo de caso e da metodologia adotada que está expressa em todos os capítulos cuja síntese dos resultados estão apresentados neste último.

**7.3 DESDOBRAMENTOS FUTUROS****7.3.1 PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA**

Para a realização da pesquisa foi desenvolvido um procedimento de ensaio de campo e por meio deste foram coletados dados de iluminância para dutos de luz com três seções e três comprimentos diferentes.

O prosseguimento será realizado por meio da introdução de sistemas captadores de luz acoplados a entrada dos dutos construídos e ensaiados para a verificação da eficiência desse novo sistema gerado (captador + condutor). O objetivo é verificar a influência da captação da luz na eficiência do sistema e assim observar a relação existente entre a captação e a condução da luz natural em sistemas não convencionais. A análise dos resultados mostrará comparativamente as correlações entre a eficiência dos condutores duto de luz com e sem o efeito produzido pela inserção de elementos captadores na entrada desses.

Os resultados finais do prosseguimento da pesquisa fornecerão: (1) procedimento para levantamento empírico de sistemas captadores de luz natural; (2) proposição do fator EDL (Eficiência em Dutos de Luz); (3) quadro comparativo entre eficiência do captador e do condutor ensaiados, (4) proposição de modelo preditivo da eficiência luminosa do captador e modelo preditivo do sistema captador associado ao condutor; (5) análise síntese do estudo de caso e dos modelos desenvolvidos.

**7.3.2 OUTRAS POSSIBILIDADES DE PESQUISA**

Com o desenvolvimento da pesquisa foram observadas outras possibilidades tanto para o prosseguimento, além da apontada no item anterior, como de outras pesquisas correlatas. A seguir são apresentadas cinco diferentes abordagens para pesquisas futuras. A primeira trata da expansão da base empírica levantada e conseqüente verificação do modelo desenvolvido. A segunda refere-se a aprofundamentos teóricos que possibilitem adequação e/ou proposição de novos modelos. A terceira visa avançar os estudos sobre dutos de luz, buscando o

conhecimento da distribuição da luz a partir da emissão dessa no ambiente. A quarta e a quinta partem dos conhecimentos desenvolvidos por essa pesquisa, adequando e ampliando esses para estudar outros tipos de sistemas não convencionais.

- 1<sup>a</sup>. A base de dados levantada no estudo experimental é restrita, contando com dutos de três seções e três comprimentos. A continuação dos ensaios nos mesmos moldes dos realizados com esses modelos, para outras seções e comprimentos, contribuirá para a verificação da validade do modelo preditivo proposto (MPELD).
- 2<sup>a</sup>. Aprofundamentos teóricos poderiam levar ao desenvolvimento de novos modelos ou a adequação do MPELD para incluir outras geometrias de dutos, por exemplo, dutos retangulares e circulares.
- 3<sup>a</sup>. Os modelos em escala permitem a rápida variação das soluções e ensaios com menor grau de dificuldade e mão de obra em operação. Desse modo, o estudo da distribuição da luz a partir da seção de saída do duto até o plano de trabalho, bem como as varias configuração e disposição desses em um ambiente pré-determinado podem ser realizados por meio de medições com modelos em escala reduzida (maquetes). Esses ensaios podem ser realizados tanto sob condições de céu real como em céu artificial.
- 4<sup>a</sup>. Com base nos estudos teóricos apresentados é possível avançar e desenvolver novos procedimentos e metodologias similares às utilizadas, possibilitando levantamentos empíricos com outros sistemas condutores de luz natural. Por exemplo, verificar a eficiência luminosa dos sistemas condutores baseados no princípio da reflexão total.
- 5<sup>a</sup>. Nem todos os sistemas não convencionais simplesmente conduzem a luz, alguns deles, classificados por luminárias naturais, controlam a aquisição e distribuição da luz no ambiente por meio de dispositivos ópticos, sem, no entanto, que a luz percorra longas distâncias entre a captação e a distribuição dessa. Verificar a eficiência e os fenômenos envolvidos no controle da luz proporcionado por essas luminárias faz parte das lacunas ainda existentes nas pesquisas

**CAPÍTULO VII**

atuais. Com procedimentos semelhantes aos desenvolvidos e aplicados nessa pesquisa é possível levantar dados empíricos para futuras proposições preditiva relativas à eficiência luminosa dessas luminárias.

**7.4 CONSIDERAÇÃO FINAL**

Conduzir a luz natural por meio de sistemas não convencionais para ambientes subterrâneos ou de difícil acesso é uma opção viável, que além de colaborar com a eficiência energética, reduzindo o consumo por sistemas artificiais, proporciona qualidade ambiental e bem estar aos usuários. Utilizar dutos de luz para levar iluminação a longas distâncias, mesmo não sendo esse o sistema condutor mais eficiente, é recurso coerente e de aplicação abrangente, devido à facilidade de construção e custos acessíveis. Assim, a presente pesquisa é concluída, cumprindo seu objetivo de forma satisfatória, deixando produtos aplicáveis na prática e, ainda, produtos para futuros estudos teóricos.

**CAPÍTULO VIII**  
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-1. Iluminação Natural – Parte 1: Conceitos Básicos e Definições.** Rio de Janeiro, 2005. 5 p.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-2. Iluminação Natural – Parte 2 – Procedimentos de Cálculo para a Estimativa da Disponibilidade de Luz Natural.** Rio de Janeiro, 2005. 17 p.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-3. Iluminação natural – Parte 3 – Procedimento de Cálculo para a Determinação da Iluminação Natural em Ambientes Internos.** Rio de Janeiro, 2005. 33 p.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4. Iluminação Natural – Parte 4 – Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações – Método de Medição.** Rio de Janeiro, 2005. 13 p.
- AL-MARWAEI, Mohammed & CARTER, David. **Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances.** Applied Energy 83, 2006. p. 774–788.
- ANDER, G.A. **Daylighting. Performance and Design.** New York, Van Nostrand Reinhold, 1995.
- ANDERSEN, Marilyn & BOER, Jan de. **Goniophotometry and assessment of bidirectional photometric properties of complex fenestration systems.** Energy and Buildings 38, 2006. p. 836-848.
- BARTENBACH, **L'chtLabor.** Aldrans, Áustria desde 1989.
- BELLEVUE. **Skylights Iluminação Natural.** Disponível em: [www.bellevue.com.br](http://www.bellevue.com.br), acessado em 30 out. 2009.
- BRACARENSE, Mirna Suely dos Santos. **Projeto experimental de iluminação natural em sistemas laterais: estudos comparativos de fatores arquiteturais.** Belo Horizonte, CEFET-MG/DPPG, 2003. (Dissertação, Mestrado em Tecnologia do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais).

**CAPÍTULO VIII**

- BOMMIM SOLAR. **Heliostat**. Disponível em: [www.bomin.de](http://www.bomin.de), acessado em 30 out. 2009.
- BUNGE, M. **Teoria e Realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974.
- CALLOW, Joel. **Daylighting Using Tubular Light Guide Systems**. University of Nottingham, 2003.
- CANZIANI, R; PERON, F. & ROSSI, G. **Daylight and energy performances of a new type of light pipe**. Energy and Buildings, 36, 2004. p. 1163-1176.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. CIE 110-1995 **Spatial distribution of daylight; luminance distribution of various reference skies**. Vienne, CIE. 1994. 30 p. (Technical Report).
- COMMON SYMPOSIUM OF EU FP6 ECO-BUILDING PROJECTS. **The German Museum of Technology in Berlin – A case story of energy efficiency**. Berlin. 2005. Disponível em: [http://www.ecobuildings.info/PDF/22\\_9\\_dtmb\\_jakobiak-erhorn.pdf](http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf), acessado em 30 out. 2009.
- DAYLIGHTING SYSTEMS. **Active Solar Daylighting System – “So-Light”**. Disponível em: <http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-1.htm>, acessado em 30 out. 2009.
- DAYLIGHTING SYSTEMS. **Daylight Collector – Himawari**. Disponível em: <http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-4.htm>, acessado em 30 out. 2009.
- DAYLIGHTING SYSTEMS. **Daylight Reflector – Tecnet**. Disponível em: <http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-6.htm>, acessado em 30 out. 2009.
- DAYLIGHTING SYSTEMS. **Automatic Chasing Daylight System – Solaris**. Disponível em: <http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-7.htm>, acessado em 30 out. 2009.
- DOBRRE, O. & ACHARD, G. **Optical simulation of lighting by hollow light pipes**. Building Simulation. Ninth International IBPSA Conference. Montreal, Canadá. 2005.

- EARP, A.A.; SMITH, G.B.; FRANKLIN, J. e SWIFT, P. **Optimisation of a three-colour luminescent solar concentrator daylighting system**. Solar Energy Materials & Solar Cells 84. 2004. p. 411-426.
- FAITHFULL, M. **Making light work**. RIBA Journal, v106, DEC 1999, p. 56-57.
- FANTINELLI, Jane T. **A iluminação natural através de dutos de sol em ambientes enclausurados**. In: VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e VIII Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído – ENCAC 2005. Maceió, 2005.
- FASA. **Fibra Óptica**. Disponível em: [www.fibraoptica.com.br](http://www.fibraoptica.com.br), acessado em 30 out. 2009.
- FERRON, L; PATTINI, A & LARA, M. A. **Disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9. Argentina, 2005.
- GARROCHO, Juliana S. & AMORIM, Cláudia N. **Iluminação Natural em Centros de Compras: Estratégias Inovadoras para Aberturas Zenitais**. In: XI Congresso Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2006. Florianópolis, SC. Anais eletrônicos. Florianópolis: ANTAC, 2006. 1 CD-ROM.
- HELIOBUS. **Empresa Suíça de dutos de luz e heliostatos**. Disponível em: [www.heliobus.com](http://www.heliobus.com), acessado em 30 out. 2009.
- HOPKINSON, R.G; PETHERBRIDGE, P.& LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. Lisboa, Fundação Kalouste Gulbenkian, 1975.
- IESNA – ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **Lighting Handbook Reference & Application**. New York: IESNA, 2000.
- JENKINS, David & MUNEER, Tariq. **Modelling light-pipe performance – A natural daylighting solution**. Building and Environment 38, 2003. p. 965–972.
- JENKINS, David & MUNEER, Tariq. **Light-pipe prediction methods**. Applied Energy 79, 2004. p. 77–86.
- JENKINS, David; MUNEER, Tariq & KUBIE, Jorge. **A design too for predicting the performances of light pipes**. Energy and Buildings, 37, 2005. p. 485-492.
- KOCIFAJ, M. **Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing**. Solar Energy. Vol. 83, 2009. p. 186–192.

**CAPÍTULO VIII**

- LAM, William M. C. **Sunlighting as Formgivers for Architecture**. New York, McGraw-Hill, 1986.
- MACÊDO, Catharina C. **Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol**. Florianópolis: UFSC, 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).
- MASCARO, Lucia E. A. R. **Iluminação natural nos edifícios**. Porto Alegre, 1980.
- MIGUET, F. e GROLEAU, D. **A daylight simulation tool including transmitted direct and diffuse light**. Building Simulation. Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro, Brasil. 2001.
- MOLTENI, S. C.; COURRET, G.; PAULE, B.; MICHEL, L. e SCARTEZZINI, J.L. **Design of anidolic zenithal lightguides for daylighting of underground spaces**. Solar Energy. Vol. 69 (suppl.), N<sup>os</sup> 1-6, 2000. p. 117-129.
- MOON, P. **The Scientific Basis of Illuminating Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1936.
- MOORE, Fuller. **Concepts and Practice of Architectural Daylighting**. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- MOURA, Norberto C. S. **Segurança, Eficiência Energética e Conforto Visual em Emboques de Túneis Rodoviários: Soluções Arquitetônicas**. São Paulo: FAUUSP, 2007. (Tese, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo).
- NATURALUX. **Distribuidor brasileiro dos produtos da Solatube**. Disponível em: [www.naturalux.com.br](http://www.naturalux.com.br), acessado em 30 out. 2009.
- NEWPORT. **Liquid Light Guide**. Disponível em: <http://www.newport.com/Liquid-Light-Guides/378731/1033/catalog.aspx>, acessado em 30 out. 2009.
- NEWTON, V. B; Doca, R. H; & BISCUOLA, G. J. **Tópicos de Física 2. Termologia, Ondulatória e Óptica**. Editora Saraiva. 16<sup>a</sup> edição reformulada e ampliada, 2001.
- OAKLEY, G; RIFFAT, S.B. & SHAO, L. **Daylight Performance of Lightpipes**. Solar Energy. Vol. 69, N<sup>o</sup> 2, 2000. p. 89-98.

- PARANS. **Parans Brochure 2009**. Disponível em: [www.parans.com](http://www.parans.com), acessado em 30 out.2009.
- PRECISION SOLAR TECHNOLOGIES. **Solar Trak Development Milestones. Page 8 – Daylighting Systems**. Disponível em: <http://www.tapthesun.com/HTML/Development%20Milestones/TTS%20SolarTrak%20Milestones%20Page%208.htm>, acessado em 30 out. 2009.
- ROBERT'S. **Sistemas Industriais**. Disponível em: [www.roberts.com.br](http://www.roberts.com.br), acessado em: 04 abr. 2007.
- ROBBINS, Claude. **Daylighting. Design and Analysis**. New York, Van Nostrand, 1986.
- SAXE, S.G. **Prismatic film light guides: performance and recent developments**. Solar Energy Materials 19. 1989. p.95-109.
- SCARTEZZINI, J. e COURRET, G. **Anidolic daylighting systems**. Solar Energy. Vol. 73, N° 2, 2002. p.123-135.
- SILVA, A. D.; RORIZ, M. e GHISI, E. **Contribuição de dutos de luz à qualidade da iluminação proporcionada por janela lateral**. In: VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e VIII Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído – ENCAC 2005. Maceió, 2005.
- SITECO. **Daylight Systems: Micro Sun Shielding Louvre; Movable Prism Systems**. Disponível em: <http://www.siteco.co.uk/en/products/daylight-systems>, acessado em 30 out. 2009.
- SOLAR CANOPY ILLUMINATIONS SYSTEM. **Solar Canopy Project**. Disponível em: <http://www.physics.ubc.ca/ssp/solar-canopy-illumination-system/>, acessado em 30 out. 2009.
- SOLAR ENERGY AND BUILDING PHYSICS LABORATORY (LESO – PB). **Anidolic Systems**. Disponível em: [http://leso.epfl.ch/e/research\\_dl\\_anidolic.html](http://leso.epfl.ch/e/research_dl_anidolic.html), acessado em 30 out. 2009.
- SOLARTRAN. **Daylight Systems: Laser cut panels; Heat Reflecting Glazing; Angular Selective Skylights; Channel Panels**. Disponível em: <http://www.solartran.com.au> acessado em 30 out. 2009.

**CAPÍTULO VIII**

- SOLATUBE. **Commercial & Residential Idea Book**. Disponível em: [www.solatube.com](http://www.solatube.com), acessado em 30 out. 2009.
- SOUZA, Roberta V. G. **Iluminação natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas; Desenvolvimento de ferramenta simplificada**. Florianópolis: UFSC, 1997. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil, Construção Civil).
- SOUZA, Roberta V. G. **Estudos sobre a iluminação natural externa e suas implicações no desempenho luminoso de ambientes internos**. Florianópolis: UFSC, 2002. (Trabalho realizado para Exame de Qualificação, Doutorado em Engenharia Civil, Construção Civil).
- SULLIVAN, A. C. **Photorealistic light simulation**. ARCHITECTURE, v.85, OCT 1996, p. 177-179.
- SWIFT, P.D; LAWLOR, R.; SMITH, G.B. & GENTLE, A. **Retangular –section mirror light pipes**. Solar Energy Materials & Solar Cells 92. 2008. p. 969 - 975.
- 3M. **Filme Prismático**. Disponível em: <http://www.3m.com/index.html?change=true>, acessado em 30 out. 2009.
- VELUX. **Sun Tunnels**. Disponível em: [www.veluxusa.com](http://www.veluxusa.com), acessado em 30 out. 2009.
- VIANNA, Nelson S. & GONÇALVES, Joana C. S. **Iluminação e Arquitetura**. Virtus s/c Ltda, São Paulo, SP, 2001.
- WHITEHEAD, L. A.; BROWN, D. N. e NODWELL, R. A. **A new device for distributing concentrated sunlight in building interiors**. Energy and Buildings 6. 1984. p. 119–125 .

## **ANEXOS**



ANEXOS

A. TABELAS COM LEVANTAMENTO DOS SISTEMAS NÃO CONVENCIONAIS DE CAPTAÇÃO, CONDUÇÃO E DIFUSÃO DA LUZ NATURAL.

Tabela 9 Captação Zenital por Sistema Fixo

Captação Fixa Zenital		
Nome Comercial	Imagem	
Heliostato		
Material Óptico		
Espelho Plano		
Aplicação		
Museu de Tecnologia de Berlim		
Endereço Eletrônico		
Nome Comercial		
Heliostat Project		
Material Óptico		
Espelho Plano		
Aplicação		
Laboratório na Áustria – Bartenbach L'chtLabor		
Endereço Eletrônico		
www.bartenbach.com		
Nome Comercial		
Heliostat Project		
Material Óptico		
Lente		
Aplicação		
Laboratório na Áustria – Bartenbach L'chtLabor		
Endereço Eletrônico		
www.bartenbach.com		
Nome Comercial		
ROBERT'S (Sunlight SD)		
Material Óptico		
Lentes		
Aplicação		
Supermercados, lojas, fabricas, galpões		
Endereço Eletrônico		
www.roberts.com.br		

## ANEXOS

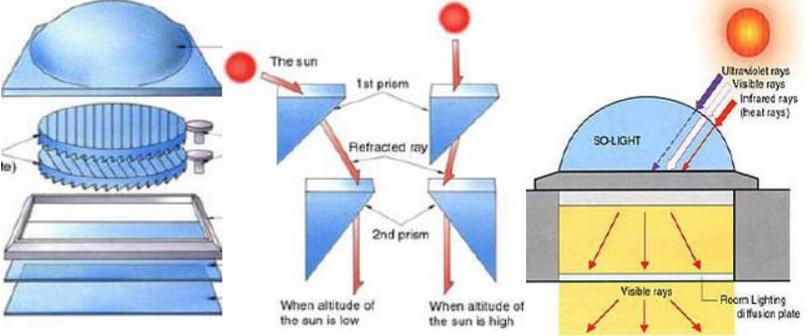
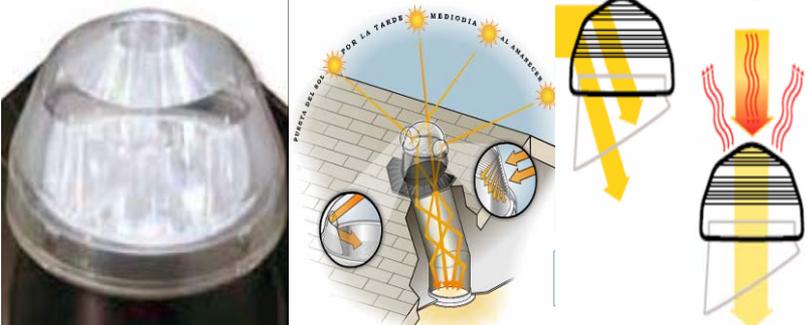
<p><b>Nome Comercial</b> BELLEVUE</p> <p><b>Material Óptico</b> Micro Prisma</p> <p><b>Aplicação</b> Industrial, Comercial e Institucional</p> <p><b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.bellevue.com.br">www.bellevue.com.br</a></p>	<p><b>Imagem</b></p> 
<p><b>Nome Comercial</b> SO LIGHT</p> <p><b>Material Óptico</b> Prisma</p> <p><b>Aplicação</b> Residencial, Comercial e Institucional</p> <p><b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-1.htm">http://www.arch.hku.hk/~kpcheung/daylight/day-1.htm</a></p>	<p><b>Imagem</b></p> 
<p><b>Nome Comercial</b> SOLATUBE</p> <p><b>Material Óptico</b> Prisma</p> <p><b>Aplicação</b> Residencial e Comercial</p> <p><b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.solatube.com">www.solatube.com</a></p>	<p><b>Imagem</b></p> 
<p><b>Nome Comercial</b> SOLARTRAN (angular selective skylights) (laser cut panel)</p> <p><b>Material Óptico</b> Acrílico</p> <p><b>Aplicação</b> Em fachadas e coberturas de edifícios institucionais e de escritórios</p> <p><b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.solartran.com.au">www.solartran.com.au</a></p>	<p><b>Imagem</b></p> 

Tabela 10 Captação Zenital ou Lateral por Sistema Fixo

Captação Fixa Zenital ou Lateral	
Nome Comercial	Imagem
<p>SITECO Micro Sun Shielding Louvre; Movable Prism Systems. (Empresa Alemã)</p>	
<p><b>Material Óptico</b> Prisma</p>	
<p><b>Aplicação</b> Fachadas/Coberturas edifícios institucionais e corporativos</p>	
<p><b>Endereço Eletrônico</b> www.siteco.com</p>	
<p><b>Nome Comercial</b> SOLARTRAN (laser cut panels)</p>	
<p><b>Material Óptico</b> Acrílico</p>	
<p><b>Aplicação</b> Fachadas/Coberturas edifícios institucionais e corporativos</p>	
<p><b>Endereço Eletrônico</b> www.solartran.com.au</p>	
<p><b>Nome Comercial</b> SOLARTRAN (heat reflecting glazing)</p>	
<p><b>Material Óptico</b> Acrílico</p>	
<p><b>Aplicação</b> Fachadas de edifícios institucionais e corporativos</p>	
<p><b>Endereço Eletrônico</b> www.solartran.com.au</p>	
<p><b>Nome Comercial</b> SOLARTRAN (channel panel)</p>	
<p><b>Material Óptico</b> Acrílico</p>	
<p><b>Aplicação</b> Fachadas de edifícios institucionais e corporativos</p>	
<p><b>Endereço Eletrônico</b> www.solartran.com.au</p>	

## ANEXOS

Tabela 11 Captação Lateral por Sistema Fixo

Captação Fixa Lateral	
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>
Anidolic System	
<b>Material Óptico</b>	
Espelho	
<b>Aplicação</b>	
Edifício experimental do LESO-PB Solar Energy and Building Physics Laboratory	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://leso.epfl.ch/e/research_dl_anidolic.html">http://leso.epfl.ch/e/research_dl_anidolic.html</a>	
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>
Canopy Solar System da University of British Columbia	
<b>Material Óptico</b>	
Alumínio Polido	
<b>Aplicação</b>	
Célula teste na Universidade Britânica da Columbia	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://www.phas.ubc.ca/ssp/solar-canopy-illumination-system/">http://www.phas.ubc.ca/ssp/solar-canopy-illumination-system/</a>	
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>
New Light Pipe	
<b>Material Óptico</b>	
Filme Reflexivo	
<b>Aplicação</b>	
Projeto desenvolvido na Universidade de IUAV de Veneza na Italia	
<b>Fonte</b>	
CANZIANI et al. Energy and Buildings, 36, 2004. p. 1163-1176.	

Tabela 12 Captação Zenital por Sistema Móvel

Captação Móvel Zenital	
Nome Comercial	Imagem
<b>BOMIN SOLAR</b> Heliostats System Lightron <b>Material Óptico</b> Espelho Plano <b>Aplicação</b> Teadrop Park – New York Edifícios comerciais e institucionais <b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.bomin.de/heliostaten/">http://www.bomin.de/heliostaten/</a>	
<b>Nome Comercial</b> <b>HELIOBUS</b> (sistemas especiais) <b>Material Óptico</b> Espelho Plano <b>Aplicação</b> Estação em Berlim Edifícios comerciais e Institucionais <b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.heliobus.com">www.heliobus.com</a>	
<b>Nome Comercial</b> Helisotato / Solar Tracker <b>Material Óptico</b> Espelhos Planos <b>Aplicação</b> Museu de Tecnologia de Berlim <b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf">http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf</a>	
<b>Nome Comercial</b> Milestones Daylighting Systems <b>Material Óptico</b> Espelho Parabólico <b>Aplicação</b> Concentrador de luz natural para guia de luz <b>Endereço Eletrônico</b> <a href="http://www.tapthesun.com/HTML/Development%20Milestones/TTS%20SolarTrak%20Milestones%20Page%208.htm">http://www.tapthesun.com/HTML/Development%20Milestones/TTS%20SolarTrak%20Milestones%20Page%208.htm</a>	

## ANEXOS

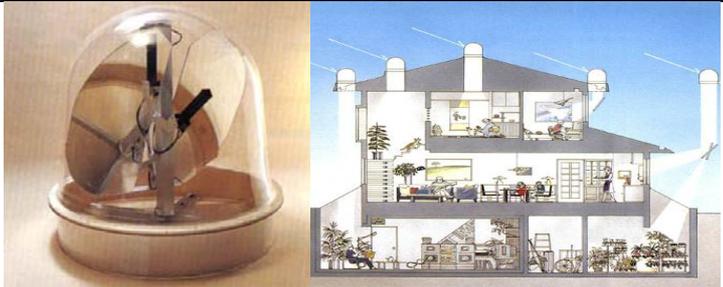
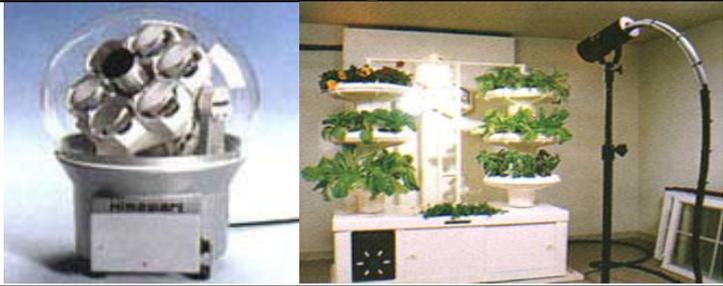
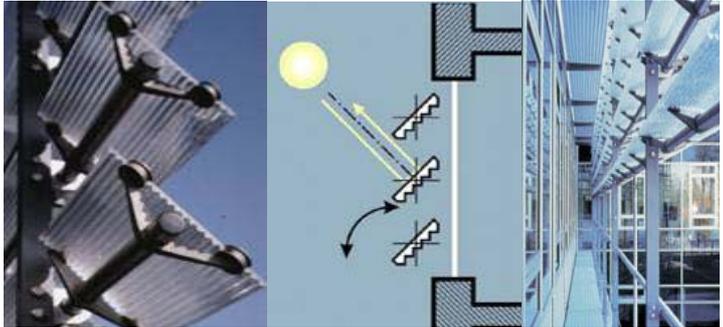
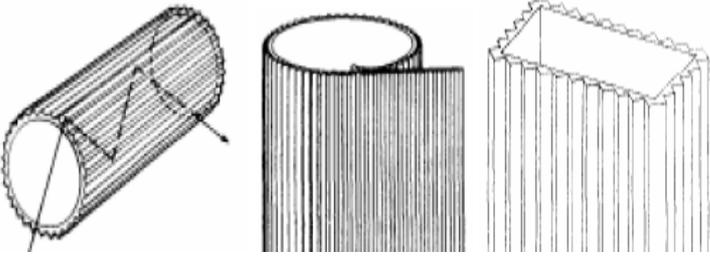
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>	
SOLARIS		
<b>Material Óptico</b>		
Espelho Parabólico		
<b>Aplicação</b>		
Residencial e hospitalar		
<b>Endereço Eletrônico</b>		
<a href="http://www.arch.hku.hk/~kpc/heung/daylight/day-7.htm">http://www.arch.hku.hk/~kpc/heung/daylight/day-7.htm</a>		
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>	
TECNET		
Daylight Reflector		
<b>Material Óptico</b>		
Espelhos		
<b>Aplicação</b>		
Residencial no Japão		
<b>Endereço Eletrônico</b>		
<a href="http://www.arch.hku.hk/~kpc/heung/daylight/day-6.htm">http://www.arch.hku.hk/~kpc/heung/daylight/day-6.htm</a>		
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>	
HIMAWARI		
<b>Material Óptico</b>		
Lentes Fresnel		
<b>Aplicação</b>		
Edifícios Comerciais, institucionais, etc...		
<b>Endereço Eletrônico</b>		
<a href="http://www.arch.hku.hk/~kpc/heung/daylight/day-4.htm">http://www.arch.hku.hk/~kpc/heung/daylight/day-4.htm</a>		
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>	
SOLUX		
<b>Material Óptico</b>		
Lentes Fresnel		
<b>Aplicação</b>		
Museu de Tecnologia de Berlim/UFO Project do Bartenbach L'chtLabor Instalação Piloto na Universidade de Atenas		
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>	
SITECO		
Painel Prismático (Empresa Alemã)		
<b>Material Óptico</b>		
Prisma		
<b>Aplicação</b>		
Fachadas e cobertura de edifícios institucionais e corporativos		
<b>Endereço Eletrônico</b>		
<a href="http://www.siteco.com">www.siteco.com</a>		

Tabela 13 Exemplos de Dutos Verticais

Dutos Verticais de Luz	
Nome Comercial	Imagem
<b>SOLATUBE</b>	
<b>Material Óptico</b>	
Alumínio Polido	
<b>Aplicação</b>	
Residenciais, comerciais e institucionais.	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://www.solatube.com">www.solatube.com</a>	
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>
<b>HELIOBUS</b> (sistemas especiais)	
<b>Material Óptico</b>	
Alumínio Polido	
<b>Aplicação</b>	
Estação em Berlim Edifícios comerciais e Institucionais	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://www.heliobus.com">www.heliobus.com</a>	
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>
3M	
<b>Material Óptico</b>	
Filme Prismático	
<b>Aplicação</b>	
Revestimento de dutos de luz – em fase de testes por pesquisadores	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://www.3m.com/index.html?change=true">http://www.3m.com/index.html?change=true</a>	
<b>Nome Comercial</b>	<b>Imagem</b>
<b>HELIOBUS</b> (MIRROR SHAFT)	
<b>Material Óptico</b>	
Espelho	
<b>Aplicação</b>	
Residencial, Comercial e institucional.	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://www.heliobus.com">www.heliobus.com</a>	

## ANEXOS

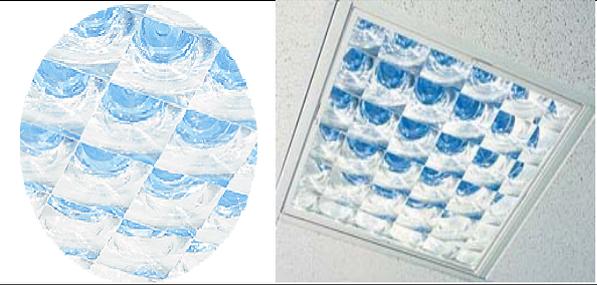
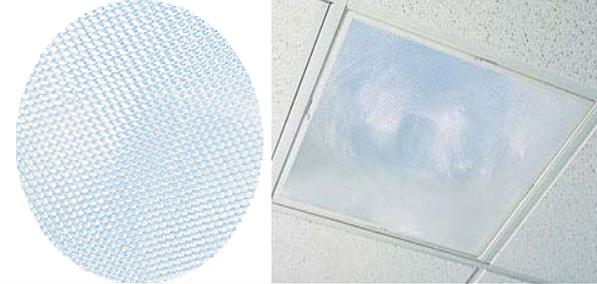
Tabela 14 Exemplos de Dutos Horizontais

Dutos Horizontais de Luz	
Nome Comercial	Imagem
UBC Solar Illumination System	
<b>Material Óptico</b>	
Alumínio Polido	
<b>Aplicação</b>	
Célula teste na Universidade Britânica da Columbia	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://www.phas.ubc.ca/ssp/solar-canopy-illumination-system/">http://www.phas.ubc.ca/ssp/solar-canopy-illumination-system/</a>	
Nome Comercial	Imagem
DUTO DE LUZ (GeeO laboratory) (Grenoble, France)	
<b>Material Óptico</b>	
Prisma e Alumínio Polido	
<b>Aplicação</b>	
Laboratório na França	
<b>Fonte</b>	
EARP et al. Solar Energy Materials & Solar Cells 84. 2004. p. 411-426.	

Tabela 15 Difusão por Reflexão da Luz - Refletores

Refletores para Difusão da Luz Natural	
Nome Comercial	Imagem
ALETAS/PAINEL REFLETOR	
<b>Material Óptico</b>	
Alumínio Polido/Espelho/Painel Difusor	
<b>Aplicação</b>	
Museu de Tecnologia de Berlim	
<b>Endereço Eletrônico</b>	
<a href="http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf">http://www.ecobuildings.info/PDF/22_9_dtmb_jakobiak-erhorn.pdf</a>	

**Tabela 16** Difusão por Reflexão da Luz - Refletores

Refletores para Difusão da Luz Natural	
Nome Comercial	Imagem
SOLATUBE (Frosted Diffuser)	
Material Óptico Vidro	
Aplicação residencial/comercial/ institucional/corporativo	
Endereço Eletrônico www.solatube.com	
SOLATUBE (OptiView Diffuser)	
Material Óptico Lentes	
Aplicação residencial/comercial/ institucional/corporativo	
Endereço Eletrônico www.solatube.com	
SOLATUBE (Prismatic Diffuser)	
Material Óptico Prisma	
Aplicação residencial/comercial/ institucional/corporativo	
Endereço Eletrônico www.solatube.com	
SOLATUBE (Frosted Diffuser)	
Material Óptico Vidro	
Aplicação residencial/comercial/ institucional/corporativo	
Endereço Eletrônico www.natureslightingdistribution.com	

**ANEXOS****B. TABELAS COM OS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS.****Ensaio do Grupo 1 - Modelos em escala real sob condição de céu real**

**Tabela 17.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho comum - seção quadrada de 10cm – Céu Claro (26/05/08).

<b>Dutos com seção 10x10 cm espelho comum</b>				
<b>Céu Claro (26/05/2008) - Iluminância (lux)</b>				
<b>Horário</b>	<b>Posição</b>	<b>Duto 100cm</b>	<b>Duto 150cm</b>	<b>Duto 200cm</b>
13:00	P1	64500	65300	60700
13:05	P2	23100	51900	37200
13:05	P3	3300	3400	1500
13:00	P4	10200	7200	2200

**Tabela 18.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus - seção quadrada de 10cm – Céu Claro (26/05/08).

<b>Dutos com seção 10x10 cm espelho Optimirror Plus</b>				
<b>Céu Claro (26/05/2008) - Iluminância (lux)</b>				
<b>Horário</b>	<b>Posição</b>	<b>Duto 100cm</b>	<b>Duto 150cm</b>	<b>Duto 200cm</b>
12:50	P1	44500	64900	56300
12:45	P2	41300	52400	17900
12:45	P3	5300	3900	1900
12:50	P4	5000	6000	2300

**Tabela 19.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus - seção quadrada de 25cm – Céu Claro (26/05/08).

<b>Dutos com seção 25x25 cm espelho Optimirror Plus</b>				
<b>Céu Claro (26/05/2008) - Iluminância (lux)</b>				
<b>Horário</b>	<b>Posição</b>	<b>Duto 100cm</b>	<b>Duto 150cm</b>	<b>Duto 200cm</b>
12:30	P1	64800	63000	64900
12:25	P2	64700	64700	64700
12:25	P3	37400	9900	18400
12:30	P4	34300	8500	18500

**Tabela 20.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus - seção quadrada de 40cm – Céu Claro (26/05/08).

<b>Dutos com seção 40x40 cm espelho Optimirror Plus</b>				
<b>Céu Claro (26/05/2008) - Iluminância (lux)</b>				
<b>Horário</b>	<b>Posição</b>	<b>Duto 100cm</b>	<b>Duto 150cm</b>	<b>Duto 200cm</b>
12:10	P1	62800	67400	61000
12:00	P2	61000	70600	71000
12:00	P3	40100	38900	39300
12:10	P4	56100	33800	59000

**Tabela 21.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 10x10x100 (cm) – Céu Parcialmente Encoberto (22/04/09)

Dutos de 10 X 10 X 100 (cm) – Espelho Optimirror Plus					% do Externo em cada Ponto	
Céu Parcialmente Encoberto (22/4/2009) – Iluminância (lux)						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
P1	86900	46500	83900	91800	54%	109%
P2	83500	24600	84000	52000	29%	62%
P3	86800	10700	94900	17400	12%	18%
P4	94200	10900	94600	22900	12%	24%

**Tabela 22.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 10x10x150 (cm) – Céu Parcialmente Encoberto (22/04/09)

Dutos de 10 X 10 X 150 (cm) – Espelho Optimirror Plus					% do Externo em cada Ponto	
Céu Parcialmente Encoberto (22/4/2009) – Iluminância (lux)						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
P1	86900	46500	83900	91800	54%	109%
P2	83500	29600	84000	95700	35%	114%
P3	86800	7500	94900	87000	9%	92%
P4	94200	6700	94600	80800	7%	85%

**Tabela 23.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 10x10x200 (cm) – Céu Parcialmente Encoberto (22/04/09)

Dutos de 10 X 10 X 200 (cm) – Espelho Optimirror Plus					% do Externo em cada Ponto	
Céu Parcialmente Encoberto (22/4/2009) – Iluminância (lux)						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
P1	86900	46500	83900	91800	54%	109%
P2	83500	24200	84000	49600	29%	59%
P3	86800	5300	94900	6800	6%	7%
P4	94200	5000	94600	7000	5%	7%

**Nota:** Não foram realizados ensaios com os dutos de seção quadrada 25cm e 40cm e com os dutos de espelho comum com seção 10cm, no dia 22/04/2009, pois as condições de céu tornaram-se instáveis.

**ANEXOS**

<b>Tabela 24. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.</b> Espelho Comum – Duto 10x10x100 (cm) – Céu Claro (06/05/09)						
<b>Céu Claro (06/05/2009)</b>					<b>% do Externo em cada Ponto</b>	
<b>10 X 10 X 100 (Espelho Comum)</b>						
	<b>EXTERNO</b>	<b>COM ACRÍLICO</b>	<b>EXTERNO</b>	<b>SEM ACRÍLICO</b>	<b>com acrílico</b>	<b>sem acrílico</b>
<b>P1</b>	78800	40500	80500	73400	51%	91%
<b>P2</b>	77700	22500	81000	55700	29%	69%
<b>P3</b>	80900	9930	80400	22400	12%	28%
<b>P4</b>	78500	8950	78200	8200	11%	10%

<b>Tabela 25. Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.</b> Espelho Optimirror Plus – Duto 10x10x100 (cm) – Céu Claro (06/05/09)						
<b>Céu Claro (06/05/2009)</b>					<b>% do Externo em cada Ponto</b>	
<b>10 X 10 X 100 (Espelho Optimirror Plus)</b>						
	<b>EXTERNO</b>	<b>COM ACRÍLICO</b>	<b>EXTERNO</b>	<b>SEM ACRÍLICO</b>	<b>com acrílico</b>	<b>sem acrílico</b>
<b>P1</b>	78800	40500	80500	73400	51%	91%
<b>P2</b>	77700	22000	81000	63200	28%	78%
<b>P3</b>	80900	7800	80400	7200	10%	9%
<b>P4</b>	78500	6900	78200	18300	9%	23%

**Nota:** No dia 06/05/2009 não foram coletados dados, para a seção quadrada 10cm nos comprimentos 150cm e 200cm, tanto para os dutos revestidos de espelho comum como para os revestidos de espelho optimirror plus, pois estes foram quebrados durante o ensaio.

**Tabela 26.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 25x25x100 (cm) – Céu Claro (06/05/09)

Céu Claro (06/05/2009)					% do Externo em cada Ponto	
25 X 25 X 100						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
P1	78800	32500	78800	70900	41%	90%
P2	80000	30100	80200	73400	38%	92%
P3	79900	18900	80300	51600	24%	64%
P4	78700	17700	79500	53700	22%	68%

**Tabela 27.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 25x25x150 (cm) – Céu Claro (06/05/09)

Céu Claro (06/05/2009)					% do Externo em cada Ponto	
25 X 25 X 150						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
P1	78800	32500	78800	70900	41%	90%
P2	79900	34400	79700	79900	43%	100%
P3	79900	15500	80300	69800	19%	87%
P4	78700	14600	79500	34800	19%	44%

**Tabela 28.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 25x25x200 (cm) – Céu Claro (06/05/09)

Céu Claro (06/05/2009)					% do Externo em cada Ponto	
25 X 25 X 200						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
P1	78800	32500	78800	70900	41%	90%
P2	79900	34400	79700	78200	43%	98%
P3	79900	11800	80300	22500	15%	28%
P4	78700	11000	79500	46300	14%	58%

**ANEXOS**

**Tabela 29.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 40x40x100 (cm) – Céu Claro (06/05/09)

Céu Claro (06/05/2009)					% do Externo em cada Ponto	
40 X 40 X 100						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
<b>P1</b>	75400	32900	74700	64800	44%	87%
<b>P2</b>	74500	31100	73500	66800	42%	91%
<b>P3</b>	74800	22900	74600	55000	31%	74%
<b>P4</b>	75400	22400	75200	52100	30%	69%

**Tabela 30.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 40x40x150 (cm) – Céu Claro (06/05/09)

Céu Claro (06/05/2009)					% do Externo em cada Ponto	
40 X 40 X 150						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
<b>P1</b>	75400	32900	74700	64800	44%	87%
<b>P2</b>	74500	34700	74500	71000	47%	95%
<b>P3</b>	74800	20600	74000	58400	28%	79%
<b>P4</b>	75400	20300	75200	46300	27%	62%

**Tabela 31.** Grupo 1 – Ensaio com modelos em escala real sob céu real.  
Espelho Optimirror Plus – Duto 40x40x200 (cm) – Céu Claro (06/05/09)

Céu Claro (06/05/2009)					% do Externo em cada Ponto	
40 X 40 X 200						
	EXTERNO	COM ACRÍLICO	EXTERNO	SEM ACRÍLICO	com acrílico	sem acrílico
<b>P1</b>	75400	32900	74700	64800	44%	87%
<b>P2</b>	74500	32300	74500	78500	43%	105%
<b>P3</b>	74800	15900	74600	46700	21%	63%
<b>P4</b>	75400	15800	75200	19200	21%	26%

**Ensaio do Grupo 2 - Modelo em escala reduzida sob condição de céu real**

<b>Tabela 32.</b> Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. Seção quadrada de 10cm – Com Acrílico. Céu Parcialmente Encoberto (22/04/2009)						
<b>Dutos com seção 10x10 cm (com acrílico) - Iluminância (lux)</b>						
<b>Posição</b>	<b>Papel Pluma</b>			<b>Espelho Optimirror Plus</b>		
	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2 m</b>
<b>P1</b>	86100	86100	86100	96900	96900	96900
<b>P4</b>	614	340	250	7000	4900	2400

<b>Tabela 33.</b> Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. Seção quadrada de 25cm – Com Acrílico. Céu Claro (06/05/2009)						
<b>Dutos com seção 25x25 cm (com acrílico) - Iluminância (lux)</b>						
<b>Posição</b>	<b>Papel Pluma</b>			<b>Espelho Optimirror Plus</b>		
	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2 m</b>
<b>P1</b>	79500	79500	77200	80700	79200	77700
<b>P4</b>	4800	2800	1040	15200	11300	9310

<b>Tabela 34.</b> Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real. Seção quadrada de 40cm – Com Acrílico. Céu Claro (06/05/2009)						
<b>Dutos com seção 40x40 cm (com acrílico) - Iluminância (lux)</b>						
<b>Posição</b>	<b>Papel Pluma</b>			<b>Espelho Optimirror Plus</b>		
	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2 m</b>
<b>P1</b>	76400	76400	76100	76200	76000	76500
<b>P4</b>	10500	6400	3900	19100	18000	14600

**ANEXOS**

**Tabela 35.** Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real.  
Seção quadrada de 10cm – Sem Acrílico.  
Céu Parcialmente Encoberto (22/04/2009)

**Dutos com seção 10x10 cm (sem acrílico) - Iluminância (lux)**

Posição	Papel Pluma			Espelho Optimirror Plus		
	1 m	1,5 m	2 m	1 m	1,5 m	2 m
P1	96800	96800	96800	97800	97800	97800
P4	820	85700	800	10800	97000	3082

**Tabela 36.** Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real.  
Seção quadrada de 25cm – Sem Acrílico.  
Céu Claro (06/05/2009)

**Dutos com seção 25x25 cm (sem acrílico) - Iluminância (lux)**

Posição	Papel Pluma			Espelho Optimirror Plus		
	1 m	1,5 m	2 m	1 m	1,5 m	2 m
P1	80100	79600	82200	80200	80700	81700
P4	6800	3000	1100	24500	29600	8620

**Tabela 37.** Grupo 2 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob céu real.  
Seção quadrada de 40cm – Sem Acrílico.  
Céu Claro (06/05/2009)

**Dutos com seção 40x40 cm (sem acrílico) - Iluminância (lux)**

Posição	Papel Pluma			Espelho Optimirror Plus		
	1 m	1,5 m	2 m	1 m	1,5 m	2 m
P1	76200	76300	76000	75900	76000	76400
P4	16900	8800	4500	61100	67900	4000

**Ensaio do Grupo 3 - Modelo em escala reduzida sob condições artificiais**

**Tabela 38.** Grupo 3 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob fonte artificial.  
Seção quadrada de 10cm.

Dutos com seção 10x10 cm						
Iluminância (lux)						
Posição	Papel Pluma			Espelho Optimirror Plus		
	1 m	1,5 m	2 m	1 m	1,5 m	2 m
P1	7280	7280	7280	7830	7830	7830
P4	146	65	33	1353	891	592

**Tabela 39.** Grupo 3 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob fonte artificial.  
Seção quadrada de 25cm.

Dutos com seção 25x25 cm						
Iluminância (lux)						
Posição	Papel Pluma			Espelho Optimirror Plus		
	1 m	1,5 m	2 m	1 m	1,5 m	2 m
P1	7280	7280	7280	7830	7830	7830
P4	1094	483	286	3620	2920	2240

**Tabela 40.** Grupo 3 – Ensaio com modelo em escala reduzida sob fonte artificial.  
Seção quadrada de 40cm.

Dutos com seção 40x40 cm						
Iluminância (lux)						
Posição	Papel Pluma			Espelho Optimirror Plus		
	1 m	1,5 m	2 m	1 m	1,5 m	2 m
P1	7280	7280	7280	7830	7830	7830
P4	2170	1290	801	4870	4080	3220

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)