BRUNA LUZ

DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL

A PARTIR DE DUTOS DE LUZ

SÃO PAULO
2014

BRUNA LUZ

**EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB
RESPONSABILIDADE DO AUTOR E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.
O original se encontra disponível na sede do programa São Paulo 02 de 02 de 2015**

**Distribuição da luz natural a partir de dutos de luz
Daylighting distribution from output of light pipes**

Orientada pela Profª Drª Márcia Peinado Alucci

Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em
Arquitetura e Urbanismo
Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

**São Paulo
2014**

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 DA AUTORA: bluz.79@gmail.com

Luz, Bruna
L979d Distribuição da luz natural a partir de dutos de luz /
Bruna Luz. -- São Paulo, 2014.
291 p. : il.

Tese (Doutorado - Área de Concentração: Tecnologia da
Arquitetura) – FAUUSP.
Orientadora: Márcia Peinado Alucci

1.Iluminação natural 2.Intensidade luminosa
3.Dutos de luz (Dimensionamento) 4.Modelos preditivos I.Título

CDU 628.92

Todos somos luzes.
O pensamento é o nosso sistema condutor.
Espalhar a luz interior é viver.
É existir...

Aos meus pais pela vida e oportunidades...
À Sarah pela paciência e incentivo.
Ao Flávio pelo amor e companheirismo em todos os momentos.
Aos meus filhos João e Arthur que se tornaram a razão de tudo.

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que estiveram ao meu lado nesses quatro 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, aos meus filhos João e Arthur que vieram completar o que não faltava e que agora não podem mais faltar, 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 presentes, 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^a. Dr^a 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^a Joana Carla Soares Gonçalves, pela amizade e incentivo em todos os momentos; Prof^a Anésia Barros Frota, pelo carinho, força, apoio, oportunidades e conhecimentos dedicados; Prof^a Denise Helena Silva Duarte, por seu apoio em momentos cruciais; Prof^o José Fernando Cremonesi, por sua atenção e simpatia todos os dias; e a nossa querida Prof^a Roberta Kronka, por sua amizade e energia de sempre.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos do LABAUT/FAUUSP, pós-graduandos, alunos de iniciação científica e secretária(o)/estagiário que de algum modo colaboraram para este trabalho chegar 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, hoje também Prof^o Leonardo Marques Monteiro (Léo) sem você essa pesquisa seria outra. À disposição e solidariedade da amiga e comadre Alessandra Prata Shimomura (Alê). Ao sincero e divertido apoio moral e por vezes mão na massa da inigualável e inesquecível Anna Christina Miana (Kiquinha). À Mônica Marcondes (Moniquinha) pela companhia em momentos que só nós mesmo nesse fim de mundo... Aos secretários Ranieri Higa e Carlos Bayer (Kadu) pelo apoio em diversos momentos. Galera muitíssimo obrigada!!!

Ao Prof^o 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^a 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.

Aos funcionários do Laboratório de Fotometria do IEE (LABFOT) pelo apoio nos ensaios realizados.

À CEBRACE pelos espelhos doados.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

Bruna Luz

LUZ, Bruna. Distribuição da luz natural a partir de dutos de luz. 291p. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

O objeto de estudo desta pesquisa é o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz de seção quadrada, espelhados internamente. O objetivo é a proposição de um modelo matemático para o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, partindo da eficiência do duto de luz (EDL) para, considerando o nível de iluminância média no plano de trabalho, fornecer o número de dutos necessários. Especificamente, foram avaliados 36 dutos com seção quadrada de lados 10cm, 25cm, 30cm, 40cm e 50cm e comprimentos de 1m, 1,5m, 2m, 3m, 4m e 5m, revestidos internamente por espelhos Optimirror Plus. O método utilizado é experimental indutivo (ensaio com modelos de dutos de luz em escala reduzida para aquisição de dados de iluminância), apoiado por método dedutivo computacional (verificação de resultados empíricos) e análise comparativa dos resultados. Os resultados da análise comparativa forneceram subsídios para a proposição de modelagem matemática. Essa é desenvolvida com base nos métodos dos lumens e das cavidades zonais, 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 (com ambiente de referência, para verificar a distribuição de iluminâncias no plano de trabalho) e artificial (fotométrico em laboratório, para obtenção do fluxo luminoso emitido), (2) roteiro de simulação no software *photopia* para dutos de luz, (3) proposição do coeficiente empírico CD (coeficiente de distribuição), para ajuste do modelo proposto, (4) proposição do modelo para dimensionamento de sistemas de iluminação com dutos de luz (MDDL).

Palavras Chave: modelos preditivos, distribuição da intensidade luminosa, dimensionamento de dutos de luz, iluminação natural.

ABSTRACT

LUZ, Bruna. Daylighting distribution from output of light pipes. 291p. Thesis (PhD). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

The object of this research is the dimensioned of daylighting system with light pipes of square section mirror light pipes. The objective is to propose a mathematical model for the design of daylighting systems with light pipes, using the light pipe efficiency (EDL) for considering the level of average illuminance on the work plan, provide the number of light pipes are necessary. Specifically, pipe with square section of 10cm, 25cm, 30cm, 40cm and 50cm and 1m, 1.5m, 2m, 3m, 4m and 5m lengths, Optimirror Plus coated, were assessed. The method adopted is experimental inductive (testing with model scale for illuminance data acquisition) supported by computational deductive method (verification of empirical results) and comparative analysis of results, providing support to the proposition of mathematical modeling. This modeling is developed based on lumens method e zonal cavity method, 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 light pipes under real sky conditions; (2) procedure for simulation in photopia software, considering light pipes. (3) proposition empirical coefficient CD (coefficient of distribution); (4) model for design of daylighting systems with light pipes (MDDL).

Keywords: predictive model, luminous intensity distribution, light pipes design, daylighting.

INTRODUÇÃO	29
1.1 APRESENTAÇÃO	29
1.2 JUSTIFICATIVA	29
1.2.1 Panorama brasileiro	33
1.3 OBJETO	33
1.4 HIPOTESE	33
1.5 OBJETIVO	33
1.6 MÉTODO	34
1.7 RESULTADOS	34
1.8 ESTRUTURA	34
2 REVISÃO HISTÓRICA E ESTADO DA ARTE	39
2.1 WHITEHEAD et al. – 1984	41
2.1.1 A new device for distributing concentrated sunlight in building interiors	41
2.2 NUTTER et al. – 1988	41
2.2.1 The transmittance by a hollow specularly reflecting cylindrical light pipe of isotropically incident radiation	41
2.3 SWIFT E SMITH - 1995	44
2.3.1 Cylindrical mirror light pipes	44
2.4 SHAO et al. - 1998	45
2.4.1 Mirror lightpipes: Daylighting performance in real buildings	45
2.5 IEA – 2000	46
2.5.1 Daylight in Buildings – A Source Book on Daylighting Systems and Components	46
2.6 OAKLEY et al. - 2000	47
2.6.1 Daylight performance of lightpipes	47
2.7 ZHANG E MUNEER - 2000	47
2.7.1 Mathematical model for the performance of light pipe	47
2.8 ZHANG et al. - 2002	50
2.8.1 A design guide for performance assessment of solar light-pipes	50
2.9 CARTER – 2002	54
2.9.1 The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems	54
2.10 CALLOW – 2003	56
2.10.1 Daylighting using tubular light guide systems (Tese de Doutorado)	56
2.11 CALLOW E SHAO – 2003	56
2.11.1 Air-Clad optical rod daylighting system	56
2.12 JENKINS & MUNEER - 2003	59
2.12.1 Modelling light pipes performances – a natural daylighting solution	59
2.13 JENKINS et al. - 2005	61
2.13.1 A design tool for predicting the performances of light pipes	61
2.14 JENKINS et al. - 2005	63
2.14.1 Formulation of semi-empirical models for predicting the illuminance of light pipes	63
2.15 ROSEMAN et al. – 2005	68
2.15.1 The photometry of hollow light guides	68
2.16 ROSA – 2006	71
2.16.1 The evaluation of daylight guide systems and their impact on building design (Tese de Doutorado)	71
2.17 SWIFT et al. – 2006	72
2.17.1 Hotspots in cylindrical mirror light pipes: description and removal	72
2.18 CIE 173:2006	74
2.18.1 Technical report: tubular daylight guidance systems	74
2.19 AL-MARWAEI E CARTER - 2006	88
2.19.1 Tubular guidance systems for daylight: achieved and predicted installation performances	88
2.20 DUTTON E SHAO - 2007	92

SUMÁRIO

2.20.1	Raytracing Simulation for Predicting Light Pipe Transmittance.....	92
2.21	SWIFT et al. - 2008.....	100
2.21.1	Rectangular – section mirror light pipes.....	100
2.22	KOCIFAJ et al. - 2008.....	103
2.22.1	HOLIGILM: hollow light guide interior illumination method – an analytic calculation approach for cylindrical light tubes.....	103
2.23	KOCIFAJ - 2009.....	104
2.23.1	Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing.....	104
2.24	MOHELNILKOVA - 2009.....	104
2.24.1	Tubular light guide evaluation.....	104
2.25	LUZ – 2009.....	109
2.25.1	Condução da luz natural por sistemas não convencionais (dissertação de mestrado) 109	
2.26	LI et al. - 2010.....	115
2.26.1	An Analysis of light pipe system via full-scale measurements.....	115
2.27	BARONCINI et al. - 2010.....	116
2.27.1	Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission.....	116
2.28	SWIFT - 2010.....	117
2.28.1	Splayed mirror light pipes.....	117
2.29	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
3	ENSAIOS.....	123
3.1	ENSAIO COMO FERRAMENTA PREDITIVA.....	123
3.2	ENSAIOS E AS CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO À LUZ.....	124
3.3	DIFUSÃO DA LUZ NATURAL A PARTIR DE DUTOS DE LUZ.....	125
3.4	DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS ENSAIADOS.....	126
3.4.1	ENSAIO FOTOMÉTRICO.....	126
3.4.2	ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL.....	134
3.5	CONFEÇÃO DOS MODELOS (MAQUETES E DUTOS).....	136
3.5.1	DUTOS DE LUZ.....	136
3.5.2	MAQUETES.....	138
3.6	EQUIPAMENTOS.....	140
3.6.1	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	141
3.6.2	TEMPO DE COLETA DOS DADOS.....	141
3.6.3	CONDIÇÃO DE EXPOSIÇÃO.....	141
3.7	MEDIÇÕES.....	142
3.7.1	ENSAIO FOTOMÉTRICO.....	143
3.7.2	ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL.....	144
3.8	TRATAMENTO DOS DADOS.....	146
3.8.1	ENSAIO FOTOMÉTRICO.....	146
3.8.2	ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL.....	146
3.9	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	148
3.9.1	GRUPO 1 – ENSAIO FOTOMÉTRICO REALIZADO EM LABORATÓRIO... 148	
3.9.2	GRUPO 2 – ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL.....	153
3.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	161
4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	165
4.1	ROTEIRO DE SIMULAÇÃO NO PHOTOPA.....	167
4.2	TRATAMENTO DOS DADOS.....	181
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	183
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	188
5	PROPOSIÇÃO DE MODELO.....	193
5.1	MÉTODO DOS LUMENS.....	193
5.2	MÉTODO DAS CAVIDADES ZONAIS (ZONAL CAVITY).....	194
5.2.1	RELAÇÃO DAS CAVIDADES.....	196
5.2.2	REFLETÂNCIAS EFETIVAS DAS CAVIDADES.....	197
5.2.3	COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO DAS LUMINÁRIAS.....	198

SUMÁRIO

5.2.4	CALCULO DA EXITÂNCIA MÉDIA PELO MÉTODO DOS LUMENS.....	199
5.2.5	COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO PELO MÉTODO DOS LUMENS.....	200
5.3	MÉTODO DA OSRAM	201
5.4	DIMENSIONAMENTO DE DUTO DE LUZ	202
5.5	VALIDAÇÃO DO MDDL	205
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	216
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	219
6.1	INSERÇÃO DA PESQUISA NO ESTADO DA ARTE.....	221
6.2	APLICAÇÃO DOS RESULTADOS	222
6.2.1	USOS PRÁTICOS	222
6.2.2	USOS TEÓRICOS.....	223
6.3	DESDOBRAMENTOS FUTUROS.....	224
6.3.1	PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA.....	224
6.3.2	OUTRAS POSSIBILIDADES DE PESQUISA	225
6.4	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	226
6.5	CONSIDERAÇÃO FINAL.....	228
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	231
	APÊNDICES.....	241
	A. DADOS COLETADOS NOS ENSAIOS.....	241
	B.TABELAS COM COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO	254
	C.CURVAS POLARES	273
	ANEXOS.....	287
	A.CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO	287
	B.FREQUENCIA DE OCORRENCIA DA ILUMINANCIA DIFUSA EM PLANO HORIZONTAL PARA SÃO PAULO	291

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1. Monitoramento de dutos de luz em edifício de escritório.....	30
Ilustração 2. Proposta de duto horizontal com captação na fachada	31
Ilustração 3. Bartenbach – Laboratório Austríaco – pesquisas em iluminação	32
Ilustração 4. Procedimento de ensaio - esquema.....	77
Ilustração 5. Eficiência do condutor de luz.....	77
Ilustração 6. Eficiência do coletor.	78
Ilustração 7. Eficiência do componente de saída.	78
Ilustração 8. Eficiência da curva.	78
Ilustração 9. Zona Climática da Europa Ocidental para avaliação de sistemas condutores de luz natural – (baseado nos dados do www.satel-light.com).....	80
Ilustração 10. Valores da eficiência global. (reproduzida com permissão do Solar Project SRL)	85
Ilustração 11. Transmissão do fluxo luminoso por superfície difusora.	110
Ilustração 12. Transferência de fluxo luminoso da superfície difusa para o ponto no centro do duto.	110
Ilustração 13. Luminâncias projetadas no hemisfério unitário	112
Ilustração 14. Coroas circulares.....	113
Ilustração 15. Condições de Céu	124
Ilustração 16. Fluxograma -sistema não convencional para iluminação natural.	125
Ilustração 17. Procedimento de ensaio – esquema, CIE 173:2006.....	128
Ilustração 18. Foto da caixa de lâmpadas.	129
Ilustração 19. Esquema da caixa de lâmpadas.	130
Ilustração 20. Detalhe do ajuste na caixa de lâmpadas.	130
Ilustração 21. Corte a laser na esfera para encaixe do duto e do sensor.	131
Ilustração 22. Suporte de transição para encaixe dos dutos na esfera.....	131
Ilustração 23. Sensor utilizado na coleta dos dados de iluminância.	132
Ilustração 24. Suporte dos dutos, sensor e esfera integradora.	132
Ilustração 25. Verificação do nivelamento.	133
Ilustração 26. Lâmpada de referência com anteparo de papel cartão acoplados ao suporte de transição para encaixe na esfera.	133
Ilustração 27. Ambiente de referência – sala de aula padrão FDE.	134
Ilustração 28. Posicionamento dos sensores (luxímetros HOMIS modelo 824).	135
Ilustração 29. Anel do piranômetro com posicionamento do sensor externo.....	135
Ilustração 30. Janelas laterais vedadas e zenital comum na posição acima do ponto P5..	136
Ilustração 31. Os 36 dutos construídos.....	137
Ilustração 32. Encaixe de transição.	137
Ilustração 33. Projeto das maquetes com as várias possibilidades de abertura na cobertura.	138
Ilustração 34. Foto das maquetes – sala de aula padrão FDE.....	139
Ilustração 35. Maquetes – acabamento interno.....	139
Ilustração 36. Foto dos Equipamentos.....	140
Ilustração 37. Distância máxima entre a entrada e a fonte luminosa (caixa de lâmpadas).	142
Ilustração 38. Pano preto fosco para evitar entrada de luminosidade exterior na esfera. ..	143
Ilustração 39. Distância insuficiente para ensaiar com os dutos pequenos.	144
Ilustração 40. Localização das aberturas nas maquetes no ensaio piloto.	145
Ilustração 41. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,1m (ensaio 03/08/11).	154
Ilustração 42. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,2m (ensaio 03/08/11).	154
Ilustração 43. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,25m (ensaio 03/08/11).	154
Ilustração 44. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,3m (ensaio 03/08/11).	155
Ilustração 45. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,4m (ensaio 03/08/11).	155
Ilustração 46. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,5m (ensaio 03/08/11).	155

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 47. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,1m (ensaio 08/08/11).	156
Ilustração 48. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,2m (ensaio 08/08/11).	156
Ilustração 49. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,25m (ensaio 808/11).	156
Ilustração 50. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,3m (ensaio 08/08/11).	157
Ilustração 51. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,4m (ensaio 08/08/11).	157
Ilustração 52. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,5m (ensaio 08/08/11).	157
Ilustração 53. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 10cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.	159
Ilustração 54. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 20cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.	159
Ilustração 55. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 25cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.	159
Ilustração 56. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 30cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.	160
Ilustração 57. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 40cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.	160
Ilustração 58. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 50cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.	160
Ilustração 59. Primeira tela – abrindo um documento novo.	167
Ilustração 60. Segunda tela – importando modelo do cad.	167
Ilustração 61. Terceira tela – verificando a unidade do modelo.	168
Ilustração 62. (a) Quarta tela – ajustando as <i>layers</i>	168
Ilustração 63. (b) Quarta tela – ajustando as <i>layers</i>	169
Ilustração 64. Quinta tela – <i>design properties</i>	170
Ilustração 65. Sexta tela – ajustando os materiais.	171
Ilustração 66. Sétima tela – importando a abóbada celeste.	172
Ilustração 67. Oitava tela – verificando o ponto de inserção da abóbada celeste.	173
Ilustração 68. Nona tela – ajustando a base da abóbada a entrada do duto.	173
Ilustração 69. Décima tela – selecionando a <i>layer refl-shield</i> como <i>current</i>	174
Ilustração 70. Décima primeira tela – desenhando o ajuste da abóbada a entrada do duto.	174
Ilustração 71. (a) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.	175
Ilustração 72. (b) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.	175
Ilustração 73. (c) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.	176
Ilustração 74. (d) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.	176
Ilustração 75. Décima terceira tela – ajustando as configurações fotométricas.	177
Ilustração 76. Décima quarta tela – O Z do <i>Luminous Dimension</i>	178
Ilustração 77. Décima quinta tela – ajustando o <i>Illuminance Plane</i>	179
Ilustração 78. Décima sexta tela – verificando a posição do <i>Illuminance Plane</i>	179
Ilustração 79. Décima sétima tela – ajustando as configurações do <i>raytrace</i>	180
Ilustração 80. Décima oitava tela – iniciando a simulação.	181
Ilustração 81. Curvas polares dos dutos simulados.	184
Ilustração 82. Comparação entre os dados medidos e os simulados.	187
Ilustração 83. Comparação entre os dados calculados e os simulados.	187
Ilustração 84. Croqui com as Cavidades do recinto.	195
Ilustração 85. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,1.	214

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 86. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,2.....	214
Ilustração 87. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,25.....	215
Ilustração 88. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,3.....	215
Ilustração 89. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,4.....	215
Ilustração 90. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,5.....	216

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficientes empíricos utilizados nas equações 16 e 17.	50
Tabela 2. Área do piso iluminada por sistemas condutores de luz natural (a célula hachurada indica a economia ótima).	81
Tabela 3. Eficiência de condutores de vários diâmetros, comprimentos e refletâncias. (reproduzida com permissão do Solar Project SRL).	83
Tabela 4. Fator de utilização para componentes de saída.	86
Tabela 5. Fator de manutenção.	87
Tabela 6. Dados da lâmpada de referência do primeiro ensaio fotométrico piloto.	148
Tabela 7. Dados medidos e calculados no primeiro ensaio fotométrico piloto.	148
Tabela 8. Dados medidos e calculados no segundo ensaio fotométrico piloto.	149
Tabela 9. Dados iniciais do ensaio fotométrico.	149
Tabela 10. Dados medidos no ensaio fotométrico.	150
Tabela 11. Dados calculados a partir dos dados medidos no ensaio fotométrico.	150
Tabela 12. Fluxo luminoso calculado a partir dos dados medidos no ensaio fotométrico.	151
Tabela 13. Fluxo luminoso calculado a partir dos dados medidos no ensaio sob condições de céu real.	152
Tabela 14. Fluxo luminoso calculado a partir dos dados previstos com o MPELD.	152
Tabela 15. Eficiência do duto de luz (EDL).	153
Tabela 16. FLD para P5 (ensaio 08/08/11).	158
Tabela 17. FLD para zenital comum (ensaio 08/08/11).	158
Tabela 18. Resultado da simulação – dutos de seção 10cm de lado.	185
Tabela 19. Resultado da simulação – dutos de seção 20cm de lado.	185
Tabela 20. Resultado da simulação – dutos de seção 25cm de lado.	185
Tabela 21. Resultado da simulação – dutos de seção 30cm de lado.	186
Tabela 22. Resultado da simulação – dutos de seção 40cm de lado.	186
Tabela 23. Resultado da simulação – dutos de seção 50cm de lado.	186
Tabela 24. Comparação entre ensaio sob céu real com resultados do <i>photopia</i> (céu encoberto).	187
Tabela 25. Comparação entre resultados calculados (MPELD) com os do <i>photopia</i>	187
Tabela 26. Dimensões do ambiente de referência, RCR (coeficiente de recinto), FD (fator de depreciação) e área do ambiente de referência.	206
Tabela 27. Fluxo luminoso dos dutos calculado com iluminância externa de 20000lx.	206
Tabela 28. Fluxo luminoso dos dutos calculado com iluminância externa variável segundo o ensaio.	207
Tabela 29. Processo de cálculo do fluxo luminoso dos dutos calculado com $E_{ext}=20000lx$	208
Tabela 30. Processo de cálculo do fluxo luminoso dos dutos calculado com E_{ext} = variável.	209
Tabela 31. Coeficiente de Utilização – calculado a partir da simulação no <i>Photopia</i>	210
Tabela 32. Iluminância calculada com CU artificial e $E_{ext}=20000lx$	210
Tabela 33. Iluminância calculada com CU artificial e E_{ext} =variável.	211
Tabela 34. Coeficiente de Utilização –tabela fornecida no manual da IES para zenital natural.	211
Tabela 35. Iluminância calculada com CU natural e $E_{ext}=20000lx$	211
Tabela 36. Iluminância calculada com CU natural e E_{ext} =variável.	212
Tabela 37. Coeficiente de Distribuição – calculado a partir dos dados do ensaio sob céu real.	212
Tabela 38. Iluminância calculada com $CD=3$ e E_{ext} =variável.	213
Tabela 39. Iluminância medida no ensaio 08/08/11 (P5).	213
Tabela 40. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.	241
Tabela 41. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.	242
Tabela 42. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 20cm.	242
Tabela 43. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 20cm.	243

LISTA DE TABELAS

Tabela 44. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 25cm.....	243
Tabela 45. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 25cm.....	244
Tabela 46. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 30cm.	244
Tabela 47. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 30cm.....	245
Tabela 48. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.	245
Tabela 49. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.....	246
Tabela 50. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 50cm.....	246
Tabela 51. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 50cm.....	247
Tabela 52. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.....	247
Tabela 53. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.....	248
Tabela 54. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 20cm.....	248
Tabela 55. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 20cm.....	249
Tabela 56. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 25cm.....	249
Tabela 57. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 25cm.....	250
Tabela 58. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 30cm.....	250
Tabela 59. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 30cm.....	251
Tabela 60. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.....	251
Tabela 61. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.....	252
Tabela 62. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 50cm.....	252
Tabela 63. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 50cm.....	253
Tabela 64. Coeficiente de Utilização para zenital natural.....	254
Tabela 65. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x1m.....	255
Tabela 66. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x1m.....	255
Tabela 67. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x1m.....	256
Tabela 68. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x1m.....	256
Tabela 69. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x1m.....	257
Tabela 70. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x1m.....	257
Tabela 71. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x1,5m.....	258
Tabela 72. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x1,5m.....	258
Tabela 73. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x1,5m.....	259
Tabela 74. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x1,5m.....	259
Tabela 75. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x1,5m.....	260
Tabela 76. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x1,5m.....	260
Tabela 77. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x2m.....	261
Tabela 78. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x2m.....	261
Tabela 79. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x2m.....	262
Tabela 80. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x2m.....	262

LISTA DE TABELAS

Tabela 81. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x2m.....	263
Tabela 82. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x2m.....	263
Tabela 83. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x3m.....	264
Tabela 84. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x3m.....	264
Tabela 85. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x3m.....	265
Tabela 86. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x3m.....	265
Tabela 87. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x3m.....	266
Tabela 88. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x3m.....	266
Tabela 89. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x4m.....	267
Tabela 90. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x4m.....	267
Tabela 91. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x4m.....	268
Tabela 92. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x4m.....	268
Tabela 93. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x4m.....	269
Tabela 94. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x4m.....	269
Tabela 95. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x5m.....	270
Tabela 96. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x5m.....	270
Tabela 97. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x5m.....	271
Tabela 98. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x5m.....	271
Tabela 99. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x5m.....	272
Tabela 100. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x5m.....	272

ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BRE	British Research Establishment
BTDF	Bidirectional Transmittance Distribution Function
CC	Componente Celeste
CD	Coeficiente de Distribuição
CU	Coeficiente de Utilização
CIE	Comission Internationale d'Éclerage
CRE	Componente de Reflexão Externa
CRI	Componente de Reflexão Interna
DCRL	Diagrama de Contribuição Relativa de Luz
DF	Daylight Factor
EDL	Eficiência em Dutos de Luz
FLD	Fator de luz do dia
IES	Illuminating Engineering Society
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
MDDL	Modelo para Dimensionamento de Sistemas de Iluminação com dutos de luz
MPELD	Modelo Preditivo de Eficiência Luminosa em Dutos
NBR	Normas Brasileiras
RCR	Coeficiente do Recinto

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Do ponto de vista dos modelos matemáticos para avaliação e dimensionamento de dutos de luz, Carter (2002) coloca que métodos preditivos de dutos de luz natural podem ser divididos, convenientemente, em duas partes: a primeira é a estimativa da quantidade de luz que sai do sistema e a segunda é a análise de como ocorre a distribuição da luz no ambiente.

Dos modelos preditivos propostos, alguns são destinados a primeira parte, fornecendo a eficiência do condutor a partir da transmitância do duto. Outros, apresentam modelos mais completos, os quais utilizam a transmitância do duto e o fluxo luminoso emitido para calcular a distribuição da luz no ambiente e prever a iluminância requerida média ou em um ponto do ambiente, sendo possível assim, determinar o número e a dimensão dos dutos necessários para iluminar determinado ambiente.

Para estudar modelos preditivos da eficiência e distribuição luminosa de dutos de luz, Carter (2002) considera que a combinação do fluxo luminoso emitido e da distribuição da intensidade luminosa é a base para proposição de métodos preditivos da iluminância em ambientes.

Esta pesquisa concentra-se em, considerando o fluxo luminoso emitido por dutos de luz espelhados, com seção quadrada, dimensionar sistemas de iluminação natural com dutos de luz, considerando a iluminância média no plano de trabalho para determinar o número de dutos necessários.

1.2 JUSTIFICATIVA

As pesquisas que estudam dutos de luz podem ser separadas em seis grupos: (1) coletâneas sobre sistemas existentes, (2) monitoramentos em edifícios que possuem o sistema instalado, (3) modelagem matemática preditiva, (4) simulações computacionais preditivas, (5) comparações entre a eficiência de sistemas diferentes e (6) proposição de novos sistemas.

Coletâneas contendo sistemas não convencionais para iluminação natural foram encontradas nos levantamentos apresentados em dissertações de mestrado (GARROCHO e AMORIM, 2006) (MACÊDO, 2002), em teses de doutorado

CAPÍTULO I

(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.

Dentre as pesquisas que 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) destacam-se: Shao et al., (1998); Zhang e Munner, (2000), Oaklley et al., (2000); Zhang et al., (2002); Al-Marwae e Carter, (2006); Mohelnikova, (2009); Li et al., (2010). Esses levantamentos (Ilustração 1), 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.

Ilustração 1. Monitoramento de dutos de luz em edifício de escritório.

Fonte: AL-MARWAE e CARTER (2006)

A maior parte dos trabalhos de modelagem teórica e experimental do desempenho e distribuição luminosa de dutos de luz objetiva prever a eficiência de dutos de luz tubulares, os quais são disponíveis no mercado. Estes são dotados de domos acrílico transparente, condutor com alta refletância interna (99%) e difusor opalino. São exemplos desse tipo de proposta o método do fator geométrico apresentado por Nutter et al. (1988), o modelo da transmitância em dutos cilíndricos de Swift e Smith (1995), O fator de penetração solar (DPF) apresentado por Zhang e Munner (2000). No entanto, existem alguns poucos trabalhos que se dedicam a propor modelos preditivos para novas tipologias, adaptando os modelos voltados aos dutos circulares, ou propondo novas formulações, como o modelo proposto por Swift et al., (2008) para dutos espelhados com seção retangular, o MPELD

apresentado por Luz (2009) para dutos espelhados com seção quadrada e a adaptação de Swift (2010) para dutos com seção retangular chanfrados na entrada.

Das modelagens propostas, algumas são programadas em rotinas computacionais, visando facilitar a predição por projetistas e permitindo visualizar as distribuições de iluminâncias no plano de trabalho, como é o caso do *luxplots*, proposto por Jenkins e Muneer (2003) e o *holigilm* apresentado por Kocifaj et al., (2009). Outras fornecem ferramentas para desenvolvimento do sistema por meio de rápidas reavaliações dos protótipos, como ocorre com o software *photopia*.

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.

No 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 2). 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 2. Proposta de duto horizontal com captação na fachada

Fonte: CANZIANI et al. (2004)

CAPÍTULO I

No estudo de dutos de luz destacam-se os grupos de pesquisa liderados pelo Tariq Muneer em Napier University, em Edimburgo no Reino Unido, Li Shao em De Montfort University, em Leicester na Inglaterra e David Carter na Universidade de Liverpool, em Liverpool na Inglaterra. A Universidade de Nottingham, foi um grande centro de pesquisa voltada para estudos de dutos de luz, durante a permanência do Dr Li Shao entre seus professores, destacando-se pela coleta de dados empíricos que alimentou várias pesquisas, resultando em modelos preditivos. O laboratório austríaco Bartenbach, é uma referência no estudo de sistemas voltados a iluminação, juntamente com a Light Academy, desenvolve e testa sistemas não convencionais de iluminação, entre eles, os dutos de luz.

heliostato

duto de luz

estudo de percepção

Ilustração 3. Bartenbach – Laboratório Austríaco – pesquisas em iluminação

Fonte: www.bartenbach.com acessado em 30/07/2014.

Com relação aos fabricantes e comercializadores de sistemas não convencionais, do tipo duto de luz, destacam-se: *Velux*¹, *Heliobus*² e *Solatube*³, sendo que esta última está sendo comercializada no Brasil pela *Naturalux*⁴. 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

¹ Disponível em: www.veluxusa.com, acessado em 30/07/2014.

² Disponível em: www.heliobus.com, acessado em 30/07/2014.

³ Disponível em: www.solatube.com, acessado em 30/07/2014.

⁴ Disponível em: www.naturalux.com.br, acessado em 30/07/2014.

Infinity garantindo alta refletividade (99,7%) segundo informações do catálogo do fabricante.

1.2.1 Panorama brasileiro

Foram levantadas quatro dissertações de mestrado que abordam os dutos de luz nos últimos anos. Sendo que apenas uma apresenta um modelo preditivo proposto (LUZ, 2009), os demais são estudos de tipologias, como o trabalho apresentado por Silva (2005) que compara resultados de ensaio com maquete em escala reduzida de dutos espelhados com diferentes seções (quadrada e retangular) com sistemas convencionais de iluminação natural (janelas). Soto (2010) avalia por meio de simulação computacional (TropLux) a possibilidade de implantar dutos de luz para melhorar a iluminação de ambientes residenciais constituídos por unidades habitacionais de baixa renda (favelas). Toledo (2013), define, por meio de simulações com o software TropLux e ensaios com protótipos de dutos de luz, parâmetros para auxiliar no projeto de dutos com foco para aplicação em ambiente residencial.

1.3 OBJETO

O objeto de estudo desta pesquisa é o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz de seção quadrada, espelhados internamente.

1.4 HIPÓTESE

Parte-se da hipótese de que o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, pode ser obtido por meio de modelagem matemática similar a aplicada no dimensionamento de sistemas artificiais e naturais de iluminação.

1.5 OBJETIVO

O objetivo é a proposição de um modelo matemático para o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, partindo da eficiência do duto de luz (EDL) e, considerando o nível de iluminância média a ser garantida no plano de trabalho, fornecer o número de dutos necessários.

CAPÍTULO I

1.6 MÉTODO

O método utilizado é experimental indutivo (ensaio com modelos de dutos de luz em escala reduzida para aquisição de dados de iluminância), apoiado por método dedutivo computacional (verificação de resultados empíricos) e análise comparativa dos resultados. Os resultados da análise comparativa forneceram subsídios para a proposição de modelagem matemática. Essa é desenvolvida com base nos métodos dos lumens e das cavidades zonais, verificando-se sua aplicabilidade por meio da correlação de seus resultados com os observados empiricamente nos ensaios realizados.

1.7 RESULTADOS

Os produtos finais da pesquisa são: (1) procedimento para ensaio de dutos de luz sob condições de céu real (com ambiente de referência, para verificar a distribuição de iluminâncias no plano de trabalho) e artificial (fotométrico em laboratório, para obtenção do fluxo luminoso emitido), (2) roteiro de simulação no software *photopia* para dutos de luz, (3) proposição do coeficiente empírico CD (coeficiente de distribuição), para ajuste do modelo proposto, (4) proposição do modelo para dimensionamento de sistemas de iluminação com dutos de luz (MDDL).

1.8 ESTRUTURA

A tese está estruturada em seis capítulos mais referências bibliográficas.

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

No segundo capítulo são apresentados os modelos preditivos da eficiência e distribuição luminosa de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, estes foram organizados pela data cronológica de suas publicações.

No terceiro 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 quarto capítulo são apresentadas as simulações no software *photopia*, incluindo um roteiro de simulação para dutos de luz. Os dados obtidos nas simulações foram fundamentais para verificação do modelo proposto e auxiliaram na concepção do CD (coeficiente de distribuição) proposto.

No quinto capítulo é apresentado o modelo do dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz (MDDL), resultante do embasamento teórico do capítulo segundo, exploração e aprofundamento dos métodos dos lumens e cavidades zonais e verificação por meio dos resultados obtidos no estudo experimental do capítulo terceiro.

No sexto, 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, limitações do estudo e possíveis desdobramentos futuros, considerando a continuação dessa e outras pesquisas correlatas.

CAPÍTULO II
REVISÃO HISTÓRICA E ESTADO DA ARTE

2 REVISÃO HISTÓRICA E ESTADO DA ARTE

Este capítulo revisa as pesquisas sobre distribuição da luz natural a partir de dutos de luz, especificamente os modelos matemáticos preditivos da eficiência luminosa, propostos por diversos autores, por meio de exploração teórica dos fenômenos físicos relativos a iluminação natural e pesquisas empíricas.

Houve um avanço significativo referente a tecnologias voltadas para o transporte de luz natural em edifícios, pesquisas por novas tecnologias estão sendo desenvolvidas e o conhecimento nessa área está em franco crescimento. Diversos dispositivos voltados à iluminação foram projetados e pesquisados para melhorar a qualidade da iluminação natural, para aumentar a aceitação do usuário e para proporcionar ferramentas aos projetistas destinadas a especificar e dimensionar esses sistemas.

Várias foram as razões que motivaram pesquisadores do mundo todo a se interessarem por estudar os dutos de luz, e principalmente em desenvolver modelos capazes de prever sua eficiência, além de fornecer a arquitetos e projetistas ferramentas capazes de dimensionar sistemas de iluminação natural que utilizem os dutos de luz. Entre essas razões estão: o aquecimento global e a deterioração da camada de ozônio, o que tem estimulado o interesse no uso de sistemas que consomem energias renováveis, como é o caso dos dutos, e que minimizam o consumo de energia, além de não poluírem o meio ambiente (SHAO et al, 1998).

Zhang e Muneer (2000) lembram que durante os últimos vinte anos tem despertada a atenção mundial para problemas com o aquecimento global e a poluição do ar devido a queima de combustíveis fósseis e a emissão de gases poluentes como o CO₂. Com isso a exploração de recursos como a luz natural tem significado economia por volta de 20% a 40% em edifícios de escritórios. Assim o uso de tecnologias, como os dutos de luz, representa economia de energia e proteção ambiental. A inclusão da luz natural nos locais de trabalho traz ainda benefícios sociais e psicológicos aos usuários (ZHANG et al, 2002).

Callow e Shao (2003) afirmam ser possível obter um grande impacto no uso de luz artificial, durante o período de ocupação dos edifícios, por meio do uso de luz natural. Programas de economia de energia, focados na utilização da radiação solar e no conforto visual, optam pela aplicação dos dutos de luz, pois são capazes de

CAPÍTULO II

levar luz de qualidade, inclusive, a ambientes sem contato direto com o meio externo (MOHELNIKOVA, 2009).

Li et al., (2010) ressalta a realidade de Hong Kong com seus edifícios altíssimos e extremamente próximos uns aos outros o que torna o acesso a luz natural muito difícil. No entanto, por meio do uso de dutos de luz torna-se possível trazer a iluminação natural a esses edifícios, promovendo a economia de energia, minimizando os impactos no meio ambiente, além de ser o elemento de conexão com o ambiente externo. Os dutos de luz nesse contexto tornam-se uma alternativa de percepção da realidade externa, conforto visual, psicológico e ambiental.

Baroncini et al., (2010) defende que toda atividade humana torna-se melhor se realizada na presença da luz natural. Desse modo, os dutos de luz são apropriados como sistema capaz de melhorar a distribuição de luz nos ambientes iluminados por janelas laterais ou desprovidos de aberturas, além de contribuir para a economia de energia. No entanto, o uso de dutos de luz não garante contato visual com o exterior.

Para a organização desse capítulo foram pesquisados e levantados trabalhos desde 1984 até 2014. A seguir estão apresentados comentários dos aspectos relevantes dos trabalhos estudados, analisados e organizados em ordem cronológica.

2.1 WHITEHEAD *et al.* – 1984

2.1.1 A new device for distributing concentrated sunlight in building interiors

Esse trabalho apresenta um sistema de duto prismático com um heliostato de grande dimensão, que fica no telhado do edifício, e redireciona a luz do sol dentro do duto conduto. A luz é difundida no ambiente por dutos horizontais que possuem um sistema que seleciona se a luz emitida é artificial ou natural dependendo da disponibilidade desta última.

O sistema todo é controlado por computador, na cobertura para garantir que o heliostato seja posicionado da melhor maneira possível, garantindo máxima aquisição de luz solar durante o período de disponibilidade desta. E no ambiente interno para selecionar o tipo de sistema que deve atuar na iluminação, natural ou artificial.

Os autores apresentam uma análise econômica do sistema, incluindo o *pay back* e concluem que sistemas de iluminação natural baseados em dutos de luz prismáticos tem alto potencial tanto em termos do desempenho físico como econômico. Mesmo considerando os elevados custos iniciais de aquisição e instalação do sistema, a economia de energia elétrica e com manutenção ao longo do tempo justifica sua implementação. Além disso, o uso desses sistemas garante uma luz de alta qualidade, com baixo impacto ambiental e benefícios a saúde dos usuários.

2.2 NUTTER *et al.* – 1988

2.2.1 The transmittance by a hollow specularly reflecting cylindrical light pipe of isotropically incident radiation

Em 1998 nasce a primeira formulação matemática de transmissão da luz por dutos altamente refletores a partir da necessidade de um telescópio de partículas. Uma expressão simples da transmitância, em uma cavidade cilíndrica de um duto de luz iluminado por radiação incidente isotrópica, é função do tamanho e da refletância das superfícies internas. São derivadas usando um método baseado no fator geométrico do telescópio de partículas. As predições foram confirmadas pelo Método de Monte Carlo e por medições experimentais.

CAPÍTULO II

A equação matemática proposta foi baseada na teoria apresentada a seguir. A probabilidade de um fóton que entra no duto alcançar a saída após exatamente N interações é:

$$b_N = \exp\left(-\frac{x_N}{L}\right) \rho^N (\lambda \cdot \alpha) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

N é o número de interações;

b_N é a probabilidade do fóton sair a exatas N reações.

L é a atenuação devida ao meio e ao comprimento ($L=L(x)$);

X_N é o total da distância percorrido no meio (cm);

λ é o comprimento de onda da luz (nm);

α é o ângulo de incidência ($^\circ$);

ρ é a refletância interna.

A probabilidade de N interações ocorrer é função da performance do duto de luz e da distribuição da luz incidente na entrada do tubo. Se P_N é a probabilidade que um fóton interage exatamente N vezes quando $L \rightarrow \infty$ e $\rho \equiv 1$ então:

$$\sum_{N=0}^{\infty} \rho_N = 1 \quad \text{Equação 2}$$

A transmitância, fração da luz incidente que sai do duto, é:

$$T = \sum_{N=0}^x P_N b_N = \sum_{N=0}^x P_N \cdot \exp\left(-\frac{x_N}{L}\right) \rho^N (\lambda \cdot \alpha) \quad \text{Equação 3}$$

Se a distância média percorrida pelo pulso de luz for muito menor que a atenuação no meio devido ao comprimento, então, devemos usar $\exp(-x_N/L)$ igual a unidade. Se for determinado que existe apenas uma pequena dependência da refletância sobre o ângulo de incidência e o comprimento de onda na região espectral apropriada, então devemos ignorar essa dependência e a expressão simplificada da transmitância da luz no duto é:

$$T = \sum_{N=0}^x P_N \rho^N \quad \text{Equação 4}$$

➤ Método do fator geométrico

Uma formula analítica simples da transmitância em dutos de luz cilíndrico pode ser facilmente derivada. A derivação apresentada usa o conceito do fator geométrico do telescópio de partículas.

O fator geométrico (m_2sr) é a medida de aceitação de um dispositivo. Isto é definido como sendo a integral da área e do ângulo sólido dos elementos do telescópio.

A expressão analítica para o fator geométrico de dois discos coaxiais de raio α e separação (altura) h é:

$$G(\alpha, h) = \frac{\pi^2}{2} \{ (2\alpha^2 + h^2) - [(2\alpha^2 + h^2)^2 - 4\alpha^4]^{1/2} \} \quad \text{Equação 5}$$

O fator geométrico de um único disco de raio α é:

$$G'(\alpha) = \pi^2 \alpha^2 \quad \text{Equação 6}$$

Para um duto de luz cilíndrico de raio R e comprimento H é dado que P_0 , a probabilidade que não tenha nenhuma interação no duto de luz, é:

$$P_0 = \frac{G(R, H)}{G'(R)} \quad \text{Equação 7}$$

A formula geral para calcular P_N é dada por um recurso de relação:

$$\frac{G\left(R, \frac{H}{N+1}\right)}{G'(R)} = P_0 + \frac{NP_1}{N+1} + \frac{(N-1)P_2}{N+1} + \dots + \left(\frac{1}{N+1}\right)P_N \quad \text{Equação 8}$$

➤ Método de Monte Carlo

O estudo do duto de luz cilíndrico utilizando o método de Monte Carlo foi realizado para verificar os resultados obtidos com o método do fator geométrico proposto.

O método de Monte Carlo segue os raios, e por ser um método computacional consegue seguir muitos raios, o que o torna bem preciso.

Os resultados obtidos por meio da comparação entre o método de Monte Carlo e o método geométrico proposto foram excelentes. Ambos os métodos predisseram que 63,3% dos fótons que entraram no duto saíram, sendo a refletância interna igual a 0,8.

CAPÍTULO II

No estudo experimental foi utilizado uma caixa integradora pintada com uma tinta especial que reflete as cores azul, verde e vermelha, emitida pelos LEDs. Essa caixa foi perfeitamente ajustada ao duto cilíndrico. A tinta usada criou uma distribuição isotrópica da luz na base do duto. Os fótons eram detectados com e sem o duto por um sensor e todo o conjunto era colocado em uma caixa negra para eliminar toda a interferência da luz externa.

Duas medições foram necessárias para determinar a transmitância total do duto de luz, sendo uma com o duto e a outra sem.

Os resultados obtidos tanto nos ensaios, como com os métodos geométrico e de Monte Carlo são coerentes e compatíveis. Com isso, o autor conclui que a transmitância de qualquer duto cilíndrico pode ser facilmente calculada a partir da altura, raio e refletância das superfícies internas.

Como produto final o autor fornece um gráfico que relaciona a transmitância com a altura e o raio do duto para vários valores de refletância interna, facilitando o dimensionamento de sistemas de iluminação com dutos cilíndricos, por arquitetos, na fase de projeto.

2.3 SWIFT E SMITH - 1995

2.3.1 Cylindrical mirror light pipes

Neste trabalho a transmissão da luz é calculada utilizando o método do raio óptico, o qual resulta em uma equação integral que correlaciona os parâmetros devidos ao duto (refletância, razão de aspecto) com o ângulo de incidência da luz.

O método proposto é uma adaptação ao método do Zastrow e Wittwer (1986) e tem como parâmetro mais importante a refletância do duto. A transmissão luminosa é obtida em função do ângulo de incidência da radiação com raios paralelos e a razão de aspecto (aspect ration).

O método foi verificado por estudo experimental utilizando uma esfera integradora e um laser de raios paralelos. O duto foi revestido por um filme da 3M chamado de Silverlux, sendo uma cobertura prata em uma película plástica. A refletância dessa película foi medida com um espectro fotômetro.

Esse trabalho apresenta um modelo matemático preditivo confirmado por estudo experimental em laboratório.

$$T = (4/\pi) \int_{s=0}^1 [s^2 / (1-s^2)^{1/2}] R^{\text{int}(\rho \tan \theta / s)} \times \{1 - (1-R)[\rho \tan \theta / s - \text{int}(\rho \tan \theta / s)]\} d_s$$

Equação 9

Onde:

T é a transmitância do duto;

R é a refletância interna ao duto;

ρ é a razão de aspecto do duto;

θ é o ângulo entre a luz incidente e o eixo do duto ($^\circ$);

Int é a função de número inteiro;

2.4 SHAO *et al.* - 1998

2.4.1 Mirror lightpipes: Daylighting performance in real buildings

Os autores apresentam um monitoramento realizado em quatro edifícios diferentes (comercial, residencial, educacional e saúde) para comparar o desempenho destes.

Como parte do monitoramento, foram medidos a distribuição e os níveis de iluminância interno e a iluminância externa, com isso foi calculada a relação entre eles. Os ocupantes foram questionados sobre a satisfação com o sistema de iluminação por dutos de luz.

Foram utilizados dutos com alta refletância interna de 330mm e 530mm de diâmetro com comprimentos entre 0,6 e 12m, com razão de aspecto de 2 a 30 e número de cotovelos variando de 0 a 4.

O método de cálculo utilizado na predição da transmissão luminosa foi o apresentado por Swift e Smith (1995).

Os autores consideram que a atratividade dos dutos de luz em comparação a zenital comum se deve a flexibilidade em atravessar telhados, menor perda de calor durante o inverno e distribuição da luz mais uniforme, além do potencial para atravessar vários andares.

No edifício comercial foram instalados, em uma sala de espera enclausurada, 8 dutos de 330mm de diâmetro, com comprimento variando de 8 a 12 m e 4 cotovelos, a refletância interna é de 95%.

CAPÍTULO II

Na clínica médica foram instalados 4 dutos na sala de curativos, todos retos e com 6m de comprimento.

Na residência, do tipo flat de 2 andares, foram instalados 2 dutos, sendo um na escada e outro no corredor. Ambos com 330mm de diâmetro, sendo que o da escada tem 6m de comprimento e 2 cotovelos e o do corredor é reto com 1,8m de comprimento.

Na escola, foram instalados 9 dutos em grelha, estes foram locados no centro do ambiente para complementar a iluminação natural existente, sendo 7 com 1,65m de comprimento e 2 com 1,2m de comprimento.

Os resultados mostraram que dutos de luz são alternativas interessante para trazer luz natural aos edifícios, com aprovação dos usuários. No entanto, o projeto deve ser cuidadoso, minimizando curvas e razões de aspecto muito grandes, o que prejudica o desempenho do sistema.

2.5 IEA – 2000

2.5.1 Daylight in Buildings – A Source Book on Daylighting Systems and Components

Esse livro traz uma seleção de sistemas inovadores de iluminação natural, sendo estes projetados para redirecionar a luz do sol ou da abóbada celeste para áreas de interesse, sem, no entanto, produzir ofuscamento. Estes utilizam ferramentas óptica que por meio da reflexão, refração e ou reflexão total transportam a luz do céu e do sol. Os quais, podem ser ativos, e buscarem o sol, ou passivos. Os sistemas incluídos nesse livro são geralmente passivos.

São apresentadas informações sobre ferramentas simples, capazes de prever desempenho e serem utilizadas por não especialistas. Existe a preocupação em introduzir conceitos que levem ao uso apropriado das proteções solares e dos sistemas elétricos, a fim de promover a economia de energia.

As informações apresentadas demonstram o uso de tecnologias avançadas em iluminação natural, as quais podem solucionar lacunas entre os benefícios em potencial e o que tem sido praticado nos edifícios.

Esse livro de referências é inovador e tem características didáticas importantes, sendo de fácil utilização, tanto por especialistas, como por usuários menos capacitados. Ideal para o primeiro contato com a iluminação natural e seus

desdobramentos, dando um panorama geral que vai dos conceitos e fenômenos físicos relativos a luz natural, passando por sistemas e tecnologias existentes, sendo completado pelos métodos e modelos de cálculos preditivos manuais e computacionais.

2.6 OAKLEY *et al.* - 2000

2.6.1 Daylight performance of lightpipes

Este trabalho apresenta o monitoramento de seis dutos de luz em 3 ambientes diferentes: um workshop, uma residência e um escritório. Todos os dutos apresentavam domo transparente, revestimento interno refletor e difusor na saída.

As medições não foram simultâneas, eram realizadas em um ponto externo e em seguida em um ponto interno, depois outra tomada externa e o segundo ponto interno e assim por diante. As medidas foram feitas de meia em meia hora das 9h às 17h. Desses dados foram retiradas as médias e calculados os DF (Daylight Factor) ou FLD (Fator de Luz Diurna).

Os resultados apresentaram níveis satisfatórios de iluminância chegando a 100% de eficiência do sistema, em um escritório, com níveis superiores a 300 lx das 10h às 15h.

2.7 ZHANG E MUNEER - 2000

2.7.1 Mathematical model for the performance of light pipe

Esse artigo também é citado por Dutton e Shao, 2008 no artigo *Raytracing Simulation for Predicting light pipe transmittance* e por outros pesquisadores diversos de modelos preditivos de dutos de luz.

Esse modelo apresenta uma forma modificada de fator de luz do dia (FLD), que considera a luz admitida por sistemas sofisticados como os dutos de luz. Este ainda identifica os parâmetros que tem influência na iluminância que é transmitida pelos dutos.

Para a realização do trabalho foi adotado um duto reto sem cotovelos com domos transparente e difusor na saída de 330mm de diâmetro e 0,95 de refletância interna, o qual foi instalado em uma casa típica escocesa (a casa do Dr. Tariq Muneer) e foram tomadas medidas sob todas as condições climáticas locais. O valor máximo de iluminância obtido foi de 512 lx, sendo a média por volta de 138lx.

CAPÍTULO II

A média do Fator de Penetração da Luz (DPF) foi de 25%. Esses dados foram utilizados para desenvolver e validar outros modelos.

Os dados apresentados nesse artigo é parte de uma pesquisa maior de parceria entre a Universidade de Napier e a empresa Monodraught (UK) Ltda para medir e validar modelos matemáticos preditivos do desempenho de dutos de luz.

A análise dos resultados obtidos mostrou que o Fator de Luz do Dia (DPF) para duto de luz é definido como a razão entre a iluminância interna pela iluminância externa global, sendo função do índice de turbidez do céu (índice de claridade do céu ou condição da abóbada celeste), da altura solar e de fatores ligados a geometria do duto. Partindo dessa análise, dois modelos foram desenvolvidos, sendo um mais simples e outro mais completo.

Esse artigo cita o trabalho do Zastrow e Wittwer (1986), o qual apresenta uma formulação simples que correlaciona a transmitância do duto espelhado com a refletância da superfície interna (ρ), o ângulo de incidência da luz e o eixo do duto (θ), o comprimento do duto e o diâmetro efetivo do duto (d_{eff}).

$$T = \rho^x \quad \text{Equação 10}$$

$$x = L \tan(\theta / d_{eff}) \quad \text{Equação 11}$$

A definição de DPF (fator de penetração ou fator de luz diurna para duto de luz) é a razão entre a iluminância interna obtida em um ponto, de um dado ambiente interno, pelo total de iluminância externa. Considerando um ponto P interno ao ambiente onde o duto de luz é a única fonte de luz disponível.

$$E_{int} = E_{ext} \cdot DPF \quad \text{Equação 12}$$

O modelo proposto usa três parâmetros para descrever a geometria e os fatores climáticos que afetam o desempenho do duto de luz. Os fatores geométricos que devem determinar o desempenho do duto de luz são: o comprimento, o diâmetro, a altura do domo, o fator de visão de céu do duto e a distância entre o difusor e o ponto no interior do ambiente.

A radiação externa capturada pelo duto tem a componente direta e a difusa. A relação dessas duas componentes se dá pelo índice de claridade do céu (K_t).

Para céu encoberto: $0 < K_t \leq 0,2$

Para céu parcialmente encoberto: $0,2 < K_t \leq 0,6$

Para céu claro: $0,6 < k_t < 1$

A altura solar é incluída no modelo para fixar a posição do sol na abóbada celeste. Para projetar um duto de luz o fator de penetração de luz diurna DPF pode ser definido como:

$$DPF = f(D, K_t, \alpha_s) \quad \text{Equação 13}$$

Para o processamento dos dados obtidos, a primeira ideia foi usar o princípio da Lei do Inverso do Quadrado da Distância considerando os ângulos de incidência e de emissão a partir do duto:

$$E = \frac{I \cos \theta_e \cdot \cos \theta_i}{D^2} \quad \text{Equação 14}$$

Mas considerando a área do quarto em estudo e o tamanho do duto instalado (diâmetro da saída) foi concluído que essa fonte não é uma fonte pontual. Desse modo, para ser preciso seria necessário integrar todos os pontos do difusor da saída. Devido à dificuldade dessa solução, foi feita a primeira aproximação no modelo.

$$DPF = A(1/D)^2 \quad \text{Equação 15}$$

Onde A é um parâmetro que depende da posição do sol e da condição de claridade do céu. Essa equação resultante é uma adaptação empírica. Por meio das medições e cálculos os autores concluem que há influência do K_t e α_s no valor do DPF.

O DPF é influenciado pela distância (D) do difusor até o ponto no plano de trabalho(P), altitude solar (α_s) e índice de claridade solar (K_t), assim sendo, foi proposto o modelo da equação 16:

$$DPF_{(x,y,z)} = (a_0 + a_1\alpha_s + a_2\alpha_s^2 + a_3k_t + a_4k_t^2 + a_5\alpha_s k_t + a_6\alpha_s^2 k_t + a_7\alpha_s k_t^2 + a_8\alpha_s^2 k_t^2)/D^2$$

Equação 16

A equação 16 foi simplificada resultando na equação 17:

$$DPF_{(x,y,z)} = (a_{10} + a_{11}\alpha_s + a_{12}\alpha_s^2 + a_{13}k_t + a_{14}k_t^2 + a_{15}\alpha_s k_t)/D^2 \quad \text{Equação 17}$$

Os valores dos coeficientes empíricos utilizados nas equações 16 e 17 estão apresentados na tabela 1:

CAPÍTULO II

Tabela 1. Coeficientes empíricos utilizados nas equações 16 e 17.

α_{00}	α_{01}	α_{02}	α_{03}	α_{04}	α_{05}	α_{06}	α_{07}	α_{08}
0.053	0.032	0.000	1.952	-1.878	-0.140	0.002	0.146	-0.002
α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}			
0.407	0.008	0.000	-0.149	0.266	0.002			

Para encontrar a iluminância estimada (E_{est}) no ponto $P_{(x,y,z)}$ do plano de trabalho, onde G é a iluminância externa global e K_g é a eficácia luminosa global como dada por Muneer e Kinghorn (2000) na equação 19:

$$E_{est(x,y,z)} = DPF_{(x,y,z)} GK_g \quad \text{Equação 18}$$

$$K_g = 136.6 - 74.541k_t + 57.3421k_t^2 \quad \text{Equação 19}$$

Foram feitas análises estatísticas com os resultados obtidos e estas apresentaram altas correlações entre os dados medidos e os calculados.

2.8 ZHANG *et al.* - 2002

2.8.1 A design guide for performance assessment of solar light-pipes

Esse artigo é um desdobramento do artigo *Mathematical model for the performance of light pipe* de Zhang e Muneer (2000), agora descrevendo dois modelos preditivos do desempenho de dutos de luz, sendo um para dutos retos e o outro para dutos com cotovelos. Os modelos predizem a luz natural obtida por dutos, com alta precisão, apresentando correlação de R^2 por volta de 0,95 e 0,97 para as regressões realizadas a partir de dados medidos e calculados.

O desempenho dos dutos de luz depende de alguns fatores como o comprimento do duto, o diâmetro do duto, o número de cotovelos e o ângulo desses cotovelos, o tipo de difusor e dos fatores ambientais externos.

Esse artigo apresenta o Fator de Penetração da Luz do Dia para dutos (DPF) como sendo a razão entre a iluminância interna pelo total de iluminância externa.

$$E_{int} = E_{ext} \cdot DPF_{(x,y,z)} \quad \text{Equação 20}$$

Dutos de luz são sistemas que utilizam tanto a luz direta do sol quanto a luz difusa do céu. Portanto, quando o céu é claro a altura solar (α_s) influencia na transmissão da luz solar no interior do duto. No entanto, quando o céu é encoberto ou parcialmente encoberto a posição do sol se torna menos importante. Por isso, a

transmitância da luz é considerada como sendo função da altura solar (α_s) e da claridade do céu (K_t). Partindo disso, Zhang e Muneer definiram a equação semi-empírica:

$$DPF_{(x,y,z)} = (a_0 + a_1\alpha_s + a_2\alpha_s^2 + a_3k_t + a_4k_t^2 + a_5\alpha_s k_t) / D^2 \quad \text{Equação 21}$$

Onde D é a distância do difusor ao ponto P no plano de trabalho.

Essa equação é apenas para dutos retos, sem cotovelos, no entanto, um modelo preditivo do desempenho de dutos generalizado deveria considerar todos os tipos de dutos, as condições climáticas e os fatores geométricos.

O modelo apresentado foi comparado aos dados coletados em ensaios realizados com dois ambientes de teste. Um localizado em local plano e sem obstruções no Campus de Craighouse na Universidade de Napier UK. Este tinha 3m x 2,4m com pé direito de 2,5 e foi todo revestido de compensado com todas as juntas e a porta vedadas para evitar o acesso da luz externa. O outro ambiente de teste foi em Currie, e este serviu apenas para testar os difusores de dois tipos, sendo um domo de policarbonato branco e o outro plano transparente de plástico translúcido com efeito cristal. Os dados foram coletados por sensores ligados a um datalogger e a um computador.

Em Craighouse foram instalados 8 dutos com diversas configurações, indo do reto ao com vários cotovelos. Os diâmetros variavam de 210mm, 330mm, 420mm e 530mm. Todos os dutos tinham domo em policarbonato transparente e tubo revestido com 610m de alumínio prateado e um difusor opaco de policarbonato na saída.

Os diversos dutos foram ensaiados por um período de 4 meses sob diversas condições de céu. Os valores de K_t e α_s foram calculados usando um algoritmo fornecido por MUNEER et al, 2000. Para assegurar a realidade da amostra os dados com $K_t \geq 1$ e $\alpha_s \leq 10^\circ$ foram descartados.

A partir dessa base empírica foram propostos dois modelos o S-DPF para dutos retos e o E-SPF para dutos com cotovelos, sendo que o S-DPF para ser generalizado inclui 12 coeficientes ($a_0 - a_{10}$ e m) e é dado pela equação:

CAPÍTULO II

$$S - DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s^2 + a_3 k_t \alpha_s + a_4 k_t^2 \alpha_s + a_5 k_t \alpha_s^2 + a_6 k_t^2 \alpha_s^2) \rho^{(a_7 + a_8 A_p + a_9 \cot \alpha_s + a_{10} A_p \cot \alpha_s)} R^2 (H/D)^m}{D^2}$$

Equação 22

Fica claro que o DPF é função da área de seção do duto, o que justifica a inclusão do R^2 na fórmula, além dos termos já inclusos como o K_t , α_s e D^2 . A refletância também influencia na transmissão da luz e Edmond et al (1995) coloca que o número de reflexões necessário é proporcional a A_p e $\cot \alpha_s$. Para considerar o modo como a luz é espalhada a partir do difusor no ambiente é inserida a última parte da equação $(H/D)^m/D^2$ onde $1 \leq m \leq 2$.

Para a iluminância em um ponto dado, vinda de um ponto ou de uma fonte finita de luz, a lei do inverso do quadrado e a lei do cosseno devem ser mantidas. Entretanto, se o difusor do duto de luz for considerado como uma fonte pontual a lei do cosseno deve ser aplicada apenas uma vez, sendo $m=1$, ao passo que se o difusor for considerado como uma fonte finita de luz, neste caso, a lei do cosseno deve ser aplicada duas vezes, uma para a luz que é emitida e outra para a luz incidente ou projetada sobre o plano horizontal, desse modo m passa a ser igual a 2. O $1/D^2$ é o termo que coloca a lei do inverso do quadrado na fórmula.

Considerando a boa correlação entre os resultados medidos e calculados, o modelo simplificado ficou:

$$S - DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s)}{\rho^{(a_3 + a_4 A_p + a_5 \cot \alpha_s + a_6 A_p \cot \alpha_s)} R^2 (H/D)^m} \frac{1}{D^2} \quad \text{Equação 23}$$

Quando o duto tem cotovelo é necessário considerar a energia perdida em cada cotovelo. O comprimento do cotovelo (L_b) e o número de cotovelos (N) são considerados pelo uso de um fator equivalente de comprimento (f_{len}) e um fator de perda de energia (f_{loss}). L_b e f_{loss} estão incluídos na expressão modificada para A_{pe} . O fator $(1-f_{loss})^N$ considera toda a perda na transmitância devida ao número de cotovelos.

$$E - DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s + a_3 k_t \alpha_s + a_4 k_t^2 \alpha_s + a_5 k_t \alpha_s^2 + a_6 k_t^2 \alpha_s^2) \rho^{(a_7 + a_8 A_p + a_9 \cot \alpha_s + a_{10} A_p \cot \alpha_s)} R^2 (1 - f_{loss})^N (H/D)^m}{D^2}$$

Equação 24

Onde:

$$A_{pe} = (L + f_{len} L_b) / 2R;$$

L é o comprimento do duto reto (m);

f_{len} é o fator equivalente de comprimento;

L_b é a soma dos comprimentos lineares de todos os cotovelos (m);

R é o raio do duto (m);

f_{loss} é o fator da energia perdida por cada curva de 30° (a curva mais comum usada em dutos de luz).

A equação para dutos com cotovelos pode ser simplificada resultando na equação abaixo:

$$E - DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s)}{\rho^{(a_3 + a_4 A_p + a_5 \cot \alpha_s + a_6 A_{pe} \cot \alpha_s)}} R^2 (1 - f_{loss})^N (H/D)^m / D^2 \quad \text{Equação 25}$$

Esse trabalho é fundamental na construção do estado da arte da difusão da luz natural a partir de dutos de luz. Os autores abordam e discutem diversos fatores ambientais e geométricos que afetam a transmissão luminosa por meio de dutos de luz.

O α_s afeta o DPF através da alteração no número de reflexões no interior do duto. Quando o α_s aumenta o número de reflexões diminui, tendo como resultado a maior transmitância. Quando o K_t muda, a forma como o α_s afeta o DPF também muda. Para qualquer α_s e K_t o quadrado do raio de um duto de luz (R^2) afeta a admitância da iluminação externa. Além de que a razão de aspecto de um duto de luz ($A_p = L/2R$) e α_s influenciam a transmitância no duto.

O modelo DPF mostrou que o desempenho dos dutos está fortemente relacionado a distância D, que é a distância do centro do difusor até o ponto de estudo P, e da distância H, que é a distância do difusor até o plano de trabalho na vertical. O melhor valor encontrado para o coeficiente m é de 1,3. Isso mostra que em aplicações reais os dutos de luz trabalham mais como uma fonte pontual que como uma fonte de área finita.

CAPÍTULO II

A iluminância interna obtida de um duto com difusor opal é proporcional a $(H/D)^{1,3}$ e inversamente proporcional a D^2 .

O desempenho dos dutos ainda pode ser afetado pelos cotovelos, que para cotovelos de 30° a perda é da ordem de 20%. O material do difusor na saída do duto também afeta o resultado.

2.9 CARTER – 2002

2.9.1 The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems

Este trabalho apresenta resultados medidos em laboratório e em campo do fluxo luminoso emitido, a distribuição da intensidade luminosa e a distribuição de iluminância no plano de trabalho, para várias configurações de dutos de luz solar passivos.

Carter faz uma revisão de alguns métodos preditivos utilizados para avaliar dutos de luz passivos. Inicia por Zastrow e Wittwer (1986), que estabeleceu uma expressão aproximada da transmissão luminosa de um duto de luz com seção arbitrária. Seguindo por Swift e Smith (1995) que mostra as limitações do primeiro, estabelecendo que aquela teoria era limitada para dutos com baixa razão de aspecto, alta refletância e luz incidente próximo ao raio retificado. Continuando por Love et al (1995) que comparou a transmitância de dutos sem captador ou difusor de uma série de dutos disponíveis comercialmente. Por fim comenta o trabalho de Harrison et al (1998) que fez medidas do nadir e iluminância externa para calcular o fator de luz do dia (FLD).

O fluxo luminoso emitido foi medido por uma caixa cúbica com características próximas a um integrador fotométrico. Foram coletados dados de iluminância do nadir e do fluxo luminoso emitido em 11 diferentes dutos, montados em ambiente teste de 2m x 1,5m. Todos os dutos mediam 610mm de comprimento e seções variando de 200mm, 330mm, 450mm e 530mm.

Carter descreve os métodos preditivos como ferramentas de projeto, que para o caso de dutos de luz passivos, podem ser divididos, convenientemente em duas partes, a primeira sendo a estimativa da quantidade de luz que sai do sistema e a segunda uma análise de como ocorre a distribuição da luz no ambiente.

O primeiro passo de um projetista de dutos passivos é estimar adequadamente a iluminância externa local, pois a quantidade de luz que entra no duto depende da iluminância incidente e da sua área de seção. Considerando as perdas luminosa na passagem da luz pelo coletor, duto, cotovelos e difusor, o fluxo luminoso emitido pode se estimado como produto da iluminância externa, área de seção do duto e da eficiência do sistema.

Considerando a distribuição da luz emitida por dutos em um ambiente, a combinação do fluxo luminoso emitido e a distribuição da intensidade luminosa podem ser utilizados como base em inúmeros métodos preditivos da distribuição luminosa por meio de dutos de luz passivos.

Carter coloca algumas ferramentas capazes de analisar a iluminação natural em um ambiente iluminado por um sistema de dutos de luz passivos: calculo manual ponto a ponto, usado para estimar a distribuição luminosa. Fator de utilização para dutos de luz passivos (método dos lumens), o qual, descreve a fração do fluxo luminoso emitido que atinge o plano de trabalho, sendo calculado a partir da distribuição da intensidade luminosa e da eficiência da luminária usada (duto), das proporções do ambiente e das refletâncias das superfícies internas ao ambiente. Simulação computacional, alternativa aos métodos manuais (método ponto a ponto e método dos lumens). Os softwares geralmente descrevem o difusor do duto como sendo uma luminária artificial convencional, e medem a intensidade luminosa e o fluxo luminoso emitido por este.

Carter acha muito difícil aplicar o método dos lumens mesmo para janelas laterais e zenitais convencionais, pois os ambientes e as fontes variam muito. Mesmo havendo muitas propostas de métodos preditivos do desempenho de dutos de luz passivos que utilizam o método dos lumens. Como alternativa, sugere medir a distribuição da intensidade luminosa de zenitais disponíveis comercialmente e derivar as tabelas de fator de utilização para outros tipos quaisquer. Ainda propõe utilizar o método BZ da IES de 1971 para calcular o fator de utilização e construir as tabelas.

Os resultados indicam o desempenho quantitativo e formam a base para vários métodos preditivos do desempenho luminoso de diversas configurações de dutos de luz passivos. Vários estudos de dutos de luz têm produzidos dados

CAPÍTULO II

empíricos para casos particulares, e esses podem ser utilizados para projetar sistemas similares em condições também similares.

O estudo apresentado nesse trabalho desenvolve um sistema de avaliação quantitativa para dutos solares passivos que responde a questões como: quantos dutos são necessários para atingir determinada distribuição de FLD em um ambiente particular. Assim sendo, as técnicas avançadas apresentadas, podem ser usadas em conjunto ou separadas para obtenção do FLD. O método preditivo exposto pode ser utilizado para a maior parte dos dutos solares passivos.

2.10 CALLOW – 2003**2.10.1 Daylighting using tubular light guide systems (Tese de Doutorado)**

Trata-se da pesquisa desenvolvida no doutorado do Joe M. Callow na universidade de Nottingham orientada pelo prof. Dr. Li Shao. Esse trabalho faz uma revisão bibliográfica baseada na classificação proposta pela IEA, *Daylight in Buildings - A Source Book on Daylighting Systems and Components* (2000), dos sistemas não convencionais de iluminação natural.

A pesquisa empírica realiza diversas medições em campo com dutos de luz de várias dimensões e com os bastões acrílicos (light rods), propostos como sistema inovador na condução e distribuição de luz a ambientes internos, sendo estes, de pequena dimensão se comparado os tradicionais dutos de luz.

2.11 CALLOW E SHAO – 2003**2.11.1 Air-Clad optical rod daylighting system**

Este trabalho propõe um novo sistema óptico estático que conduz a luz natural do ambiente externo para o interior dos edifícios. O bastão de luz é um sistema que combina alta eficiência na transmissão luminosa com pequena área de seção. Esses bastões são feitos de polimetil metacrilato extrudado e funcionam pelo princípio da reflexão total. Esse material tem uma boa claridade óptica, com baixo custo da matéria prima. Além do fato de polímeros extrudados serem de fácil e rápida fabricação, com custo reduzido para a produção.

Os bastões de luz (light rods) foram comparados aos dutos de luz comercializados pela sunpipe de 300mm de diâmetro. Ambos os sistemas usam a reflexão interna na condução da luz, sendo que o bastão usa a reflexão total da luz.

A teoria utilizada no desenvolvimento dos bastões conta com o princípio da reflexão total e a alta aceitação angular da luz disponível, quando a fibra do bastão está envolta por ar.

A abertura numérica (NA) é a medida que descreve a aceitação angular do bastão:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \text{sen } \theta \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

θ é a metade do ângulo de aceitação ($^\circ$);

n_1 é o índice de refração interno;

n_2 é o índice de refração da capa ou envoltória do bastão;

Quando o ar é usado como meio envolvente $n_2=1$ e $n_1=1,5$. Com isso $NA=1,12$. Desse modo, $NA>1$ e θ torna-se 90° .

No caso dos bastões de luz envolto em ar, isso significa que são capazes de aceitar luz de 180° da abóbada celeste, no caso de céu encoberto ou do sol em qualquer posição da abóbada celeste.

A escolha de $n_1=1,5$ é conveniente para fabricar e transmitir a luz. Poderia ser mais eficiente na transmissão como outros índices, porém não seria tão vantajoso na fabricação.

Os bastões de luz foram estudados com outros materiais, de índice de refração mais baixo, mas isso acarretaria problemas em algumas latitudes quanto ao ângulo de aceitação e seria restrito em outras.

Algumas ondas de luz irão se perder na borda do bastão, levando a perdas inevitáveis ao sistema, o que irá limitar o comprimento do bastão. A razão de aspecto alta aumenta o número de reflexão de um raio da extremidade até o fim do bastão.

Usando a Lei de Snell, a equação do comprimento (L) percorrido pela reflexão é:

$$L = d \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_0 \text{sen } \theta}\right)^2 - 1} = 0,102m \quad \text{Equação 27}$$

CAPÍTULO II

Onde:

n_0 é o índice do meio da entrada neste caso $n_0=n_2=1$.

$$R = \frac{1}{L} = 9,81 \text{ reflexões / m} \quad \text{Equação 28}$$

Onde R é o número de reflexões.

Durante o período de ensaio a luz do meio dia, que chegava ao centro do bastão, fazia no mínimo 10 reflexões. Quanto mais baixo os raios solares maior é o número de reflexões. A superfície de acabamento do bastão determina a eficiência da reflexão total interna, pois qualquer imperfeição ou fissura pode acarretar perda de luz para o ar que envolve a peça.

Um bastão de 50mm de diâmetro pesa 2,34kg por metro. Uma instalação com 30 bastões de 4m de comprimento daria 280Kg, o que poderia ser distribuído na estrutura do edifício sem grandes problemas.

Além do baixo peso e relativo baixo custo, o PMMA tem a vantagem de absorver significante de radiação infravermelha, o que resulta em menor ganho de calor em regiões tropicais.

Para os ensaios realizados todas as superfícies dos bastões foram polidas. O bastão foi fixado por um anel em um painel e este foi acoplado a câmara de ensaio. A base inferior do bastão funcionava como um difusor e a parte externa superior foi protegida da chuva por um domo acrílico transparente.

As medidas foram coletadas entre 9:30 e 13:30, período em que a altura solar favorecia o ensaio e a câmara de teste não estava obstruída pelo entorno. A coleta dos dados ocorreu no plano horizontal externo, na altura dos domos (bastão e dutos), e na saída interna (difusor).

Com isso, torna-se possível calcular a transmitância luminosa como sendo a razão da intensidade da luz. O autor define a transmitância luminosa, como sendo a iluminância externa dividida pela iluminância interna na saída do difusor.

Os resultados mostraram que o bastão teve melhor desempenho que o duto quando tinha menos disponibilidade externa e o duto teve melhores resultados com maior disponibilidade externa.

Comparando o bastão a uma lâmpada halógena de 13w e eficiência de 10lm/w foi considerado que o bastão é mais eficiente, com uma eficácia solar de conservação luminosa de 100lm/w e transmitância constante de 0,55.

O aproveitamento da luz emitida pelo bastão no ambiente interno pode ser: pela distribuição direta do difusor na saída ou ser redirecionada por um *spot* acoplado na extremidade do bastão. Esse pode ser lixado para emitir luz ao longo, causando um efeito diferente.

Na comparação entre o duto e o bastão os resultados quantitativos foram semelhantes, no entanto, a geometria de ambos difere muito no que diz respeito a razão de aspecto. O bastão tem razão de aspecto de 24 enquanto que o duto tem razão de aspecto de 4. Se o duto tivesse as mesmas dimensões do bastão sua transmissão luminosa seria inexpressiva. A grande vantagem do bastão é ter a mesma transmitância e eficiência que o duto sendo bem mais compacto.

Para acomodar o bastão ao telhado é possível criar curvas ou cotovelos em duas opções: fabricando peças separadas para fundi-las quando necessário ou aquecendo a peça a 60°C para criar a curva. Mas em ambos os casos acarretariam perdas na transmissão luminosa.

Como conclusão do trabalho o autor ressalta a alta eficiência na transmissão luminosa tanto em condição de céu claro ou encoberto. Usando o ar como envoltória, o bastão proposto, por meio da reflexão total, demonstrou ter a mesma eficiência que dutos de luz com dimensão muito superior.

Devido suas pequenas dimensões o sistema de bastões acrílicos envoltos em ar tem alto potencial para iluminar locais onde dutos de luz não são adequados ou possíveis devido seu tamanho. Contando com a facilidade de ser instalado em edifícios já existente, torna-se um grande potencial de mercado.

2.12 JENKINS & MUNEER - 2003

2.12.1 Modelling light pipes performances – a natural daylighting solution

Este trabalho descreve um método para predizer o fluxo luminoso transmitido por dutos de luz e propõe um método de cálculo considerando, condição de céu encoberto, partindo do fluxo luminoso para determinar a iluminância obtida em um ponto no interior do ambiente.

CAPÍTULO II

A intensão desse modelo é calcular níveis de luz em dois estágios:

1. Converter a iluminância externa disponível na abóbada celeste em fluxo luminoso interno, emitido a partir de um duto de luz.
2. Associar esse fluxo com a distribuição de iluminância interna ou com a iluminância em um ponto do ambiente interno.

No primeiro estágio o modelo preditivo do fluxo luminoso descrito relaciona razão de aspecto (“aspect ration”) com iluminância externa e transmissão τ .

$$\phi = \tau E \pi r^2 \quad \text{Equação 29}$$

No segundo estágio a conversão do fluxo luminoso Φ em iluminância em um ponto do ambiente interno E_{int} envolve um processo semi-empírico que utiliza dados obtidos em ensaios e fornecidos pela Universidade de Nottingham. A formulação final incluiu constante e coeficientes encontrados de modo empírico.

Para construir a relação entre fluxo luminoso e iluminância interna, o primeiro passo para obter a distância vertical abaixo do difusor é:

$$\phi = A_H E \quad \text{Equação 30}$$

Onde A_H é o coeficiente dependente da distância horizontal H de um ponto abaixo do difusor. Para uma distância vertical de 1,5m este coeficiente foi encontrado empiricamente pelo cálculo de sua variação com a distância horizontal. Isso resultou em:

$$\phi_f = 0.242 \exp(-1.04H) L_i \quad \text{Equação 31}$$

Para usar essa formula para outra distancia vertical (V) abaixo do difusor a lei do inverso do quadrado deve ser aplicada, e então temos:

$$\phi_f = \left(\frac{1.5}{V}\right)^2 0.242 \exp(-1.04H) L_i \quad \text{Equação 32}$$

Com base nessa formulação é proposta uma ferramenta computacional simples denominada de *luxplots*. Essa ferramenta utiliza o software MS Excel no qual é calculada a iluminância para um grid de pontos em um plano bidimensional.

Um programa VBA coloca cor para cada lux calculado e assim se obtém a representação da distribuição luminosa do ambiente.

A vantagem dessa ferramenta computacional é a facilidade para projetar, permitindo associação entre diferentes sistemas. E tem como limitações o fato de ser recomendado apenas para condição de céu encoberto e por não considerar no valor da distribuição de iluminância interna a parcela devida as reflexões internas ao ambiente estudado.

2.13 JENKINS *et al.* - 2005

2.13.1 A design tool for predicting the performances of light pipes

Este trabalho propõe um modelo matemático semi-empírico cujo objetivo é prever tanto o fluxo luminoso como a iluminância para qualquer dimensão de dutos, com ou sem cotovelos ao longo do comprimento.

A limitação dessa ferramenta encontra-se em distorções com céu claro, sendo indicada apenas para estudos com condição de céu encoberto.

Para a predição do fluxo luminoso é utilizado o raio da seção do duto (R), a iluminância interna (E_{ext}), e a transmissão do fluxo luminoso (τ), sendo, a área da seção do duto circular πR^2 :

$$\phi_{entrada} = E_{ext} \cdot \pi R^2 \quad \text{Equação 33}$$

$$\phi_{saída} = \tau E_{ext} \cdot \pi R^2 \quad \text{Equação 34}$$

O valor da transmissão luminosa (τ) foi obtido por meio de dados empíricos de ensaios realizados na Universidade de Nottingham, visando a aproximação da desta com a razão de aspecto dos dutos (A).

$$\tau = 0,82e^{-0,11A} \quad \text{Equação 35}$$

O coeficiente 0,82 é resultado da combinação entre a transmissão dos domos coletor e do difusor. Isto significa que se os domos estivessem colados justapostos ao difusor 82% da luz disponível seria transmitida do outro lado.

Substituindo a equação 35 na equação 34 obtém-se a equação do modelo semi-empírico preditivo do fluxo luminoso emitido por dutos de luz retos:

CAPÍTULO II

$$\phi_{saída} = 0.82E_{ext} \cdot e^{-0.11A} \cdot \pi R^2 \quad \text{Equação 36}$$

Como generalização da equação 36 para obter o fluxo na saída do duto tem-se:

$$\phi_{sd} = (\tau_{domo} \cdot \tau_{difusor}) T_{duto} \cdot E_{ext} \cdot \pi R^2 \quad \text{Equação 37}$$

Onde τ_{domo} $\tau_{difusor}$ são as transmissões do domo e do difusor e T_{duto} é a transmissão de um pedaço de duto por unidade de razão de aspecto (comprimento/diâmetro).

Os autores propõem uma formulação simples, a partir da lei do inverso do quadrado ou lei do coseno, para obter teoricamente a distribuição da luz emitida por uma fonte pontual.

$$E_{teórico} = \frac{(I_0 \cos^3 \theta)}{V^2} \quad \text{Equação 38}$$

No entanto, a saída de um duto de luz não é uma fonte pontual, então foi proposto uma adaptação a formula teórica considerando um disco luminoso e inserindo a constante 0.494 que foi definida por meio de ensaios verificativos do modelo desenvolvido, desse modo obtém-se a iluminância interna para dutos sem cotovelos.

$$E_i = 0.494 \frac{(\phi_{sd} \cos^4 \theta)}{V^2} \quad \text{Equação 39}$$

O trabalho ainda prossegue no desenvolvimento de um modelo que contempla dutos com cotovelo resultando na equação a seguir:

$$E_i = 0.406 \prod_{\phi_1}^{\phi_n} e^{-0.0052 \phi \frac{E_{ex} e^{-0.111A} \pi r^2 \cos^4 \theta}{v^2}} \quad \text{Equação 40}$$

A ferramenta proposta nesse trabalho tem como principal vantagem fornecer os resultados do fluxo luminoso em lumens permitindo a comparação com sistemas artificiais de iluminação.

Os resultados da distribuição de iluminâncias no interior do ambiente são apresentados em uma plotagem simples em ambiente Excel (LuxPlot). Uma grade

de pontos colorida de acordo com a iluminância prevista é exibida nas dimensões do plano horizontal do ambiente estudado.

Essa ferramenta foi desenvolvida por meio de medidas empíricas e da exploração teórica de conceito relativo à luz natural. Os produtos obtidos são o fluxo luminoso em lumens e a distribuição da iluminância no plano de trabalho em lux, plotada ponto a ponto em uma grade no Excel.

2.14 JENKINS *et al.* - 2005

2.14.1 Formulation of semi-empirical models for predicting the illuminance of light pipes

Esse trabalho é muito bom, compara os modelos preditivos do Zhang e Muneer (2000 e 2003) e do Jenkins e Muneer (2003) apresentando as constantes e o modo como estas foram obtidas para realização dos ajustes empírico ao modelo teórico.

O estudo apresentado é uma revisão dos dois modelos preditivos da iluminância em dutos de luz retos com diferentes formas do difusor. Os dois métodos têm uma parte empírica, mas usam técnicas diferentes de formulação.

Esses dois procedimentos podem ser apresentados como maneiras diferentes de abordagem do mesmo problema. Alguns usam uma aproximação empírica grande, outros são mais teóricos. E como a maior parte dos modelos propostos, estes usam as duas técnicas em suas formulações.

Os dutos de luz podem apresentar vários tamanhos (comprimento e diâmetro) e assim para contar simplesmente com medições, seriam necessários muitos dutos para se ter uma boa amostra de dados. Por outro lado, existem parâmetros muito difíceis de serem obtidos apenas de modo teórico, por exemplo, a distribuição luminosa da abóbada celeste. Desse modo, os dados empíricos são usados ou para preencher lacunas ou para validar os modelos teóricos.

A diferença na aquisição de dados para os dois estudos se deve, principalmente, a natureza de cada modelo. No modelo do Jenkins e Muneer, primeiro é previsto o fluxo luminoso emitido pelo duto e depois considera a distribuição de iluminâncias. Por esse motivo, foram medidos dados do fluxo luminoso por meio de um integrador fotométrico com o apoio e supervisão da

CAPÍTULO II

Universidade de Nottingham, e a iluminância com um luxímetro em edifícios espalhados pelo Reino Unido.

O modelo do Zhang e Muneer prediz diretamente a iluminância, sem explicitar o fluxo luminoso emitido. Assim, os dados coletados neste estudo foram apenas a iluminância, as quais foram usadas para otimizar os coeficientes aplicados na equação, derivados das análises teóricas e paramétricas.

O modelo do Jenkins e Muneer a partir do fluxo luminoso coletado, obtém a simples relação entre a transmissão no duto (τ) e a razão de aspecto (A).

$$\tau = 0,82e^{-0.11A} \quad \text{Equação 41}$$

Onde 0,82 foi medido e é a perda luminosa pelo domo e pelo difusor, enquanto que a formula exponencial se refere a luz perdida no comprimento do duto.

A grande quantidade de dados de iluminância medidos para este estudo foi usado apenas para a validação, embora também tenham servido para otimizar as constantes empíricas.

➤ Aplicação Teórica

A iluminância (E_i) recebida em qualquer ponto dado, vinda de uma área elementar de uma fonte luminosa de tamanho finito é proporcional ao produto da intensidade luminosa (I) da área, dos cosenos do ângulo emissor (θ_e) e incidente (θ_i) e do inverso do quadrado da distância (D):

$$E_i \propto \frac{I \cos \theta_e \cdot \cos \theta_i}{D^2} \quad \text{Equação 42}$$

Essa equação pode ser integrada ponto por ponto utilizando o ambiente teste usado na coleta dos dados empíricos, para obter uma estimativa mais precisa da distribuição da iluminância no ambiente.

O modelo de Zhang e Muneer introduz o Fator de Penetração de Luz Natural (DPF), que é a razão da iluminância interna no ponto pelo total de iluminância externa (direta e difusa).

$$DPF = B \left(\frac{1}{D} \right)^2 \quad \text{Equação 43}$$

Onde B é o fator dependente da altura solar e da condição de céu. D é a distância do difusor até o ponto dado.

Considerando o cálculo da integral sugerido antes, os dados medidos são usados na equação 44:

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_0 + a_1\alpha_s + a_2\alpha_s^2 + a_3k_t + a_4k_t^2 + a_5\alpha_s k_t)}{D^2} \quad \text{Equação 44}$$

Onde a é o coeficiente que utilizou os dados medidos para achar o valor ótimo. Os parâmetros identificados aqui foram verificados através das medições nos dutos instalados em edifícios. Para corrigir esses valores para dutos de outras dimensões chegaram a uma equação mais genérica de dutos retos.

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{\rho^{(a_7 + a_8 A + a_9 \cot \alpha_s + a_{10} A \cot \alpha_s)} r^2 (V/D)^m}{D^2} \quad \text{Equação 45}$$

Onde:

R é o raio do duto (m);

ρ é a refletância da superfície;

A é a razão de aspecto;

V é a distância vertical do difusor até o plano de trabalho (m);

a é o coeficiente extraído da análise paramétrica.

A área da seção do duto é diretamente proporcional a luz emitida na saída e isso explica o R^2 na formula. A refletância é o resultado do fato de que a transmissão luminosa no duto é função do número de reflexões. Esse é proporcional a razão de aspecto e a cotangente da altura solar.

Quando se prediz a iluminância vinda de uma fonte pontual ou de uma fonte finita, o inverso do quadrado ou lei do coseno pode ser usada. Quando se tem uma fonte pontual utiliza-se $m=1$, para as fontes finitas m passa a ser igual a 2.

O modelo do Jenkins e Muneer usa apenas a iluminância externa e as dimensões do duto e do ambiente para o cálculo. Eles consideram as variações externas muito difíceis de serem contempladas, e desse modo, adotam raio (r), para uma iluminância externa (E_{ext}) e uma transmissão no duto (τ). A área de

CAPÍTULO II

seção do duto é πr^2 , o fluxo de entrada do duto é ϕ_0 , sendo este o produto da iluminância externa e da área do duto:

$$\phi_0 = E_{ext} \cdot \pi r^2 \quad \text{Equação 46}$$

A quantidade de luz transmitida pelo duto é simplesmente dado pela τ , então o total de fluxo emitido por um duto reto é:

$$\phi = \tau E_{ext} \cdot \pi r^2 \quad \text{Equação 47}$$

Essa é a equação básica por traz do modelo do fluxo luminoso. E_{ext} e r são medidos em diversas situações, desse modo só a τ que necessita ser encontrada. Uma solução para isto, seria prever a transmitância no duto somente por teoria, mas isto implica grande número de variáveis para acomodar, das quais, algumas são bem difíceis de quantificar. Assim, Jenkins e Muneer resolveram usar dados empíricos para aproximar a transmissão no duto como função da razão de aspecto. Desse modo, a refletância do duto não é usada explicitamente como no modelo do Zhang e Muneer.

O próximo estágio do modelo está relacionado a distribuição da luz emitida pelo duto. A luz que chega em um ponto, vinda de uma fonte pontual, pode ser descrita por:

$$E_{teórico} = \frac{I_{\theta} \cos^3 \theta}{V^2} \quad \text{Equação 48}$$

Essa formula é derivada principalmente da geometria, onde:

$E_{teórico}$ é a iluminância interna teórica (lux);

I_{θ} é a intensidade de distribuição (cd);

θ é o ângulo entre a fonte e o ponto no plano de trabalho ($^{\circ}$);

V é a distância vertical entre a fonte e o plano de trabalho (m).

Considerando o duto como uma fonte pontual ou usando o coeficiente m variável, como fez Zhang e Muneer, o difusor é, aproximadamente, um disco luminoso reto. O fluxo luminoso e a intensidade luminosa podem ser relacionados por um ângulo solido (w), a partir do difusor, segundo a equação 49:

$$I_{\theta} = \frac{\phi \cos^3 \theta}{w} \quad \text{Equação 49}$$

Substituindo a equação 49 na equação 48 do $E_{\text{teórico}}$, se tem:

$$E_{\text{teórico}} = \frac{\phi \cos^4 \theta}{wV^2} \quad \text{Equação 50}$$

Foram ainda feitas algumas alterações nesta equação. Primeiro foi incluída uma constante que multiplica a equação vinda da comparação com os dados empíricos. Essa constante y inclui o ângulo solido (w).

$$E_i = y \frac{\phi \cos^4 \theta}{V^2} \quad \text{Equação 51}$$

E assim substituindo o fluxo como na equação 47, onde E_i é a iluminância interna no ponto prevista. E_i é um pouco diferente do $E_{\text{teórico}}$, pois não bateu com os dados medidos e foi necessário a correção do fator y.

Assim sendo, se compararmos com a equação do Zhang e Muneer, temos:

$$DPF_{(x,y,z)} = y \frac{\tau \pi r^2 \cdot \cos^4 \theta}{V^2} \quad \text{Equação 52}$$

Para verificar a correlação entre os dados medidos e a teoria o próximo passo é usar os dados coletados para calcular o coeficiente empírico que não era conhecido apenas com a teoria.

Zhang e Muneer usam 10 coeficientes extraídos das análises entre os dados medidos e os previstos. Seguindo a mesma técnica de otimização, acham o expoente m e o valor que melhor se adequa a este, sendo $m=1,3$. Inserindo isto na equação 45 chegam a equação final que prediz a iluminância em qualquer ponto abaixo de um duto reto.

O modelo do Jenkins e Muneer tem apenas o coeficiente y para otimizar a equação. Este é produto de vários fatores entre uma grande variedade de dados e condições. O valor 0,494, foi o valor encontrado, que melhor se adequou entre os dados medidos e previstos, assim temos:

$$DPF_{(x,y,z)} = (0,494) \frac{\tau \pi r^2 \cdot \cos^4 \theta}{V^2} \quad \text{Equação 53}$$

E substituindo a τ , se tem:

CAPÍTULO II

$$DPF_{(x,y,z)} = (0,406) \frac{e^{-0,11A} \pi r^2 \cdot \cos^4 \theta}{V^2} \quad \text{Equação 54}$$

Ainda que essa equação seja correspondente a um duto específico com refletância, domos e difusor determinado, este procedimento pode ser aplicado para outros projetos. Seria necessário adaptar os valores referente a combinação da transmissão do domo, do difusor e da transmitância do duto.

O modelo de Zhang e Muneer, considerando os coeficientes fornecidos, é só alterar a refletância para obter uma formulação genérica. Mas para domos e difusor diferentes os coeficientes teriam de ser adaptados.

Ambos os modelos foram validados com base nos dados medidos com dutos diferentes, e ambos tiveram excelentes resultados quando comparadas as medições com os dados previstos.

Os resultados da predição são apresentados por Zhang e Muneer em uma tabela, já o Jenkins e Muneer utilizam o software *LuxPlot* para apresentar as iluminâncias medidas em uma representação colorida.

Os autores concluem que os dois modelos preditivos da iluminância em dutos devem ser ressaltados para uso prático. Suas formulações e apresentações são muito diferentes, mas ambos usam base empírica para produzir os modelos. O modelo do Zhang e Muneer tem uma definição mais apurada da condição externa, enquanto que o modelo do Jenkins e Muneer usa apenas a iluminância externa. As apresentações dos resultados são diferentes. Os dois modelos foram formulados considerando dutos específicos para isto. Outra diferença é na questão da introdução de curvas ou cotovelos aos modelos, visto que Zhang e Muneer consideram apenas as curvas de 30°, enquanto Jenkins e Muneer consideram uma variedade de ângulos. Ambos os modelos obtiveram ótimos resultados na validação com dados medidos.

2.15 ROSEMAN *et al.* – 2005

2.15.1 The photometry of hollow light guides

Esse trabalho faz uma análise detalhada do procedimento necessário para realizar medições com dutos do tipo *hollow*, que emitem luz ao longo do próprio duto. Apresenta ainda o goniômetro construído na Universidade Técnica de Berlin, como instrumento capaz de realizar medidas neste tipo de duto. Os autores fazem

uma análise comparativa entre dados medidos em uma sala teste com dados calculados por softwares a partir de dados fornecidos pelo goniômetro. Por fim, é sugerida uma padronização dos dados de iluminância medidos, facilitando a utilização destes por softwares que usam o método do raytracing.

Os dutos *hollow* descritos nesse trabalho guiam a luz ao longo de um eixo, permitindo que haja escapes ao longo do duto. Lâmpadas artificiais são acopladas dentro do duto, complementando ou fazendo a iluminação noturna. O desempenho desses dutos depende do material usado para guiar a luz.

A primeira parte desse artigo descreve as técnicas de medição da luz incidente sobre os materiais. A segunda parte trata das medições realizadas com o goniômetro. Os resultados das medições realizadas na Universidade Técnica de Berlin foram comparados a instalações reais.

Muitos dutos de luz têm usado o filme prismático como material de revestimento, visto que este transporta a luz por reflexão total, se essa entrar no sistema com a angulação apropriada. A medição do fluxo luminoso transportado pelo duto depende da luz incidente e da direção do observador. Ou seja, a transmitância luminosa e a refletância do duto vai depender do ângulo de incidência da luz. Assim sendo, as medições da transmitância luminosa em filmes prismáticos têm que levar em consideração esse aspecto.

A transmitância luminosa pode ser obtida por dois métodos básicos: esfera integradora ou goniômetro.

A luz que entra na esfera integradora produz uma iluminância indireta na superfície interna da esfera, a qual é proporcional ao fluxo luminoso transmitido pela amostra. Erros podem acontecer devido a razões fotométricas. Com uma esfera integradora vários ângulos podem ser medidos, no entanto, o azimute deve ser discreto, pois ângulos superiores a 70° causam erros inaceitáveis.

O goniômetro mede dados levando em conta a direção do observador para a luz transmitida. Essa pode ser computada por várias direções angulares, sendo uma distribuição espacial do coeficiente de luminâncias.

A distribuição espacial do coeficiente de luminância depende do ângulo de incidência da luz e da direção do observador. Essas medições são chamadas de bidirecionais BDTF ou BDRF (função bidirecional da distribuição da transmissão ou

CAPÍTULO II

refletância luminosa). O principal erro das medições bidirecionais realizadas por goniômetros é devido ao tamanho da superfície da amostra e do tamanho da área iluminada. O número de medições necessárias irá diminuir se houver simetria em algum dos planos de medição.

Os autores propõem um sistema de banco de dados, o EUMELDAT, baseado no formato europeu usado para descrição fotométrica de luminárias, o LUMADAT. A ideia desse banco de dados é que seja possível, qualquer projetista, usar os dados dos dutos prismáticos para realizar simulações em softwares que utilizem raytracing.

Até o presente momento não há consenso sobre medições da distribuição de intensidade luminosa em dutos de luz. A razão para esta lacuna é que os dutos variam de 4m a 30m de comprimento, o que impossibilita a medição com equipamentos convencionais de fotometria. Assim sendo, os autores sugerem que os dutos sejam divididos em vários segmentos, e que cada segmento seja tratado como uma luminária independente, para se obter as quantidades de luz emitida por cada parte.

Os dutos do tipo *hollow* são muito difíceis de medir, devido seu comprimento. O fluxo luminoso emitido é, normalmente, medido por esfera integradora ou por goniômetro que integram a iluminância distribuída ao redor da luminária. Os dutos necessitam de equipamentos muito grande para serem medidos. O mesmo problema ocorre se a intensidade da distribuição luminosa necessita ser medida. Neste caso, a aproximação fotométrica convencionalmente utilizada é baseada na lei do inverso do quadrado. No entanto, essa lei é válida apenas para fontes pontuais, o que não existe na realidade. Porém, devido a distância da fonte ao ponto de medição esse erro torna-se aceitável.

No caso dos dutos do tipo *hollow* a distribuição ao longo do duto não é constante, o que o leva a maior número de erros inseridos no cálculo. Uma aproximação possível é a fotometria de campo próximo, que é baseada na medição de distribuição de luminâncias. A distribuição da intensidade luminosa é computada a partir dos dados de luminância.

A Universidade Técnica de Berlin construiu um goniômetro para medir fluxo luminoso e distribuição da intensidade luminosa em dutos de luz. Este consiste em duas partes principais: a primeira é um sistema de trilhos montado abaixo do forro,

de comprimento total de 63m em alumínio estruturado, que permite medir dutos com comprimento superior a 30m. E existem, também, adaptações para realizar medições de dutos com várias seções. A segunda parte é o goniômetro propriamente dito, que consiste em um arco concêntrico circular com um sistema de trilhos no meio. Os dutos de luz se movem ao longo do eixo horizontal e o arco é preso de modo que possa rodar em torno do eixo horizontal.

O goniômetro conta com uma câmera, que mede a distribuição de luminâncias, uma fotocélula, um medidor de iluminâncias absolutas e um laser para ajustar o sistema. O posicionamento da câmera e da fotocélula são ajustados por um software. Todos os sensores são controlados por computador, o qual mede, converte os dados necessários e salva-os em um arquivo. O goniômetro fornece a distribuição da intensidade luminosa dos segmentos medidos, a qual é usada no cálculo da iluminância.

Nesse trabalho foram apresentadas as medições em um ambiente teste, sem janela, cujos resultados foram comparados aos resultados calculados, com os dados fornecidos pelo goniômetro, por dois softwares de *download* gratuito na internet. Os testes mostraram que os dados obtidos com o goniômetro são satisfatórios para serem utilizados nestes dois softwares que usam raytracing.

Como conclusão do trabalho, os autores reforçam a necessidade de conhecimento dos materiais com o intuito de melhorar o desempenho de dutos de luz. E afirmam que com a padronização, esses materiais podem ser descritos e usados para otimizar o processo envolvido no projeto.

2.16 ROSA – 2006

2.16.1 The evaluation of daylight guide systems and their impact on building design (Tese de Doutorado)

Esse trabalho é uma tese de doutorado defendida na Universidade de Harvard, cujo objetivo foi avaliar a capacidade de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, por meio de análises paramétricas. Estas comparam as variáveis envolvidas na transmitância luminosa que influenciam a razão de aspecto dos dutos. Os resultados obtidos durante a pesquisa foram utilizados como base para gerar um modelo de tomada de decisões, o qual auxilia os projetistas a verificar o potencial dos sistemas, e assim, escolher a melhor configuração, baseada na

CAPÍTULO II

disponibilidade de luz natural, propriedades físicas dos dutos e a altura do espaço interno, resultando na autonomia de luz natural pela escolha do sistema.

2.17 SWIFT *et al.* – 2006

2.17.1 Hotspots in cylindrical mirror light pipes: description and removal

Esse trabalho trata dos *hotspots* (manchas de sol) produzidas por dutos espelhados no difusor da saída ou no ambiente interno. Os autores colocam que a transmitância em dutos espelhados tem sido descrita por três métodos principais: Zastrow e Wittwer (1986), Swift (1995) e *raytrace* (raio traçado), sendo este último um método computacional.

Zastrow e Wittwer (1986) usa uma técnica na qual o número de reflexões do raio que percorre o duto é determinado pela média ponderada sobre a dimensão linear da abertura do duto. A vantagem deste método é que não existe razão de aspecto considerada pequena, ou seja, pode ser usado para descrever qualquer duto.

O método do Swift (1995) é aplicado apenas para dutos cilíndricos e não é preciso. O *raytrace* não dá uma equação fechada para a transmitância.

O interesse dos autores por dutos espelhados se deve ao fato de serem os causadores do efeito *hotspot*, quando não dotado de difusores, ou de ofuscamento no difusor por acúmulo de luz nessa área.

A teoria apresentada parte da distribuição da luz, sendo esta analisada com base em um raio que percorre o duto. A análise se inicia em 2D e depois passa para o 3D. Através do duto 3D temos:

$$S = 2\sqrt{1 - x^2} \quad \text{Equação 55}$$

Onde S é a largura (ou diâmetro) e X é a coordenada do eixo horizontal que cruza a seção de entrada. A rotação desse raio até a seção de saída é dada pelo ângulo β , onde:

$$\tan \beta = S / 2x \quad \text{Equação 56}$$

O número de reflexões (n) no comprimento (L) é dado por:

$$n = \text{int} \left[\frac{l \tan \theta + y}{s} + \frac{1}{2} \right] \quad \text{Equação 57}$$

Onde o ângulo de incidência é:

$$(x_n, y_n, z_n) = \cos(2n-1)\beta, \sin(2n-1)\beta, ((n-1/2)(s-n)/\tan \theta) \quad \text{Equação 58}$$

O ponto (x_e, y_e) é o ponto que o intercepta a seção de saída do duto onde $Z=L$. O ponto (x_e, y_e) pode ser determinado pelo cálculo do ponto $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$.

$$(x_e, y_e) = \left(x_n + (x_{n+1} - x_n) \left(\frac{1 - z_n}{z_{n+1} - z_n} \right), y_n + (y_{n+1} - y_n) \left(\frac{1 - z_n}{z_{n+1} - z_n} \right) \right) \quad \text{Equação 59}$$

Para obter a radiação que atinge a saída é necessário usar o fator R^n , onde R é a refletância do duto. Quando se tem um difusor na entrada do duto é necessário achar a transmitância ($T_D(\theta)$) deste:

$$T_D(\theta) = \int T(\theta - \varepsilon) D(\varepsilon, \theta) \sin \varepsilon \frac{\cos(\theta - \varepsilon)}{\cos \theta} d\varepsilon \quad \text{Equação 60}$$

Onde:

$T(\theta)$ é a transmissão do duto sem difusor;

O seno representa a simetria na difusão da luz e o coseno dá o ângulo da difusão da luz. A transmissão da luz sem difusor é dada por:

$$T = \frac{4}{\pi} \int_{s=0}^1 \frac{s^2}{\sqrt{1-s^2}} R^{\text{int}[\rho \tan \theta / s]} \times (1 - (1-R)(\rho \tan \theta / s - \text{int}[\rho \tan \theta / s])) ds \quad \text{Equação 61}$$

Onde p é a razão de aspecto, $\text{int}[x]$ é a parte inteira de x e $D(\varepsilon, \theta)$ irá depender do difusor adotado e da condição de normalização:

$$\int D(\varepsilon, \theta) \sin \varepsilon d\varepsilon = 1 \quad \text{Equação 62}$$

No estudo experimental apresentado, a distribuição de luz emitida por dois dutos espelhados com diâmetros pequenos foram fotografados com e sem difusor na entrada.

O uso de dutos pequenos em laboratório resulta em distorções significantes relativas a parede do duto, o que altera o padrão da radiação até a saída do duto. Esse problema foi superado pelo uso de duto de luz espelhado sólido. Dois bastões

CAPÍTULO II

cilíndricos de polimetil metacrilato de 32mm de diâmetro foram usados com o comprimento de 128mm e 256mm e razões de aspecto de 4 e 8 respectivamente. O índice de refração do acrílico é 1,49.

Foi utilizada como fonte luminosa um LED branco com feixe retificado com distância focal de 20cm. A desvantagem de usar duto de luz sólido neste trabalho foi que o ângulo de incidência era limitado, o máximo ângulo de incidência é 42°. Os resultados apresentados foram para ângulos de incidência de 30° e 19, 6°.

A transmitância do duto de luz espelhado, com ou sem difusor, foi medido, por uma esfera integradora, em dutos fabricados pela *Silverlux*, no formato cilíndrico com diâmetro de 25mm. A refletância do duto foi medida com espectro fotômetro e deu 0,93. Quatro espessuras de difusores foram utilizadas, 1,2,3 e 4mm. A função de distribuição da luz emitida pelo difusor foi medida com um goniômetro.

A concordância entre os resultados medidos e os calculados, com ou sem difusor foi satisfatória. Os resultados calculados e fotografados indicam que há uma pequena diferença na eficácia entre 1 e 4mm de espessura do difusor.

A não concordância entre os resultados medidos e calculados foi maior para os difusores mais espessos que para os mais finos. Os estudos apresentados mostraram que os difusores usados junto com dutos espelhados não apresentam significativa redução no desempenho do duto.

Este trabalho apresentou resultados de medições e cálculo da transmitância luminosa de dutos espelhados cilíndricos e padrões de distribuição da radiação emitida por dutos sólidos ou ocos, com difusores na entrada. Foi demonstrado que os *hotspots* ou ofuscamento na abertura podem ser reduzidos, significativamente, sem ter redução significativa na transmitância luminosa do duto.

2.18 CIE 173:2006

2.18.1 Technical report: tubular daylight guidance systems

Essa norma foi o resultado dos trabalhos do Comitê Técnico 3-38, o qual se trata de um relatório técnico organizado por um grupo de importantes pesquisadores dos condutores de luz natural.

O relatório técnico inicia-se com um resumo em três idiomas (inglês, francês e alemão), na sequência tem um glossário dos termos pertinentes ao objeto de estudo, o corpo do documento é organizado em 10 capítulos e o relatório é finalizado por 3 apêndices.

A ênfase desse relatório está nos sistemas passivos zenitais, por serem os tipos de dutos que mais fazem sucesso comercial, sendo instalados em muitas partes do mundo. Inclui a revisão tecnológica dos tipos genéricos de sistemas condutores de luz. Grande parte do relatório está composta por estudos fotométricos dos componentes e sistemas, métodos de projeto, aspectos de manutenção tanto para projetistas como para o usuário, aspectos energéticos, custos e benefícios, aspectos humanos e questões arquitetônicas no contexto dos sistemas zenitais passivos. Por fim são apresentados estudos de caso, mostrando boas aplicações.

Nos capítulos 3, 4 e 5 do relatório técnico é apresentado o método fotométrico para sistemas e componentes, também conhecido como método da CIE. Os componentes do sistema são, geralmente, de grandes dimensões, maior que os dispositivos de iluminação artificial oferecendo um nível compatível de saída de luz. Contudo se o dado fotométrico do componente condutor for disponível pode ser usado na avaliação por meio de um processo de cálculo convencional de iluminação usado na engenharia. Existem inúmeros problemas relativos à fotometria desses sistemas, notadamente que são necessários fotômetros especiais capacitados a aceitar componentes de grande dimensão e existe apenas um número limitado desses (ROSEMAN et al., 2005). Um segundo problema é a especificação padronizada e adequada da fonte luminosa para ensaios de sistemas de iluminação natural, o próprio céu natural é insatisfatório para esse propósito. Esse deve ser ou uma esfera integradora, para criar uma luminância constante, ou um céu artificial com a distribuição de luminâncias do céu encoberto padrão CIE.

Muitas das limitações citadas não se aplicam aos sistemas condutores passivos zenitais que são o principal interesse desse relatório. Esses sistemas consistem na combinação de um número limitado de componentes padrões. No entanto, sua fabricação é mundial e apesar da necessidade de especialistas em fotometria para a instalação, muitas vezes esse profissional pode não estar disponível localmente. O que ocorre é que esses sistemas são comumente instalados por pessoas não especializadas e assim um método simples de

CAPÍTULO II

avaliação de desempenho pode ser apropriado. Os índices de desempenho descritos a seguir, podem ser utilizados pelos fabricantes de sistemas condutores de luz zenitais passivos para produzir informação de projeto em um formato padrão. Esses resultados podem ser subsequentemente utilizados para prever resultados de iluminância a partir da saída de sistemas condutores de luz no interior de um edifício e as comparações das informações nesse formato permitem aos projetistas ou usuários em potencial fazer uma escolha consciente entre as alternativas disponíveis.

➤ **Índice de desempenho para condutores zenitais passivos**

Para um sistema condutor de luz tubular dotado de uma abertura de entrada de luz natural, com comprimento L , tendo um diâmetro D e uma abertura de saída da luz, as características padrão de transferência da luz são determinadas como a seguir: uma fonte de luz difusa é localizada perto da abertura de entrada do duto e a iluminância (E) é medida na abertura de entrada. O fluxo luminoso que chega à saída do condutor (Φ) é também medido. As características padrão de transferência da luz natural é simplesmente a razão entre Φ/E o qual tem unidade em m^2 . Esta é a área equivalente de uma abertura de céu desobstruído que será necessário para produzir a mesma quantia de luz se não houvesse perdas no sistema.

A fonte consiste em um material difuso iluminado por lâmpadas tubulares fluorescentes (ver ilustração 4). Essa deve produzir uma uniformidade luminosa requerida a partir de uma janela condutora (dutada). Especificamente quando vista a partir de qualquer ponto da entrada do condutor para qualquer direção maior que um ângulo de 70° , relativo a direção axial do duto, a luminância observada deve estar dentro de $\pm 20\%$ do valor significativo (principal). Isto implica em um tamanho mínimo requerido para a uniformidade dessa fonte luminosa difusa. Nesse caso, a iluminância na entrada do duto será muito uniforme, então isto será suficiente para medir o valor E no centro da entrada do condutor usando um medidor de iluminância (luxímetro) calibrado.

O fluxo na saída (Φ) deve ser medido por uma esfera integradora suficientemente grande ou por um scanner fotômetro (goniômetro).

Uma vez que esses testes são caros, já sabido que os fabricantes terão dificuldades em realizar alguns testes para todas as possibilidades de comprimentos dos condutores e por todas as possibilidades de combinações entre

todas as aberturas de entrada e saídas. Em relação ao comprimento é sugerido que os fabricantes proponham para medições dutos focados no padrão de razão de aspecto de 1, 5, 9 e 13 (l é efetivamente o menor que pode ser medido e os incrementos são igualmente espaçados depois daquele). Cuidadosa interpolação e extrapolação nas características do transporte, assim obtidas, podem fornecer razoáveis aproximações para outros comprimentos. Esse processo está apresentado na ilustração 5. O mesmo aparato pode ser usado para medir a eficiência do coletor ou a eficiência das curvas. O algoritmo, usado no processo de interpolações e extrapolações, deve ser estabelecido.

Os fabricantes não necessitam testar todas as combinações possíveis de produtos, se através de cuidadosas interpolações, é possível razoável precisão quantitativa do desempenho esperado de muitos comprimentos relacionados e produtos combinados.

Ilustração 4. Procedimento de ensaio - esquema.

Ilustração 5. Eficiência do condutor de luz.

CAPÍTULO II

Ilustração 6. Eficiência do coletor.

Ilustração 7. Eficiência do componente de saída.

Ilustração 8. Eficiência da curva.

A eficiência do sistema pode ser obtida simplesmente pela divisão da característica padrão da transferência luminosa pela área interna da seção

transversal do condutor. Por exemplo, $\pi d^2/4$ para dutos de seção transversal circular.

➤ **Índice de desempenho para condutores zenitais passivos**

Este método descreve a predição da iluminância resultante, a partir da saída de sistemas condutores de luz, dentro de um edifício. Predição da iluminância a partir de ambos os sistemas condutores de luz natural, ativos e passivos, pode ser feito usando o “primeiro princípio” do processo de cálculo de iluminação da engenharia se o dado fotométrico para cada componente estiver disponível, mas como dito antes, dados adequados dificilmente são disponibilizados. Esse documento prediz técnicas de projeto, tanto para sistemas passivos como para ativos, na forma que constitui a vasta maioria dos sistemas instalados.

➤ **Sistemas zenitais passivos**

Esse item descreve três métodos preditivos para uso como roteiro de projeto. Os métodos são diferentes em sofisticação e na quantia de dados de entrada requeridos. Selecione o método apropriado, para um problema de projeto particular, dependendo da quantia de dados disponíveis para projetar e para a acuidade desejada. O primeiro método é um método tabular, que requer apenas o conhecimento do espaço a ser iluminado; com sua função e localização geográfica. O segundo método é baseado nas características padrão de transferência da luz natural descrito anteriormente. O terceiro método permite a predição da provável luz que sai do sistema condutor com diferentes configurações baseado em dados tabulados sobre a eficiência dos condutores.

➤ **Método do dimensionamento aproximado**

Este método do tamanho aproximado do condutor é baseado nas condições locais. O exemplo descrito aqui refere-se a França e países vizinhos e foi desenvolvido pela L'école Nationale Des Travaux Publics D'Etat (ENTPE). O dimensionamento depende primeiro da função do espaço a ser iluminado: um espaço de entrada sem janelas requer menos área de condutor que um banheiro por metro quadrado de área de piso. Segundo parâmetro na ordem é o clima local. Para o norte entre 45° de latitude e o círculo polar, mais tubos são necessários porque a altitude solar é baixa e os céus encobertos são escuros. Finalmente o comprimento do tubo tem de ser considerado. Embora esse parâmetro tenha menor

CAPÍTULO II

influência se o tubo for reto, sem curvas e se estes forem revestidos com materiais altamente reflexivos (coeficiente de reflexão da ordem de 99%).

Dimensionar um sistema condutor de luz natural leva a selecionar o diâmetro do tubo e o número de tubos a serem usados no espaço. Os autores preferiram utilizar o coeficiente inverso: número de metros quadrados do espaço a ser iluminado pelo sistema. Aqui estão os passos propostos para o método:

1º passo: Selecionar o tipo de espaço a ser iluminado (entrada, ...).

2º passo: Selecionar a área geográfica na ilustração 9 (esse exemplo cobre apenas a Europa Ocidental).

Ilustração 9. Zona Climática da Europa Ocidental para avaliação de sistemas condutores de luz natural – (baseado nos dados do www.satel-light.com).

3º passo: Faça uma estimativa da área que deveria ser fortemente iluminada (quando linhas e colunas estiverem selecionadas, encontre na tabela 2 o valor imediatamente mais alto para a iluminação com um único condutor de luz). Se um condutor não for suficiente, divida a superfície pelo valor mais alto da luz para obter o número de condutores necessários.

4º passo: leia o diâmetro do condutor correspondente.

A tabela 2 indica qual superfície é completamente iluminada por um condutor de luz baseado nos seguintes critérios:

- Qual tipo de luz é determinado como premissa;
- Diâmetro do condutor de luz;
- Área geográfica;

Tabela 2. Área do piso iluminada por sistemas condutores de luz natural (a célula hachurada indica a economia ótima).

		Diâmetro do sistema condutor de luz natural									
		0,250 m		0,350 m		0,375 m		0,530 m		0,650 m	
		0,049 m ²		0,096 m ²		0,11 m ²		0,22 m ²		0,33 m ²	
		Área geográfica		Área geográfica		Área geográfica		Área geográfica		Área geográfica	
		zona 1	zona 2	zona 1	zona 2	zona 1	zona 2	zona 1	zona 2	zona 1	zona 2
Garagem no subsolo	2,5 m	4,1 m ²	7,4 m ²	9,0 m ²	15,9 m ² (0,6 %)	10,5 m ² (1%)	18,6 m ²	22,5 m ²	40 m ²	35 m ²	62,1 m ²
Manutenção estoque	2,5 m	1,5 m ²	2,7 m ²	3,3 m ²	5,9 m ²	3,9 m ²	6,9 m ²	8,3 m ²	15 m ²	13 m ² (2,5 %)	23,0 m ²
Circulação	2,5 m	2,6 m ²	4,6 m ² (1,1 %)	5,6 m ² (1,7 %)	9,9 m ²	6,5 m ²	11,5 m ²	13,9 m ²	25 m ²	22 m ²	38,5 m ²
Sempre ocupado Abaixo de 30m	2,5 m	0,6 m ²	1,1 m ²	1,4 m ²	2,5 m ²	1,6 m ²	2,9 m ²	4 m ² (5,5 %)	6 m ² (3,6 %)	5,4 m ²	9,7 m ²
Sempre ocupado Acima de 30m	2,5 m	0,8 m ²	1,4 m ²	1,7 m ²	3,0 m ²	2,0 m ²	3,5 m ²	4 m ²	7 m ²	6,5 m ²	11,6 m ²
Ginásios Grandes armazéns	7,0 m	1,4 m ²	2,5 m ²	3,0 m ²	5,3 m ²	3,5 m ²	6,2 m ²	7,2 m ²	13 m ²	11 m ² (3,6 %)	20 m ² (1,6 %)

Se nós definirmos a razão de abertura como a razão entre a seção do condutor de luz natural (m²) e a área a qual é iluminada pelo sistema, a tabela 2 dá uma indicação dessa relação. Tipicamente a razão de abertura varia de 1% a 3% da área do forro. Este dado deve ser comparado com o estado da arte do dimensionamento de aberturas zenitais entre 4% e 10% tipicamente. Em uma primeira aproximação o condutor pode ser dimensionado como um terço do tamanho padrão das aberturas zenitais. Isto é devido a maior eficiência óptica do sistema.

CAPÍTULO II

Durante um dia normal, das 8:00 e 18:00 horas, o condutor irá usualmente fornecer mais luz que o especificado nas recomendações para a iluminação artificial, para tal premissa.

➤ **Método de transferência das características da luz natural**

O primeiro passo é estimar a iluminância externa global (E_d) típica apropriada para o local. O procedimento para obter esta informação difere de país e prática de projeto. O projeto local de condutor para um sistema de iluminação natural convencional, por exemplo, é quase certo que contenha esta informação. Para a Europa Ocidental e Central o Satel Light Web Serve fornece esta informação (www.satel-light.com). No Brasil, essa informação pode ser obtida no Manual de Conforto Térmico (FROTA e SCHIFFER, 2000), na Geometria da Insolação (FROTA, 2004) e no software *Climáticus* (disponível em: <http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>).

A iluminância externa (E_d) é multiplicada pela característica padrão de transferência da luz natural para obter o fluxo luminoso típico da saída do condutor. Este pode ser, conservadoramente, assumido como aproximadamente difuso e podendo ser usado como tal, em qualquer software de iluminação ou cálculo de cavidade zonal. Muito grosseiramente a iluminância interna será o fluxo luminoso total na saída do duto dividido pela área iluminada.

Alternativamente, podemos estimar a “média do fator de penetração da luz natural”, o qual em analogia com o Fator de Luz Natural (FLD) é a razão da iluminância média resultante dividida por E_d . Isto pode ser estimado como a soma da característica padrão de transferência da luz natural dividida pela área iluminada.

➤ **Método de eficiência da transmissão em condutores**

Este método de cálculo usa como base os métodos descritos anteriormente: método do dimensionamento aproximado e método da característica de transferência da luz natural. Sendo aplicável a grande variedade de ambientes internos e onde os dados da característica padrão de transferência da luz natural não são disponíveis.

O método é baseado nos dados apresentados na tabela 3, os quais fornecem a eficiência da transmissão no tubo (TTE) para condutores de vários diâmetros,

comprimentos e propriedades reflexivas. A derivação desta tabela é descrita no apêndice C do relatório técnico. Esse método permite a avaliação do desempenho de uma grande variedade de configurações de sistemas condutores passivos incluindo a influência das curvas. Observe que o menor valor de refletância interna na tabela 3 é de 92%, e que abaixo desse valor não é recomendado o uso desse método para projetar sistemas com condutores flexíveis para o transporte da luz.

Tabela 3. Eficiência de condutores de vários diâmetros, comprimentos e refletâncias.
(reproduzida com permissão do Solar Project SRL).

TTE = Eficiência da Transmissão por tubo da luz natural difusa – Céu Encoberto CIE
Dados: R-Refletância; L-Comprimento (m); Diâmetro (cm-polegadas)

L/D	25 (10")				35 (14")				37,5 (14,75")				53 (21")				65 (25,6")				90 (35,4")			
	FRP		FE		FRP		FE		FRP		FE		FRP		FE		FRP		FE		FRP		FE	
	AAB		AAB		AAB		AAB		AAB		AAB		AAB		AAB		AAB		AAB		AAB		AAB	
0,25	0,92	0,95	0,98	0,995	0,92	0,95	0,98	0,995	0,92	0,95	0,98	0,995	0,92	0,95	0,98	0,995	0,92	0,95	0,98	0,995	0,92	0,95	0,98	0,995
0,5	0,93	0,96	0,98	1,00	0,95	0,97	0,99	1,00	0,95	0,97	0,99	1,00	0,97	0,98	0,99	1,00	0,97	0,98	0,99	1,00	0,98	0,99	1,00	1,00
1	0,87	0,92	0,97	0,99	0,90	0,93	0,98	0,99	0,91	0,94	0,98	0,99	0,93	0,96	0,98	1,00	0,95	0,96	0,99	1,00	0,96	0,98	0,99	1,00
2	0,76	0,84	0,93	0,98	0,82	0,87	0,95	0,99	0,83	0,88	0,95	0,99	0,87	0,92	0,97	0,99	0,90	0,92	0,97	0,99	0,92	0,95	0,98	1,00
3	0,58	0,71	0,87	0,97	0,67	0,76	0,91	0,98	0,69	0,78	0,91	0,98	0,77	0,85	0,94	0,98	0,80	0,85	0,95	0,99	0,85	0,91	0,96	0,99
4	0,45	0,60	0,81	0,95	0,56	0,66	0,86	0,96	0,58	0,69	0,87	0,97	0,68	0,78	0,91	0,98	0,72	0,79	0,92	0,98	0,79	0,86	0,94	0,99
5	0,35	0,51	0,76	0,93	0,46	0,58	0,82	0,95	0,49	0,62	0,83	0,95	0,60	0,72	0,88	0,97	0,65	0,73	0,90	0,97	0,73	0,82	0,93	0,98
6	0,27	0,44	0,71	0,92	0,39	0,51	0,78	0,94	0,41	0,55	0,80	0,94	0,53	0,67	0,85	0,96	0,59	0,67	0,88	0,97	0,68	0,79	0,91	0,98
8	0,21	0,38	0,67	0,90	0,32	0,45	0,75	0,93	0,35	0,49	0,76	0,93	0,47	0,62	0,82	0,95	0,53	0,62	0,85	0,96	0,63	0,75	0,89	0,97
10	0,13	0,28	0,59	0,87	0,23	0,35	0,68	0,91	0,25	0,39	0,70	0,91	0,37	0,53	0,77	0,94	0,44	0,54	0,81	0,95	0,55	0,68	0,86	0,96
12	0,09	0,21	0,52	0,84	0,16	0,28	0,62	0,88	0,18	0,32	0,64	0,89	0,29	0,46	0,73	0,92	0,36	0,46	0,77	0,94	0,47	0,62	0,83	0,95
14	0,05	0,16	0,46	0,82	0,12	0,22	0,57	0,86	0,13	0,26	0,59	0,87	0,23	0,40	0,68	0,91	0,30	0,40	0,73	0,92	0,41	0,57	0,90	0,94
16	0,04	0,12	0,40	0,79	0,09	0,17	0,52	0,84	0,10	0,21	0,54	0,85	0,24	0,34	0,64	0,89	0,25	0,35	0,70	0,91	0,36	0,52	0,77	0,94
18	0,03	0,10	0,38	0,78	0,07	0,15	0,50	0,83	0,09	0,19	0,52	0,84	0,17	0,32	0,62	0,89	0,23	0,32	0,68	0,91	0,33	0,50	0,75	0,93
20	0,02	0,09	0,36	0,76	0,06	0,14	0,47	0,82	0,07	0,17	0,50	0,83	0,15	0,30	0,60	0,88	0,21	0,30	0,66	0,90	0,31	0,48	0,74	0,93
25	0,01	0,07	0,32	0,74	0,05	0,11	0,43	0,80	0,05	0,14	0,46	0,82	0,12	0,26	0,57	0,86	0,17	0,26	0,63	0,89	0,27	0,44	0,71	0,92
30	0,01	0,05	0,28	0,71	0,03	0,09	0,40	0,79	0,04	0,11	0,42	0,80	0,10	0,22	0,54	0,85	0,14	0,23	0,60	0,88	0,24	0,40	0,69	0,91
100	0,00	0,03	0,21	0,66	0,02	0,05	0,32	0,74	0,02	0,07	0,34	0,75	0,06	0,16	0,46	0,82	0,09	0,16	0,53	0,85	0,17	0,33	0,63	0,89

É recomendado que o TTE > 0,4 para o comprimento dado
Para o caso do TTE < 0,2 escolha um diâmetro maior ou um tubo mais reflexivo
FRP = Filme Reflexivo Prata; AAB = Alumínio Anodizado Brilhante; FE = Filme Espelhado.

O método é usado conforme descrito a seguir:

1º passo: A razão de aspecto L/D (m) do comprimento reto do condutor deve ser calculada. As razões de aspecto para as curvas de vários diâmetros são mostradas na figura 16. Soma-se as razões de aspecto para o sistema todo (ΣM).

2º passo: Assume a transmitância combinada entre o domo transparente, o coletor e o difusor no dispositivo de saída, como sendo igual a 0,63. Seleciona o apropriado fator de manutenção na tabela 4. Conhecendo o diâmetro do condutor e

CAPÍTULO II

o tipo de material reflexivo leia o TTE na tabela 2 para a soma das razões de aspecto. A eficiência global do condutor se dá pela equação abaixo:

$$EG = TTE \cdot 0,63 \cdot MF \quad \text{Equação 63}$$

3º passo: Conhecendo a área do condutor (A) e a iluminância global externa (Eh) o fluxo total que entra no condutor é:

$$\phi_e = Eh \cdot A \quad \text{Equação 64}$$

Total de fluxo que sai do condutor a partir do dispositivo de saída é:

$$\phi_i = \phi_e \cdot EG \quad \text{Equação 65}$$

4º passo: O passo final é analisar a distribuição da luz no interior do ambiente. O modo mais comum é alguma média de iluminância ou fator de penetração de luz natural DPF (daylight penetration fator) sobre o plano de trabalho. Um método conveniente para fazer isto é usar o conceito de fator de utilização para condutores de luz passivos (Carter, 2002). O método é baseado na determinação do fluxo luminoso total que atinge o plano de trabalho composta por uma componente que vem direta da luminária e outra que atinge o plano de trabalho após múltiplas reflexões no ambiente. Essa aproximação considera o componente de saída do sistema condutor tubular de luz natural (TDGS) como fluxo fornecido por uma luminária convencional, fazendo a correção do coseno para a distribuição da intensidade luminosa, para as quais foram tabulados valores de baixo fluxo de utilização aplicado, visto que não há fluxo luminoso orientado para cima, esses valores podem ser utilizados diretos como fator de utilização para efeito de projeto. Os valores de baixo fluxo de utilização para os componentes de saída TDGS estão apresentados na tabela 4.

Então a média do fator de penetração da luz do dia no plano de trabalho para uma instalação com N condutores é:

$$DPF = (N \cdot \phi_i \cdot UF) / (A \cdot E_h) \% \quad \text{Equação 66}$$

Ilustração 10. Valores da eficiência global. (reproduzida com permissão do Solar Project SRL)

CAPÍTULO II
Tabela 4. Fator de utilização para componentes de saída.

Índice do ambiente	Refletância do forro efetiva (%)	Refletância do piso ou do plano de trabalho 10%				Refletância do piso ou do plano de trabalho 30%			
		Refletância da parede				Refletância da parede			
		50%	30%	10%	0	50%	30%	10%	0
0,8	70	0,51	0,43	0,37	0,34	0,54	0,44	0,37	0,35
	50	0,49	0,42	0,36	0,34	0,52	0,43	0,37	0,35
	30	0,48	0,41	0,36	0,34	0,50	0,42	0,37	0,34
1,0	70	0,57	0,49	0,43	0,40	0,61	0,51	0,44	0,41
	50	0,55	0,48	0,42	0,40	0,58	0,50	0,43	0,41
	30	0,54	0,47	0,42	0,40	0,56	0,49	0,43	0,40
1,25	70	0,63	0,55	0,49	0,46	0,68	0,59	0,51	0,48
	50	0,61	0,54	0,49	0,46	0,65	0,57	0,50	0,47
	30	0,59	0,53	0,48	0,46	0,62	0,55	0,49	0,47
1,5	70	0,68	0,60	0,54	0,52	0,74	0,64	0,57	0,54
	50	0,66	0,59	0,54	0,51	0,70	0,62	0,56	0,53
	30	0,64	0,58	0,53	0,51	0,67	0,60	0,54	0,52
2,0	70	0,75	0,68	0,62	0,59	0,83	0,74	0,66	0,63
	50	0,72	0,66	0,61	0,59	0,78	0,70	0,64	0,61
	30	0,70	0,65	0,60	0,58	0,74	0,68	0,62	0,60
2,5	70	0,80	0,73	0,68	0,65	0,89	0,80	0,73	0,70
	50	0,77	0,71	0,67	0,65	0,83	0,76	0,70	0,68
	30	0,75	0,70	0,66	0,64	0,79	0,73	0,68	0,66
3,0	70	0,83	0,77	0,72	0,70	0,93	0,85	0,79	0,76
	50	0,80	0,75	0,71	0,69	0,87	0,81	0,75	0,73
	30	0,78	0,74	0,70	0,68	0,82	0,77	0,73	0,70
4,0	70	0,88	0,83	0,78	0,76	0,99	0,92	0,86	0,84
	50	0,85	0,81	0,77	0,75	0,93	0,87	0,83	0,80
	30	0,83	0,79	0,76	0,74	0,87	0,83	0,79	0,77
5,0	70	0,91	0,86	0,82	0,80	10,0	0,97	0,92	0,90
	50	0,88	0,84	0,81	0,79	0,97	0,92	0,87	0,85
	30	0,86	0,83	0,80	0,78	0,91	0,87	0,83	0,82

Tabela 5. Fator de manutenção.

Função do ambiente	Exposição	Inclinação do condutor					
		Vertical		Inclinada		Horizontal	
		Rural / Subúrbio	Urbano	Rural / Subúrbio	Urbano	Rural / Subúrbio	Urbano
Residencial: Ambientes privados e áreas comuns, baixa ocupação e boa manutenção, sem fumaça	Muito exposto a chuva	0,98	0,95	0,94	0,88	0,88	0,76
	Exposição normal	0,96	0,92	0,92	0,84	0,88	0,76
	Muito exposto a neve	0,96	0,92	0,88	0,76	0,84	0,68
	Protegida por beiral	0,88	0,76	-	-	-	-
Comercial, educacional: Ambientes usados por grupos de pessoas, áreas de escritório com equipamentos ou fumaça.	Muito exposto a chuva	0,98	0,95	0,94	0,85	0,88	0,7
	Exposição normal	0,96	0,9	0,92	0,8	0,88	0,7
	Muito exposto a neve	0,96	0,9	0,88	0,7	0,84	0,6
	Protegida por beiral	0,88	0,7	-	-	-	-
Ambientes poluídos e com muito uso: Piscinas, academia, áreas industriais ou com muita fumaça.	Muito exposto a chuva	0,92	0,9	0,76	0,7	0,52	0,4
	Exposição normal	0,84	0,8	0,68	0,60	0,52	0,4
	Muito exposto a neve	0,84	0,8	0,53	0,4	0,36	0,2
	Protegida por beiral	0,52	0,4	-	-	-	-

Note que os valores em branco indicam que o dado não estava disponível.

CAPÍTULO II

➤ **Apêndice C – Eficiência da transmissão no condutor (TTE)**

Sendo L o comprimento equivalente óptico do condutor e D seu diâmetro, um valor aproximado de TTE pode ser calculado pela relação simplificada:

$$TTE = \frac{e^{\frac{L}{D} \lg \vartheta \ln R}}{\left(1 - \frac{L}{D} \lg \vartheta \ln R\right)} \quad \text{Equação 67}$$

Essa equação ganha valores realísticos para condição de céu encoberto, se for assumido que apenas a luz dentro de um cone, subtendido por um ângulo de 30°, a partir do zênite, entra no condutor. Então sendo assim:

R = refletância especular

L/D = razão de aspecto

L = comprimento óptico equivalente (m)

D = diâmetro (m)

2.19 AL-MARWAE E CARTER - 2006**2.19.1 Tubular guidance systems for daylight: achieved and predicted installation performances**

Esse trabalho apresenta o monitoramento de 13 dutos instalados, na maior parte em ambientes de escritório, e um estudo baseado na predição da iluminância por meio de diversos métodos propostos até então. Para o estudo preditivo apresentado foi realizada uma revisão crítica específica dos mais importantes métodos existentes naquele momento e esses foram utilizados no cálculo da eficiência dos dutos monitorados.

Na introdução desse artigo encontrei a melhor definição de duto de luz considerando toda a bibliografia específica consultada até o presente momento: “Duto de Luz consiste em um domo de policarbonato transparente que capta luz do sol e do céu vinda de parte ou de toda a hemisfera celeste, acoplado a um tubo linear rígido ou flexível, com alta refletância prateada ou de material prismático para redirecionar a luz e na saída é dotado de mecanismos comumente difusores feitos de material opalino (opal), prismático ou por um conjunto de lentes Fresnel”.

Al-Marwae e Carter criticam o grande número de modelos preditivos existentes sem, no entanto, apresentarem uma ferramenta com interface amigável

que facilite para o arquiteto, projetista, incorporar seus resultados no projeto arquitetônico ao especificar ou dimensionar um duto.

Ressaltam a dificuldade encontrada em comparar os resultados fornecidos pelos modelos preditivos com os sistemas elétricos ou convencionais de iluminação.

Os autores consideram que qualquer método que pretenda prever o desempenho de um duto de luz deve ter:

- Suposição acerca da condição de céu predominante e da iluminância externa no coletor.
- A eficiência do duto de luz.
- A distribuição a partir do difusor.

Para o estudo preditivo apresentado foram revisados e utilizados os seguintes métodos de cálculo:

➤ **S-DPF e E-DPF (ZHANG, MUNEER E KUBIER, 2002)**

Método semi-empírico baseado em medições com dutos dotados de difusores opalinos (opal). É necessário fornecer os dados de altura solar e condição de céu. Apresenta dois modelos separados para dutos com e sem cotovelos.

Esses modelos conseguem diferenciar a magnitude da luz e sua direção, fornecendo como resultado as variações diárias, além de proporcionar a estimativa anual de desempenho.

A eficiência do duto é dada por uma espécie de FLD chamada de DPF (Daylight Penetration Factor) ou Fator de Penetração da Luz Natural.

➤ **Universidade de Liverpool (CARTER, 2002)**

Método semi-empírico que considera um duto de luz como uma luminária. Utiliza o fluxo luminoso medido ou estimado e sua distribuição luminosa.

As medições empíricas foram feitas em dutos dotados de difusor opalino (opal).

O fluxo luminoso que entra no sistema é baseado na iluminância externa medida e o fluxo luminoso que sai do duto é medido por um fotômetro integrador ou pode ser estimado por meio da iluminância do nadir e o fator de zona (zone factor).

CAPÍTULO II

Esse procedimento é utilizado para luminária simétrica e está descrito no CIBSE TMS. Quando utilizada a curva de intensidade luminosa para difusor opalino (opal) os resultados diferem em menos de 10%.

➤ **LUXPLOTS (JENKINS E MUNEER, 2003)**

Método semi-empírico baseado em medições realizadas em diferentes épocas do ano em localidades da Inglaterra. Tem como dados de entrada iluminância externa E_{ext} , configuração dos tubos e dos cotovelos se houver e a planta do piso.

O modelo calcula o fluxo luminoso que é emitido pelo duto e estima a distribuição em pontos colocados em um grid utilizando relações de cosseno e iluminância segundo a lei do inverso do quadrado.

Os resultados são apresentados em um plano 2d no qual, por meio de cores, são mostradas as médias de iluminância em lux ou as porcentagens de FLD.

➤ **SKY VISION SOFTWARE (LAOUADI, GALASIU, ATIF E HAQQANI, 2003)**

Escrito pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canada (National Research Council of Canada) calcula o desempenho luminoso de átrios, claraboias, zenitais convencionais e dutos de luz. Permite a inclusão de complementação por sistemas artificiais para atingir as metas de iluminância.

São necessários como dados de entrada informações sobre o ambiente, refletância, posição dos dutos, comprimento e diâmetro desses, refletância dos dutos e transmitância do difusor.

O banco de dados do programa inclui propriedade de vidros e diferentes tipos de céu, incluindo o céu padrão encoberto da CIE.

Os resultados são fornecidos em gráficos e tabelas nos quais são apresentadas as médias de iluminância no chão e ou porcentagem de FLD em áreas especificadas no ambiente.

➤ **MÉTODO DA CIE (CIE 173:2006)**

O TC3-38 propôs dois métodos, sendo um fotométrico e o outro preditivo para verificar a eficiência do fluxo emitido por dutos retos ou com cotovelos.

O método preditivo é baseado na eficiência da transmissão no tubo (TTE). Foi derivado de princípios fundamentais da física e passou por verificação através de

medições fotométricas. É recomendado apenas para condição de céu encoberto, levando em consideração a razão de aspecto e a porção de luz zenital que entra no duto (iluminância zenital). Pode ser utilizado por dutos com ou sem cotovelo.

$$TTE = \frac{e^c}{(1-c)^{0.5}} \quad \text{Equação 68}$$

$$c = AR \cdot \tan Z \cdot \log R \quad \text{Equação 69}$$

$$AR = \text{Razão de Aspecto} = \frac{L}{D} = \frac{H}{D} = \frac{\text{altura}}{\text{diâmetro}}$$

R = refletância

Z = Iluminância zenital em graus.

A eficiência do duto (E_g) é obtida correlacionando a eficiência do tubo (TTE) com as transmitâncias do dome (T_c), do difusor (T_o) e o fator de manutenção (MF).

$$E_g = TTE \cdot T_c \cdot T_o \cdot MF \quad \text{Equação 70}$$

O fluxo de entrada no duto F_e relaciona a iluminância global externa (E_h) com a área do duto (A). O fluxo de saída do duto (F_i) relaciona o fluxo de entrada (F_e) com a eficiência do duto (E_g).

$$F_i = E_h \cdot A \quad \text{Equação 71}$$

$$F_e = F_i \cdot E_g \quad \text{Equação 72}$$

Na análise da distribuição de iluminâncias no interior do ambiente esse método utiliza o Fator de Utilização (FU) para determinar o fluxo total que chega ao plano de trabalho. Para tanto são utilizadas as componentes diretas da fonte (fluxo emitido direto do duto) e indiretas (refletidas no ambiente). O Fator de Utilização é fornecido em uma tabela.

DPF (daylight penetration factor) ou Fator de Penetração de Luz Natural.

$$DPF = \frac{N \cdot F_i \cdot FU}{(A \cdot E_h)} \quad \text{Equação 73}$$

CAPÍTULO II

Onde N é o número de dutos no ambiente.

O método preditivo da CIE é manual e baseado na exploração teórica de princípios físicos confirmados por medições fotométricas e fornece dados tabulados para a aplicação por especialistas e não especialistas.

Tendo o conhecimento do fluxo luminoso emitido pelo duto e da intensidade luminosa distribuída, vários métodos permitem o cálculo da distribuição luminosa em um ambiente. Uma possibilidade é utilizar o “ponto a ponto” calculado pela lei do inverso do quadrado ou lei do coseno. Outra opção é o método dos lumens, baseado no fator de utilização (FU). Esses métodos podem ser utilizados para obter a média das iluminâncias em um plano de trabalho.

Esse artigo é finalizado com a comparação entre os resultados obtidos nas medições com os treze dutos e os resultados do estudo preditivo com os métodos acima referidos.

Por meio desse exercício chegaram à conclusão de que o método manual da CIE leva menos tempo que os computacionais e que quando houver áreas significativas de janelas ou for necessário o cálculo do DPF por ponto e não apenas a média do plano de trabalho o método da Universidade de Liverpool é uma boa ferramenta.

2.20 DUTTON E SHAO - 2007

2.20.1 Raytracing Simulation for Predicting Light Pipe Transmittance

Esse artigo foi fornecido pelo Dr Li Shao durante a visita ao Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort University em Leicester UK. Momento em que ele sugeriu o uso do software *photopia* como ferramenta adequada para as análises pretendidas do desenvolvimento da presente pesquisa.

O trabalho trata da comparação entre um software comercial (*photopia*), que usa o método *raytracing* com métodos de cálculos analíticos. Essa comparação mostrou que as simulações com *raytracing* tiveram maior precisão na predição da eficiência na transmissão da luz natural por meio de dutos que os métodos analíticos existentes.

Esse trabalho teve origem em um estudo, que objetivava validar o uso de softwares que usam *raytracing*, para a predição do desempenho de dutos de luz, e

explorar a viabilidade de utilização desses softwares para a predição de sistemas de iluminação natural.

O artigo inicia-se com a apresentação dos mais importantes métodos preditivos do desempenho de dutos de luz: Zastrow e Wittwer (1986), Swift e Smith (1995), Edmonds e Moore (1995), Zhang e Muneer (2000 e 2002) e Jenkins e Muneer (2003). Alguns desses métodos utilizam a óptica do raio para calcular a transmitância, outros utilizam equações com parâmetros derivados de estudos experimentais. Por fim, os autores comparam os resultados dos cálculos obtidos com esses métodos, com os resultados obtidos pelo *Photopia* e concluem, que este último é mais preciso.

ZASTROW E WITTWER (1986)

A transmissão do duto T é dada como:

$$T = R^{l \tan \theta / D_{\text{efetivo}}} \quad \text{Equação 74}$$

Onde:

R é a refletância do duto;

l é o comprimento do duto (m);

θ é o ângulo de incidência da radiação em relação ao eixo do duto ($^{\circ}$).

Para um duto cilíndrico reto com um diâmetro d o D_{efetivo} é:

$$D_{\text{efetivo}} = \pi d / 4 \quad \text{Equação 75}$$

Esse método se mostrou valido para dutos com baixa razão de aspecto, baixo ângulo de incidência, e alta refletância.

SWIFT E SMITH (1995)

A partir da óptica dos raios eles desenvolveram uma expressão para o cálculo da transmissão da luz através do duto. O modelo é baseado no exame dos parâmetros teóricos e empíricos que afetam a transmitância da luz. A expressão foi derivada a partir da geometria de um duto cilíndrico.

$$T = \frac{4}{\pi} \int_{s=0}^1 \frac{s^2}{\sqrt{1-s^2}} R^{\text{int}[\rho \tan \theta / s]} (1 - (1-R)(\rho \tan \theta / s - \text{int}[\rho \tan \theta / s])) ds \quad \text{Equação 76}$$

Onde, p é a razão de aspecto.

CAPÍTULO II

Esse modelo foi validado com ótimos resultados tendo como fonte de luz um raio laser, o problema é que a luz natural é composta por raios diretos e por radiação difusa, vinda da componente indireta.

EDMONDS (1995)

EDMONDS et al, (1995) desenvolveram um modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos espelhados considerando o efeito da elevação e da razão de aspecto. Eles concluíram que devido as múltiplas reflexões associadas com os baixos ângulos um duto de luz efetivo deveria estar restrito a razões de aspecto inferior a 6.

A luz que entra no duto a uma distância X do eixo pode refletir livremente em 3D no duto e não fica presa a 2D. Esse aumento da distância percorrida antes da saída do duto é dado pelo fator de ponderação W:

$$W = \frac{(R^2 - X)^{1/2}}{R} \quad \text{Equação 77}$$

A transmitância da luz pode ser encontrada pela integração do X de X=0 a X=R, sendo R o raio do duto.

$$T = 4 \int_0^R W \rho^N dx / \Pi R^2 \quad \text{Equação 78}$$

Onde:

$$N = l / 2R \cos i \tan \theta ;$$

$$i = \sin^{-1}(x/R) ;$$

R é o raio do duto (m);

θ é o ângulo de elevação ($^\circ$);

ρ é a refletância do duto.

ZHANG E MUNEER (2000 e 2002)

Eles usam dados de medições reais, para uma variedade de dutos e diâmetros, por um período de 4 meses. Os principais fatores que influenciam a determinação do fator de penetração da luz natural (DPF) estão apresentados na equação generalizada para dutos retos:

$$S - DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s^2 + a_3 k_t \alpha_s + a_4 k_t^2 \alpha_s + a_5 k_t \alpha_s^2 + a_6 k_t^2 \alpha_s^2) \rho^{(a_7 + a_8 A_p + a_9 \cot \alpha_s + a_{10} A_p \cot \alpha_s)} R^2 (H/D)^m}{D^2} \quad \text{Equação 79}$$

A equação para dutos retos foi simplificada:

$$S - DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_0 + a_1 k_t + a_2 \alpha_s)}{\rho^{(a_3 + a_4 A_p + a_5 \cot \alpha_s + a_6 A_p \cot \alpha_s)} R^2 (H/D)^m} \frac{1}{D^2} \quad \text{Equação 80}$$

Os coeficientes são derivados de uma análise paramétrica, descrita em Zhang e Muneer (2000) e Zhang, Muneer e Kubie (2002). Uma vez substituídos dentro da equação simplificada, uma equação factível é dada:

$$S - DPF_{(x,y,z)} = \frac{(62,5 - 17,2 k_t + 2,6 a)}{\rho^{(136,0 + 4,3 A_p + 1,1 \cot \alpha_s - 0,4 A_p \cot \alpha_s)} R^2 (H/D)^{1,3}} \frac{1}{D^2} \quad \text{Equação 81}$$

Com essa equação final é possível achar o DPF no ponto de interesse abaixo do difusor.

JENKINS E MUNEER (2003)

JENKINS achou problemas e limitações no modelo do ZHANG e desenvolveu um modelo que calcula os níveis de luz em dois estágios:

1º estágio utiliza a iluminância externa para obter o fluxo luminoso emitido pelo duto.

2º estágio associa o fluxo luminoso emitido com a iluminância interna e chega ao ponto, no plano de trabalho. Eles usaram os dados de JOE CALLOW, medidos em Nottingham, e a partir dos dados de fluxo luminoso coletado, obtiveram uma relação simples entre transmissão e razão de aspecto.

$$\tau = 0,82 e^{-0,11A} \quad \text{Equação 82}$$

Dado que o fluxo luminoso é:

$$\phi = \tau E \Pi r^2 \quad \text{Equação 83}$$

Combinando as duas expressões foi obtida a expressão do fluxo luminoso:

$$\phi = 0,82 E_{ex} e^{-0,11A} \Pi r^2 \quad \text{Equação 84}$$

CAPÍTULO II

Esse fluxo luminoso pode ser usado para prever a iluminância em qualquer ponto abaixo do difusor, assumindo um difusor de plástico claro. A luz recebida de uma fonte pontual pode ser derivada geometricamente como sendo:

$$E_{teórico} = \frac{I_{\theta} \cos^3 \theta}{V^2} \quad \text{Equação 85}$$

Onde:

V é a distância vertical a partir do difusor até o ponto de interesse (m);

$E_{teórico}$ é a iluminância teórica interna (lux);

I_{θ} é a intensidade da distribuição (cd);

θ é o ângulo entre a linha vertical do difusor e a linha que une o centro do difusor ao ponto de interesse ($^{\circ}$).

Usando uma aproximação empírica foi obtida a relação entre o fluxo luminoso e as iluminâncias internas:

$$E_{in} = 0,494\phi \frac{\cos^4 \theta}{V^2} \quad \text{Equação 86}$$

A principal limitação desse modelo é ser para céu encoberto apenas. Os resultados de saída podem ser usados tanto para obter o fluxo total como para verificar a distribuição no ambiente. Além das curvas e cotovelos serem considerados.

CARTER (2002)

O trabalho do Carter tem foco na distribuição da luz a partir de dutos de luz no ambiente interno.

Carter demonstra os graus de concordância entre os resultados obtidos por estudos experimental, teórico e simulados, mesmo sendo as simulações de distribuição e não de transmitância.

SOFTWARE PHOTOPIA

Existem diversas alternativas de softwares baseados em Monte Carlo, mas o *Photopia* foi escolhido por sua capacidade de simular todos os *raytracings* além de

importar objetos do CAD e disponibilizar informações técnicas e assistência em geral.

O *Photopia* difere dos demais softwares que usam *raytracing*, como o *Radiance*, por exemplo, por sua capacidade de considerar o grande número de reflexões que ocorrem dentro de um sistema de iluminação natural do tipo duto de luz.

O *Photopia* é um software de projeto de iluminação, geralmente usado para prever o desempenho de sistemas artificiais. Objetos podem ser construídos no próprio software ou importados de qualquer alternativa de CAD.

As propriedades ópticas dos objetos virtuais são definidas como reflexivas, transmissivas ou refrativas. Os materiais, com propriedades ópticas para serem aplicadas aos objetos, vêm de um banco de dados. Lâmpadas são adicionadas aos ambientes para representar as fontes de luz. No caso do estudo apresentado são o céu e o sol.

Para simular um duto de luz foi construído um domo formado por uma malha de polígonos, onde cada polígono é uma lâmpada individual, que emite luz paralela ao centro do domo. Essa malha de lâmpadas representa a luz difusa emitida pela abóbada celeste. Foi colocada uma pequena lâmpada separada dentro do domo, que emite luz paralela em uma direção, a qual representa a componente direta do sol. A quantidade de luz emitida por cada parte do céu vai depender do tipo de céu que se quer representar.

Para verificar a precisão do *Photopia* e avaliar sua adequação para a simulação de dutos de luz, foram realizados três testes analíticos. Para tanto, foi utilizado um ambiente cúbico com uma claraboia no centro. Para avaliar o desempenho do software nas três áreas-chaves foi adotada uma lâmpada simples.

Conservação do fluxo

A radiação emitida pela lâmpada deve ser tanto absorvida pelo sistema como perdida para fora do sistema. A radiação e, por consequência, a energia não desaparece. O fluxo de radiação que entra na abertura pela lâmpada deve ser igual ao total de fluxo incidente sobre as paredes internas ao ambiente.

A avaliação da conservação do fluxo que entra no edifício usando luz natural revelou que o fluxo é conservado com uma margem de erro da ordem de 0,05%.

CAPÍTULO II**Transmissão através de vidro transparente**

A transmissão através de vidro transparente se deu por simulações e cálculos com o algoritmo do *Fontoyant* para diversas alturas solares. O resultado apresentou uma diferença média de 0,33%.

Cálculo do Fator de Luz Diurna (FLD)

Foi realizada uma avaliação da precisão do software em prever a distribuição de luz dentro de um ambiente. Foi adotado céu encoberto certificado pela IES e altura solar de 90°. Foram realizadas diversas simulações, tanto para janelas como para as claraboias. Foi variado o tamanho das aberturas e medida a iluminância em pontos específicos do ambiente. Os resultados obtidos com essas simulações mostraram-se superestimados em relação aos calculados da ordem de 16,58%. A conclusão foi que houve erro no cálculo quando a luz interage com obstáculos. A conclusão para isso é que o *Photopia* sozinho não é ideal para prever a iluminação de um ambiente quando a luz passa através de uma abertura.

Foram realizadas análises paramétricas para determinar o efeito da modelagem de dutos complexos e do número de raios usados para uma simulação precisa. Chegaram à conclusão que:

- Quanto menor o número de polígonos menor o tempo para calcular, no entanto, quanto mais polígonos mais precisa a forma do duto.
- Quanto mais raios usados mais precisa a simulação. O estudo conclui que 50 milhões de raios são satisfatórios entre precisão e tempo de rodagem da simulação.

O duto foi modelado no *Rhinoceros* e importado para o *Photopia*. Os dutos foram iluminados por diversas condições de céu e alturas solares, usando um modelo de céu preexistente criado por tecnologias de iluminação. Dados de iluminância foram usados para o cálculo da eficiência da transmissão no duto. Imagens da iluminância foram plotadas com céu claro e diferentes alturas solares.

As comparações analíticas foram realizadas usando o método preditivo descrito pelo Swift e Smith (1995). Foram simulados e calculados dutos sem captador ou difusor sobre fonte de luz homogênea e paralela para diversos ângulos de incidência, com refletância interna ao duto de 95%. A comparação mostrou uma

divergência média de 0,5%. Os resultados mostram a precisão técnica do *raytracing* para a predição do desempenho de dutos simples.

Foram ainda realizados ensaios com domos coletores. A forma dos domos usados foi baseada nos disponíveis comercialmente. As propriedades ópticas transparente do acrílico foram atribuídas aos domos pelos cálculos de *raytracing*. O resultado dessa simulação mostrou que os domos têm o efeito de modificar a eficiência da transmissão. O efeito de perda de fluxo foi compensado pela normalização do fluxo transmitido na entrada do duto abaixo do domo. A colocação do domo irá afetar a composição direcional da radiação transmitida. Desse modo, a radiação incidente, de baixos ângulos, é desproporcionalmente absorvida.

A simulação foi repetida com condição de céu claro IES e duto com domos coletor. O céu claro inclui as componentes difusa e direta da radiação solar. A comparação dessa simulação mais realista com o cálculo analítico, apresentou resultados que diferem significativamente, pois os cálculos não consideram esses fatores reais.

Foram realizadas comparações entre as simulações com céu claro IES e apenas luz direta, mostrando o efeito, na transmissão, devido a radiação difusa no modelo de céu claro.

Foi feito um estudo do efeito do material reflexivo interno ao duto na transmissão da luz. Os resultados foram comparados com os cálculos com o modelo do Swift e Smith (1995) para céu claro com altura solar de 40° e refletância dos dutos de 90%, 95% e 100%. A refletância dos dutos simulados mostrou ser o grande fator de contribuição para a eficácia na transmissão da luz.

Os resultados simulados foram ainda comparados com dados obtidos em estudo experimental. Foram tomadas medidas externas e internas por um período de 6 dias. Os resultados medidos sob condições de céu encoberto apresentaram curvas similares aos dados simulados, o que não ocorreu para condição de céu claro.

A comparação entre ensaio e simulação apresentou uma divergência da ordem de 10% com céu claro e 7% com céu encoberto.

Os autores concluem que modelos preditivos como o do Swift e Smith (1995) e do Edmond (1995) são precisos para o cálculo de dutos simples, e sendo assim,

CAPÍTULO II

são ideais para testar a precisão de softwares baseados em *raytracing* na fase inicial. No entanto, eles não consideram o efeito da geometria do difusor ou o efeito da radiação difusa. Desse modo, quando o objeto de estudo é mais complexo, como os dutos em condição real de exposição, esses modelos apresentam erros intrínsecos as suas simplificações.

O uso de *raytracing* permite a inclusão de fatores conhecidos por influenciar o desempenho dos dutos de luz, como por exemplo, os cotovelos, os domos coletores e os difusores.

O software *Photopia* tem três tipos de céu disponíveis e baseados no trabalho da IES chamados de encoberto, parcialmente encoberto e claro.

As análises revelam que é importante a precisão na refletância das superfícies representada para a predição do desempenho de dutos de luz.

Os resultados mostraram que o uso de domos e a radiação difusa afetam a transmissão da luz na ordem de 6% em relação ao montante inicial para as alturas solares simuladas.

O estudo experimental mostrou-se inconclusivo devido as várias incertezas apresentadas.

Devido a precisão obtida com o software *Photopia* em relação ao modelo preditivo analítico do Swift e Smith (1995), pode-se concluir que o *Photopia* é uma ferramenta capaz de prever o desempenho de dutos de luz e oferece vantagens consideradas em relação aos modelos analíticos e empíricos existentes.

2.21 SWIFT *et al.* - 2008

2.21.1 Rectangular – section mirror light pipes

Este trabalho propõe um modelo de cálculo preditivo da transmissão luminosa por dutos com seção retangular, espelhados internamente, baseado na adaptação do modelo proposto por Powell (1974) para dutos cilíndricos.

O modelo apresentado é baseado na teoria do *raytracing* para correlacionar área da base com o comprimento do duto (razão de aspecto – “aspect ration”), com o número de reflexão dos diversos raios paralelos que são refletidos ‘n’ vezes nas superfícies espelhadas, da entrada até a saída do duto.

Segundo a teoria apresentada a transmitância de um único raio (T_1) para atravessar um duto espelhado é dada por:

$$T_1 = \prod_{k=1}^n R_k \quad \text{Equação 87}$$

Onde, R_k é a refletância material interno ao duto, no qual o raio é refletido k vezes e n é o número de vezes que o raio refletiu da entrada até a saída do duto. A equação para a transmitância (T) do duto de luz espelhado é:

$$T_1 = \frac{1}{A} \int \prod_{k=1}^n R_k dA \quad \text{Equação 88}$$

Onde A é a área de seção do duto.

Adaptando a equação 88 para o caso de dutos com seção retangular de lado a e b , se tem:

$$T_1 = \frac{1}{ab} \int_{x=0}^a \int_{y=0}^b R_x^{n_x} R_y^{n_y} dx dy \quad \text{Equação 89}$$

Onde n_x e n_y são, respectivamente, o número de reflexão que o raio faz com o lado do duto paralelo ao plano x - z e y - z , cujas refletâncias são R_x e R_y .

O número de reflexões dos dois lados do duto que são paralelos ao plano x - z são tanto n_x ou n_{x+1} , onde:

$$n_x = \text{int} \left[\frac{l \tan \theta \cos \beta}{a} \right] \quad \text{Equação 90}$$

Onde a é o comprimento do lado da abertura na direção do x e $\text{int}[k]$ é a parte inteira do k . O ponto no eixo x , x_n , na abertura de entrada, onde o número de reflexão varia de n_{x+1} até n_x , é:

$$x_n = l \tan \theta \cos \beta - a \text{int} \left[\frac{l \tan \theta \cos \beta}{a} \right] \quad \text{Equação 91}$$

A qual pode ser mais sucinta, se usar a função modular,

$$x_n = a \text{mod}(\rho_a \tan \theta \cos \beta, 1) \quad \text{Equação 92}$$

Onde, $\rho_a = l/a$ é a razão de aspecto com relação ao lado a . O mesmo ocorre com os raios que são paralelos ao plano y - z .

$$n_y = \text{int} \left[\frac{l \tan \theta \sin \beta}{b} \right] \quad \text{Equação 93}$$

CAPÍTULO II

Onde b é o comprimento do lado na direção y , e:

$$x_y = b \bmod(\rho_b \tan \theta \sin \beta, 1) \quad \text{Equação 94}$$

Onde, $\rho_b = l/b$ é a razão de aspecto com relação ao lado b . O ângulo de incidência (ϕ) que um raio reflete nas superfícies e intercepta o eixo x e y são, respectivamente, equações 95 e 96:

$$\cos \phi = \sin \theta \cos \beta \quad \text{Equação 95}$$

$$\cos \phi = \sin \theta \sin \beta \quad \text{Equação 96}$$

Usando a equação 89 e as definições de x_n , y_n , n_x e n_y a equação para a transmitância luminosa em dutos retangulares espelhados é:

$$T = R_x^{n_x} R_y^{n_y} \left(1 - (1 - R_x) \frac{x_n}{a} \right) \left(1 - (1 - R_y) \frac{y_n}{b} \right) \quad \text{Equação 97}$$

A luz irradiada na saída do duto pode ser determinada considerando a projeção de um raio paralelo as paredes do duto. Considerando primeiramente um raio, cuja projeção é paralela ao eixo x , chegara a seção de saída com n_x ou n_{x+1} reflexões. A intensidade na saída ($I_e(x)$), relativa a intensidade de incidência uniforme, é dada por:

$$I_e(x) = \begin{cases} (1 + R_x) R_x^{n_x \bmod(n_x + 1, 2)}, & 0 < x < x_n, \\ R_x^{n_x}, & x \in [x_n, a - x_n], \\ (1 + R_x) R_x^{n_x \bmod(n_x + 2)}, & a - x_n < x < a \end{cases} \quad \text{Equação 98}$$

Uma equação similar pode ser utilizada para os raios projetados paralelos a direção y . A irradiação na saída (O) pode ser equacionada como:

$$O(x, y) = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 P_{ij} \theta_{ij} \quad \text{Equação 99}$$

Onde,

$$P_{ij} = R_x^{n_x} R_y^{n_y} \left((1 + R_x) \bmod \left(n_x + \frac{3-i}{2}, 2 \right) \right)^{\bmod(i, 2)} \\ \times \left((1 + R_y) \bmod \left(n_y + \frac{3-j}{2}, 2 \right) \right)^{\bmod(j, 2)} \quad \text{Equação 100}$$

E o θ é a função bidirecional *top-hat*,

$$\theta_{ij} = \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 \varepsilon_{pq} H(x - x_{i+p}, y - y_{j+q}) \quad \text{Equação 101}$$

Onde H é a função bidirecional *Heaviside step*, e $x_1=0$, $x_2=x_n$, $x_3=a-x_n$, $x_4=a$, $y_1=0$, $y_2=y_n$, $y_3=b-y_n$, $y_4=b$, e:

$$\varepsilon_{pq} = \begin{cases} +1 & p = q, \\ -1 & p \neq q. \end{cases} \quad \text{Equação 102}$$

O termo P_{ij} descreve a intensidade de cada uma das nove seções da saída devida as múltiplas reflexões descritas pela equação 95, e o termo θ_{ij} descreve os contornos de cada seção da qual a irradiação é igual.

O modelo teórico matemático proposto é confirmado por meio de experimentação empírica em laboratório com um esquema montado por um duto, um led como fonte luminosa, uma lente que torna a radiação emitida pela fonte paralela e uma esfera integradora na saída do duto.

Os resultados da comparação entre os dados medidos e calculados mostraram concordância entre si.

2.22 KOCIFAJ *et al.* - 2008

2.22.1 HOLIGILM: hollow light guide interior illumination method – an analytic calculation approach for cylindrical light tubes

Este trabalho propõe um modelo físico baseado em raytracing para o cálculo da iluminância interior de um ambiente, obtida a partir de um duto circular com alta refletância interna.

O modelo leva em consideração para o cálculo da iluminância no plano de trabalho as relações entre: abóbada celeste incluindo o sol, duto difusor com alta refletância interna, dotado de domos acrílico transparente na entrada, com coeficiente de transmissão conhecido, difusor com transmissão conhecida na saída e a geometria do ambiente interno.

O modelo é considerado físico por considerar a influência das propriedades ópticas dos dutos para obter o fluxo luminoso que parte do duto e determinar a distribuição das iluminâncias no plano de trabalho.

A ferramenta *Holigilm* integra luz do céu e luz do sol por meio de seus ângulos sólidos de propagação, usando a ideia de *raytracing*. Parte das

CAPÍTULO II

recomendações da CIE e ISSO 15469:2004 para predeterminar a iluminância interna e sua distribuição, com resultados obtidos bem próximos a realidade.

As principais vantagens desse método são as possibilidades de identificar e ajustar as chamadas áreas de “*hot-spot*” e fornecer a distribuição de iluminâncias em lux no ambiente interno.

2.23 KOCIFAJ - 2009

2.23.1 Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing

Este trabalho propõe generalizar e adaptar o modelo teórico *Holigilm* previamente apresentado pelo mesmo autor e outros (KOCIFAJ et al., 2008). Esse modelo originalmente utilizado para prever a transmissão luminosa obtida a partir de um duto com difusor Lambertiano (difusor perfeito) na saída agora possibilita prever a transmissão luminosa obtida a partir de material transparente.

Nesse artigo contém a explicação de como foi utilizado o método *Holigilm* por meio da ferramenta computacional *roof_v3* para dimensionar a eficiência de dutos de luz independente de o material ser difusor ou transparente na saída.

O aplicativo *roof_v3* oferece como resultado gráfico as curvas de distribuição de iluminâncias no plano de trabalho.

Com a ferramenta apresentada é possível estudar vários dutos em um mesmo ambiente sob condições de céu claro, parcial ou encoberto. É necessário fornecer dados de entrada como a latitude, altura solar, azimuth solar, azimuth do ambiente e as coordenadas x, y e z do ponto no plano de trabalho em relação ao centro da saída do duto no ambiente.

2.24 MOHELNILKOVA - 2009

2.24.1 Tubular light guide evaluation

Esse trabalho apresenta um modelo matemático, baseado em fundamentação teórica e geométrica, o qual foi programado em procedimento computacional. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de medições em dutos instalados em um corredor de uma escola. Nas conclusões é apresentado um roteiro de diretrizes para auxiliar no projeto de dutos de luz.

A exploração teórica considerou como dados de entrada os parâmetros listados a seguir:

- Ângulo de elevação que afeta o raio luminoso;
- Número de raios de luz que incidem no duto;
- Diâmetro e comprimento do duto;
- Propriedades ópticas dos componentes do duto de luz, como a transmitância luminosa e a refletância do duto.

Os resultados calculados são valores da intensidade luminosa relativa na saída do duto. Toda luz incidente tem uma intensidade relativa que é representada por um vetor:

$$\vec{I} = \vec{I}_{in} / \vec{I}_{out} \quad \text{Equação 103}$$

Onde I_{in} é a intensidade do raio que entra no duto e I_{out} é a intensidade do raio que sai do duto.

O transporte do raio de luz é descrito pela coordenada P_i (P_{ix} , P_{iy} , P_{iz}) e as reflexões são determinadas por i reflexões:

$$P_{ix} = r \cos v_i \quad \text{Equação 104}$$

$$P_{iy} = r \sin v_i \quad \text{Equação 105}$$

$$v_i = i\pi - (2i - 1)v_0 = i(\pi - 2v_0) + v_0 \quad \text{Equação 106}$$

Onde:

r é o raio do duto (m);

v_i é o ângulo da linha normal ($\vec{n}$) do ponto de reflexão do raio luminoso (P_i) com o eixo x .

$$P_{iz} = l_0 - i\Delta_z \quad \text{Equação 107}$$

$$l_0 = l + z_0 \quad \text{Equação 108}$$

Onde:

l é o comprimento do duto (m);

z_0 é a coordenada vertical do ponto P_0 a partir da entrada do duto de luz;

Δ_0 é a distância vertical entre duas reflexões vizinhas nas superfícies do duto.

CAPÍTULO II

Isso é válido para o raio luminoso $\vec{s}_i$ depois de i reflexões, se:

$$0 < P_{iz} = l_0 - i\Delta_z < |\Delta_z| \quad \text{Equação 109}$$

$$P_{i+1,z} = l_0 - (i+1)\Delta_z \quad \text{Equação 110}$$

Então o raio luminoso após i reflexões intercepta o plano horizontal da saída no ponto D (d_x, d_y, d_z) onde $d_z=0$.

As coordenadas do ponto D são determinadas com base em análise vetorial:

$$\vec{r}_D - \vec{r}_{pi} = \zeta(\vec{r}_{pi+1} - \vec{r}_{pi}) \quad \text{Equação 111}$$

As coordenadas do ponto na saída são determinadas por:

$$d_x = P_{i,x} + \zeta(P_{i+1,x} - P_{i,x}) \quad \text{Equação 112}$$

$$d_y = P_{i,y} + \zeta(P_{i+1,y} - P_{i,y}) \quad \text{Equação 113}$$

$$d_z = 0 = P_{i,z} + \zeta(P_{i+1,z} - P_{i,z}) = l_0 - i\Delta_z - \zeta\Delta_z, \zeta = \frac{l_0}{\Delta_z} - i \quad \text{Equação 114}$$

O vetor da intensidade relativa ao raio luminoso na saída do duto é definido por:

$$\begin{aligned} \vec{I}_i &= \vec{I}_{i,x} + \vec{I}_{i,y} + \vec{I}_{i,z} \\ &= I(\sin\theta \cos\sigma_i \vec{e}_x + \sin\theta \cos\sigma_i \vec{e}_y + \cos\theta \vec{e}_z) \end{aligned} \quad \text{Equação 115}$$

Onde:

$$\sigma_i = \nu_i + \nu_0 = i\pi - 2(i-1)\nu_0 \quad \text{Equação 116}$$

Onde:

σ_i é o ângulo entre o raio refletido e o eixo x ($^\circ$);

i é o número de reflexões;

θ é o ângulo de incidência do raio luminoso ($^\circ$).

$$\cos\theta = \cos\delta \cos\varphi \cos\lambda + \sin\delta \sin\varphi \quad \text{Equação 117}$$

Onde:

δ é a declinação solar;

φ é a latitude;

λ é a hora.

Foi assumido que todo ponto na saída tem um vetor de intensidade ($\vec{I}_i$) de valor absoluto $|\vec{I}_i|$ dependente do número de reflexões dentro do duto e das propriedades ópticas deste.

$$|\vec{I}_i| = |\vec{I}_{out}| \tau_0 (\rho)^i \quad \text{Equação 118}$$

Onde:

τ_0 é a transmitância da cobertura no telhado;

ρ é a refletância no duto.

Os raios luminosos afetam o duto de luz em níveis de incidência (j), os quais são determinados por um plano vertical paralelo ao eixo x . O número de níveis j são determinados por:

$$j = 2u - 1 \quad \text{Equação 119}$$

$$u = \pi / (2\Delta_x) \quad \text{Equação 120}$$

Onde:

Δ_x é a distância do nível individual.

O modelo apresentado foi programado em linguagem computacional *Matlab*. Com este, foi rodada uma simulação, e seus resultados foram comparados com fotos de luminância tiradas de um duto real.

Na parte experimental do estudo foram realizadas avaliações da iluminância disponível no difusor do forro para dutos de 0,25; 0,5 e 0,75m de diâmetro e 5m de comprimento.

As luminâncias dos difusores determinadas foram:

$L_d = 1000 \text{ cd m}^{-2}$ para céu encoberto.

$L_d = 4000 \text{ cd m}^{-2}$ para céu parcialmente encoberto.

$L_d = 12000 \text{ cd m}^{-2}$ para céu claro.

Foram ainda, investigadas as iluminâncias internas no plano horizontal de interesse a 0, 1, 2 e 3m do eixo vertical com o difusor no plano de trabalho 2m abaixo do difusor.

CAPÍTULO II

Medições de controle da iluminância interna foram feitas em dutos de 0,52m de diâmetro e 4,8m de comprimento com o plano de trabalho a 2m abaixo do forro. Os dutos estão instalados em um corredor sem janelas de um edifício escolar.

O modelo apresentado compara a distribuição luminosa na saída do duto de luz. Como resultado, obteve-se que, dutos curtos com grandes diâmetros transmitem raios luminosos não uniformes. Se iluminado com alta intensidade luminosa, varia com a posição, mas sem alterar a propagação do raio.

As fotos de luminância mostraram que a distribuição luminosa não é uniforme mesmo sob condição de céu encoberto. O mapa da luminância é simétrico ao ponto central quando sob condição de céu encoberto, e é simétrico ao meridiano solar quando sob condição de céu claro.

A média das iluminâncias medidas sob condições reais foi de 200lx com céu encoberto e o máximo valor obtido foi com céu claro de 1280lx.

O autor conclui que o modelo apresentado está completo para avaliar o transporte do raio luminoso por dutos retos de diferentes diâmetros e comprimentos sob condições de céu claro, com a presença de radiação direta do sol. Este representa um método de avaliação para otimizar a aplicação de dutos de luz tubular em edifícios.

Por meio do monitoramento realizado, conclui-se que durante os dias de céu encoberto a intensidade luminosa do difusor é mais uniforme e a distribuição de iluminâncias no plano de trabalho vão ser mais simétricas ao redor do centro do difusor, enquanto que em dias de céu claro, a distribuição de iluminâncias irá variar e brilhos excessivos podem aparecer em determinados pontos do difusor (*spots*).

Os resultados calculados e os dados medidos forneceram parâmetros e requisitos para projetos de dutos de luz:

- Recomenda-se domos com material anti-reflexivo e de alta transmitância luminosa;
- Para fornecer uma luz distribuída uniformemente, recomenda-se, que o difusor ou fechamento transparente no forro seja padronizado;
- O duto deve ser altamente reflexivo e, se possível, sem juntas ou defeitos.

- Recomenda-se o uso de dutos curtos, com controle da luz excessiva para os dias claros e a eliminação do ofuscamento;
- Recomenda-se otimizar a geometria por meio de razões de aspecto de 1/10 e no máximo 1/20, visto que dutos muito longos não são eficientes;
- Dutos com diâmetro muito pequeno também não são eficientes, devido as perdas por reflexões internas;
- Os dutos tubulares são muito eficientes sob a radiação direta, e perdem a eficiência sob condição de céu encoberto.

2.25 LUZ – 2009

2.25.1 Condução da luz natural por sistemas não convencionais (dissertação de mestrado)

Essa pesquisa trata da condução da luz natural, por sistemas não convencionais, para aproveitamento em ambientes internos. Para avaliar a eficiência luminosa dos sistemas condutores não convencionais, foram utilizados dutos com seção quadrada de lados 10cm, 25cm e 40cm e comprimentos de 1m, 1,5 e 2m, revestidos internamente por espelhos *Optimirror Plus*. O método utilizado foi 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. Esta foi 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 com lados 10cm, 25cm e 40cm e nos comprimentos 1m, 1,5m e 2m; e (4) modelo preditivo de eficiência luminosa em dutos (MPELD).

O desenvolvimento do MPEDL foi baseado no conceito do ângulo sólido projetado ou princípio do hemisfério unitário. Para tanto foi adotada condição de céu uniforme como fonte de aquisição luminosa (fonte de luz).

CAPÍTULO II

Desse modo, foi considerada a área da seção de entrada do duto de luz como sendo um plano emissor, cuja luminância é a obtida a partir de um plano horizontal desobstruído (considerando uma situação real). A transmissão luminosa nesse caso é difusa e a transferência do fluxo luminoso ocorre do plano difusor (entrada do duto) para o ponto (centro da saída do duto).

Ilustração 11. Transmissão do fluxo luminoso por superfície difusora.

O modelo proposto prevê a eficiência do duto de luz (EDL), sendo essa a razão de fluxos luminosos (entrada e saída do duto), ou seja, entre a luz obtida na saída do duto e a disponibilidade de luz na abóbada celeste ou no plano horizontal da seção de entrada do mesmo (ver equação 125).

Ilustração 12. Transferência de fluxo luminoso da superfície difusa para o ponto no centro do duto.

O EDL é obtido por meio da somatória das iluminâncias adquiridas a partir da área de seção da entrada do duto, bem como de suas imagens refletidas nos

espelhos, considerando as sucessivas perdas devidas a absorção nas múltiplas reflexões ao longo do comprimento do duto.

O procedimento adotado para somar a contribuição de cada imagem da fonte inicial (plano iluminado da seção de entrada) foi a projeção dessas no hemisfério unitário por meio do ângulo sólido formado entre o plano luminoso e o ponto central da seção de saída do duto de luz, ou seja, transporta-se a luminância da seção de entrada e de suas reflexões nos espelhos do duto para o hemisfério unitário.

As luminâncias projetadas no hemisfério unitário estão dentro de ângulos sólidos, formando com o eixo vertical central ao duto ângulos θ_i , os quais são os vértices dos triângulos retângulos cuja base é o segmento $[(b \cdot i) + b/2]$, onde b é a largura da seção de entrada do duto e a altura (h) é o comprimento do duto. O valor do ângulo θ_i é determinado por meio do arco tangente, conforme a equação 121:

$$\theta_i = \text{atg} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \quad \text{Equação 121}$$

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;

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 122 e 123:

$$a_i = \sin \theta_i \cdot r \quad \text{Equação 122}$$

$$A_i = (a_i^2 - a_{i-1}^2) \cdot \pi \quad \text{Equação 123}$$

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;

r é o raio do hemisfério, neste caso $r=1$.

CAPÍTULO II

Ilustração 13. Luminâncias projetadas no hemisfério unitário

Ilustração 14. Coroa circulares

A iluminância E_i é a parcela de contribuição de cada coroa circular. O somatório de E_i para todas as coroa 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 124.

$$E_i = A_i \cdot L_0 \cdot \rho^i \quad \text{Equação 124}$$

Onde:

E_i é a iluminância de cada coroa circular (lux);

A_i é a área da coroa circular (m^2);

L_0 é a luminância na entrada do duto (cd/m^2);

ρ é a refletância interna ao duto;

CAPÍTULO II

Desse modo, com as quatro equações anteriores 121, 122, 123 e 124 obtém-se o valor de EDL, equação 125:

$$EDL = \frac{E_p}{E_{ext}} = \frac{\sum_{i=0}^n E_i}{\pi \cdot L_0} \quad \text{Equação 125}$$

Onde:

EDL é a eficiência em dutos de luz;

E_p é a iluminância na saída do duto (lux);

E_{ext} é a iluminância disponível no plano horizontal desobstruído (lux);

E_i é a iluminância de cada coroa circular (lux);

L_0 é a luminância na entrada do duto (cd/m^2);

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

Assim, com a síntese das anteriores, por meio das substituições a seguir, obtém-se a equação 131.

Substituindo a equação 121 na equação 122 obtém-se a equação 126:

$$a_i = \sin \cdot \text{atg} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \quad \text{Equação 126}$$

Substituindo a equação 122 na equação 123 obtém-se a equação 127:

Para $i = 0$;

$$A_0 = \sin^2 \cdot \text{atg} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h} \right) \cdot \pi \quad \text{Equação 127}$$

Para $i > 0$;

$$A_i = \left\{ \sin^2 \cdot \text{atg} \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] - \sin^2 \cdot \text{atg} \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \right\} \cdot \pi \quad \text{Equação 128}$$

Substituindo as equações 127 e 128 na equação 124 obtém-se as equações 129 e 130:

Para $i = 0$;

$$E_0 = \sin^2 \cdot \operatorname{atg}\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h}\right) \cdot \pi \cdot L_0 \cdot \rho^0 \quad \text{Equação 129}$$

Para $i > 0$;

$$E_i = \left\{ \sin^2 \cdot \operatorname{atg}\left[\left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{b}{h}\right] - \sin^2 \cdot \operatorname{atg}\left[\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{b}{h}\right] \right\} \cdot \pi \cdot L_0 \cdot \rho^i \quad \text{Equação 130}$$

Substituindo as equações 129 e 130 na equação 125 obtém-se a equação 131:

$$EDL = \sin^2 \cdot \operatorname{atg}\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h}\right) + \sum_{i=1}^n \left\{ \sin^2 \cdot \operatorname{atg}\left[\left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{b}{h}\right] - \sin^2 \cdot \operatorname{atg}\left[\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{b}{h}\right] \right\} \cdot \rho^i \quad \text{Equação 131}$$

Onde:

n é o número de reflexões do plano emissor;

Os valores absolutos de EDL, obtidos por meio da equação 131, podem ser expressos em porcentagem, assim como ocorre com o fator de luz diurna (FLD).

Os dados de eficiência (EDL) calculados e medidos, mostram valores percentuais próximos. A correlação entre os resultados do modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPEDL) e os medidos no levantamento empírico são considerados altos ($r^2=0,98$). Considerando a correlação obtida, fica evidente a correspondência entre o modelo proposto e os testes realizados com modelos físicos sob condições reais de exposição. Assim, para dutos de seção quadrada revestidos internamente por espelhos o MPEDL mostrou-se satisfatório na predição do EDL.

2.26 LI *et al.* - 2010

2.26.1 An Analysis of light pipe system via full-scale measurements

Esse trabalho foi motivado pelos problemas de iluminação comuns nos blocos de edifícios muito altos e próximos, na cidade de Hong Kong. No entanto, mesmo com a falta de luz natural, dutos não são bem aceitos neste cenário, devido aos poucos dados locais para verificar o desempenho desses, a quantia de energia economizada e as implicações no projeto.

Assim sendo, esse estudo apresenta medições de iluminância em vários dutos instalados em um corredor. Os resultados obtidos demonstraram que o

CAPÍTULO II

sistema duto de luz pode fornecer iluminância suficiente, melhorar a uniformidade da luz natural e tem alto potencial para reduzir os custos com o consumo de energia elétrica.

2.27 BARONCINI *et al.* - 2010**2.27.1 Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission**

Nesse trabalho é apresentado um aparato tecnológico novo, projetado como uma evolução do duto de luz tradicional, o qual, distribui luz em áreas do subsolo de edifícios, iluminando ao mesmo tempo as áreas de passagem. É composto por um grande coletor e um segundo duto transparente sobreposto ao primeiro. Diferente dos dutos tradicionais, esse pode ser localizado no centro do ambiente, devido sua dupla função de iluminação. Além do projeto tecnológico do duplo duto são apresentados os resultados da análise experimental realizada com dutos em escala 1:2.

A inovação tecnológica do duplo duto é obtida pela sobreposição dos dutos, o que garante o desempenho parecido com o duto tradicional na porção final e ainda tem o ganho de iluminar de modo diferenciado os ambientes de passagem, com uma luz uniforme e de alta qualidade. Os autores indicam seu uso em ambientes grandes, como as plantas profundas, como as de *show rooms* e museus.

A tecnologia aplicada no duplo duto consiste na modificação do coletor e da seção de transporte. São dois dutos concêntricos, sendo o de dentro similar aos dutos de luz tradicionais, no entanto, sua parte externa também é revestida pelo mesmo material reflexivo da superfície interna. Já o duto externo é feito de material transparente, como o policarbonato. O captador utilizado é de grande dimensão, sendo capaz de captar luz para as duas cavidades internas aos dutos.

O modelo em escala reduzida (1:2) do duplo duto foi confeccionado na Universidade de Pescara, no laboratório de física. Este conta com 2 pavimentos, o de passagem e o final. Nos ensaios realizados, foi percebida a presença de alto brilho na porção superior do duto, no ambiente de passagem, em alguns horários sob condição de céu claro, o que pode causar ofuscamento. A solução proposta foi cobrir a parte crítica com filme da 3M, para reduzir o alto brilho sem, no entanto, reduzir demasiadamente os níveis de iluminância no plano de trabalho.

Os autores concluem o trabalho afirmando ser o duplo duto um equipamento eficaz no transporte de luz natural para plantas profundas e ambientes subterrâneos.

2.28 SWIFT - 2010

2.28.1 Splayed mirror light pipes

Esse trabalho trata da transmissão luminosa em dutos espelhados de seção retangular chanfrados na seção de entrada. Devido ao chanfro, será necessário menor número de reflexões para ter uma boa transmissão luminosa. Assim, o que pode ajudar é a utilização de painéis cortados a laser ou um difusor acoplado na entrada.

A teoria apresentada baseia-se no duto espelhado de seção retangular, iluminado por raios de luz retificados a um ângulo arbitrário, definido por dois ângulos, o de incidência (θ) e o de rotação (β), e está relacionado ao azimuth solar. A transmissão luminosa de um único raio é dada pela equação 132:

$$T_i = \prod_{k=1}^n R_k \quad \text{Equação 132}$$

Onde R_k é a refletância do duto por k reflexões e n é o número total de reflexões.

A transmissão de raios em planos bidimensionais é:

$$T_2 = \frac{1}{S} \int_S \prod_{k=1}^n R_k(s) ds \quad \text{Equação 133}$$

Onde s é o eixo definido pela intersecção do plano de incidência e o plano de abertura. A transmissão em 3 dimensões é:

$$T = \frac{1}{A} \int_A \prod_{k=1}^n R_k dA \quad \text{Equação 134}$$

Onde A é a área de abertura.

Para resolver a transmissão luminosa para um duto espelhado chanfrado de qualquer seção seria necessário utilizar raytrace. Mas para seção retangular é possível encontrar uma equação que se ajuste. Se o raio entra com $s=0$ e o ângulo de incidência θ_n , tendo n reflexões no percurso, então o raio que entra com $s>0$ com n ou $n+1$ reflexões, onde n é dado pela solução da equação 138:

CAPÍTULO II

$$\text{sen}(n\phi) \cos[(n-1)\phi] + \tan \theta \text{sen}(n\phi) \text{sen}[(n-1)\phi] + (\bar{d} - l \tan \theta) \text{sen} \phi / D = 0 \quad \text{Equação 135}$$

$$\bar{d} = (d + D) / 2 \quad \text{Equação 136}$$

O ângulo de incidência (θ_n) é dado por:

$$\tan \theta_n = \frac{D \cos[(n+1)\phi] \text{sen}(n\phi) - (\bar{d} + s) \text{sen} \phi}{l \text{sen} \phi - D \text{sen}[(n+1)\phi] \text{sen}(n\phi)} \quad \text{Equação 137}$$

O que pode ser resolvido por n em termos do parâmetro do duto espelhado e θ ,

$$n = \text{int} \left[\frac{1}{\phi} \text{sen}^{-1} \left(\sqrt{v^2 / 2 - uw - v \sqrt{(v/2)^2 - uw - w^2}} \right) \right] \quad \text{Equação 138}$$

Onde $\text{int}[x]$ é a parte inteira de x e:

$$u = \text{sen}(\theta + \phi) \quad \text{Equação 139}$$

$$v = \cos(\theta + \phi) \quad \text{Equação 140}$$

$$w = ((\bar{d} - D - l \tan \theta) / D) \text{sen} \phi \cos \theta \quad \text{Equação 141}$$

Para o caso de $d=D$ então $\phi=0$. Nesse caso, a equação 138 não vale e tem que achar o n substituindo $d=D$ e $\phi=0$ na equação 137.

Considerando um duto chanfrado a equação equivalente a 138 é dada por n_x e n_y , se (d,D) forem substituídos, respectivamente, por $(a/\cos\beta, A/\cos\beta)$ e $(b/\text{sen}\beta, B/\text{sen}\beta)$. A transmissão luminosa de um duto espelhado retangular com refletância constante é:

$$T = \frac{1}{ab} \int_0^a \int_0^b R^n dy dx \quad \text{Equação 142}$$

Onde $n=n_x+n_y$.

A equação 142 pode ser integrada analiticamente para o caso de um duto retangular, considerando um raio projetado onde um plano é perpendicular ao plano $y-z$ e é parte do duto espelhado bidimensional, o qual a abertura de entrada forma este plano. Pegue o plano na entrada bidimensional, onde o número de reflexões pode ser aumentado por n_x para n_x+1 sendo S_{n_x} , então a equação 142 se torna:

$$T = R^{n_x+n_y} \left[\frac{S_{n_x}}{a} + R \left(1 - \frac{S_{n_x}}{a} \right) \right] \left[\frac{S_{n_y}}{b} + R \left(1 - \frac{S_{n_y}}{b} \right) \right] \quad \text{Equação 143}$$

Onde S_y é o ponto do plano bidimensional da entrada, no qual o número de reflexões foi aumentado de n_y para n_{y+1} , e está posicionado no plano $x-z$. A tarefa

agora é encontrar a equação para S_{nx} e S_{ny} , sendo estes mais abrangentes que o modelo proposto por Swift e Smith (1995), pois considera uma variedade de ângulos de incidência, para o qual o número de reflexões tem o mesmo valor para qualquer ponto da entrada, o que não vale para dutos chanfrados.

$$S_n = \bar{a} - A - l \tan \theta + A \frac{\sin[(n+1)\phi]}{\sin \phi} (\cos(n\phi) + \tan \theta \sin(n\phi)) \quad \text{Equação 144}$$

Se essa equação 144 é considerada em função do θ , então a solução de $S_n > a$ corresponde aos ângulos de θ , que os raios formam com o mesmo plano bidimensional do duto, para todas as n reflexões que o atravessam. O valor usado de S_n , S_n' pode ser expresso como:

$$S_n' = 1 - (1 - S_n) \sum_{i=0}^n H(\theta - \theta_{\min,i}) - H(\theta - \theta_{\max,i}) \quad \text{Equação 145}$$

Onde H é a função *step* e $\theta_{\min,i}$ e $\theta_{\max,i}$ são respectivamente os valores mínimos e máximos do ângulo de incidência para a equação 145, que é válida com:

$$\theta_{\min,i} = a \tan \left\{ \frac{-\bar{d} \sin \phi + D \cos[(i+1)\phi] \sin(i\phi)}{l \sin \phi - D \sin[(i+1)\phi]} \right\} \quad \text{Equação 146}$$

e

$$\theta_{\max,i} = a \tan \left\{ \frac{(\bar{d} - D) \sin \phi + D \cos[(i+1)\phi] \sin(i\phi)}{l \sin \phi - D \sin[(i+1)\phi]} \right\} \quad \text{Equação 147}$$

Como resultado da modelagem o autor obteve um aumento significativo na transmissão luminosa com o aumento de apenas meio ponto no ângulo de incidência, sendo este significativo para grandes razões de aspecto.

Com o chanframento do duto, poucos raios sofrem desvios e o efeito da múltipla reflexão, no interior do duto, fica minimizado, visto que vários raios chegam direto a saída. Assim sendo, os resultados mostraram que os dutos chanfrados aumentam significativamente a transmissão luminosa e que a fração de ganho é maior quanto maior for o ângulo de incidência da luz.

A equação da transmissão luminosa de dutos com seção quadrada espelhados e chanfrados foi derivada integrando uma equação que usa raytracing. O aumento da transmissão luminosa foi quantificado e é relativamente maior quanto maior for a razão de aspecto.

CAPÍTULO II

Apesar da transmissão luminosa ser o parâmetro mais importante na descrição de um duto espelhado, o conceito mais prático é o fluxo luminoso emitido na saída, este considera tanto a transmissão luminosa quanto a radiação incidente e a disponibilidade de luz na abóbada celeste.

Os estudos apresentados mostraram que os dutos chanfrados aumentam consideravelmente o fluxo emitido na saída. Esse aumento ocorre nos meses de inverno ou quando o sol está mais baixo.

A abertura de entrada fica reduzida no duto chanfrado, o que promove menor fluxo luminoso quando o sol está alto e maior fluxo luminoso emitido na saída quando o sol está baixo e a disponibilidade de luz é menor.

2.29 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 2, revisão histórica e estado da arte, apresenta as principais pesquisas sobre condução e distribuição da luz natural a partir de dutos de luz, ressaltando os modelos matemáticos preditivos da eficiência luminosa propostos por diversos autores, desde 1984 até 2014 por meio de exploração teórica dos fenômenos físicos relativos a iluminação natural e pesquisas empírica.

Desses os mais importantes para a presente pesquisa, são os modelos de Zastrow e Wittwer (1986) apresentado por Swift e Smith (1995), Edmonds e Moore (1995), Zhang e Muneer (2000 e 2002), Jenkins e Muneer (2003) e o método da CIE 173:2006 (2006), por formarem o repertório de conhecimento acerca da transmissão luminosa em dutos e dos processos empíricos para verificação de modelos obtidos teoricamente, e o modelo MPELD (LUZ, 2009), por ser a base e parte do modelo proposto MDDL e apresentado no capítulo 5.

Alguns modelos foram organizados em rotinas computacionais e seus algoritmos deram origem a softwares e programas, como o *LuxPplot*, resultado do modelo do Jenkins e Muneer (2003), o *Skyvision* citado por Marwaee e Carter (2006) e o *Holigilm* através da ferramenta *Roof_v3*, apresentado por Kocifaj (2009).

CAPÍTULO III

ENSAIOS

3 ENSAIOS

Neste capítulo são apresentados os ensaios realizados. Esses tiveram por objetivo verificar o modelo matemático proposto partindo do fluxo luminoso emitido por um duto de luz e da eficiência desse sistema não convencional, sob condições artificiais e reais de exposição por meio de modelos físicos em escala reduzida. Para tanto foram ensaiados sob condições artificiais (ensaios fotométricos em laboratório) 36 dutos em escala 1:10 com seção de entrada e comprimentos variados. Essas 36 configurações entre as seções (10cm, 20cm, 25cm, 30cm, 40cm e 50cm) e comprimentos (1m, 1,5m, 2m, 3m, 4m, e 5m) foram definidas para equivaler as dimensões dos dutos circulares mais comumente fabricados e comercializados. Sob condições de céu real, os mesmos 36 dutos foram acoplados a maquete física de mesma escala, tendo como referência o ambiente de uma sala de aula padrão FDE de dimensões 7,2 x 7,2 m com pé direito de 3m e plano de trabalho a 0,64m do piso. A ideia inicial seria realizar ensaios com dutos locados nas 9 posições da grelha recortada no teto da maquete, para várias configurações, mas devido as restrições de tempo, foram realizados ensaios com dutos apenas sobre o ponto P5, no centro da maquete.

3.1 ENSAIO COMO FERRAMENTA PREDITIVA

São muitas as ferramentas e métodos utilizados no estudo da luz natural, tais como os métodos gráficos, modelos matemáticos e ferramentas computacionais. No entanto, a realização de ensaios, para prever a iluminação de um ambiente, verificar modelos matemáticos teóricos e/ou analisar a eficiência de um determinado sistema, utilizando modelos físicos em escala reduzida ou a medição dos níveis de iluminância em protótipos e células testes é uma prática antiga e eficaz. O uso de modelos em escala reduzida representa uma ótima ferramenta para o estudo da luz natural, devido aos reduzidos comprimentos de onda desta, que permite observar e medir em escala com fidelidade. (ROBBINS, 1986).

O uso de modelos físicos em escala reduzida ou de modelos em escala real e os protótipos, auxiliam a verificar durante a fase de projeto ou teste de determinado sistema, seu desempenho, permitindo, segundo Moore (1991), tanto avaliações quantitativas quanto qualitativas.

CAPÍTULO III

3.2 ENSAIOS E AS CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO À LUZ

Os estudos de iluminação podem ser realizados por meio de ensaios com medições em céu real ou por meio de equipamentos que simulem uma ou mais condições de céu.

A luz, é responsável pela iluminação de ambientes externos e internos, através de fontes naturais (sol e céu) ou artificiais. No caso da iluminação natural o céu é considerado uma fonte de luz separada, embora tecnicamente toda a luz provenha do sol (SOUZA, 1997). Essas fontes são variáveis durante o dia, devido à trajetória solar própria de cada latitude e às características locais de nebulosidade e fenômenos meteorológicos no decorrer do ano, portanto temos diferentes condições de céu: encoberto, claro e parcialmente encoberto (HOPKINSON et al., 1975).

Ilustração 15. Condições de Céu

Alguns autores utilizam o índice de claridade de céu (K_t) para determinar a condição de céu. Li et al (2010) considera como céu encoberto o K_t variando de 0-0,24, céu parcialmente encoberto variando de 0,24-0,5 e céu claro $>0,5$.

A variação diária e horária da posição do sol na abóbada celeste representa um complicador, juntamente com as condições de céu, para ensaios sob condições reais de exposição. 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 com céu encoberto ou limpo (HOPKINSON, 1975 e ANDER, 1995).

Para simular a exposição as condições de céu existem equipamentos como o heliodon, que simula a geometria da insolação, por meio da luz solar direta e equipamentos como os “céus artificiais” que os mais simples simulam condição de céu encoberto (modelo caixa cúbica de espelhos, LUZ et al, 2008) e os mais

sofisticados simulam condições de céu claro e de céu encoberto, variando a intensidade luminosa, mesclando luz difusa com direta (modelo em domos, Bartenbach Lichtlabor, Disponível em: <http://www.bartenbach.com/en/lighting-design/the-artificial-sky.html>), acessado em 30/07/2014.

No entanto, estudos fotométricos em laboratório de sistemas condutores de luz natural para obtenção do fluxo luminoso emitido, segundo recomendação apresentada no relatório técnico “*Tubular Daylight Guidance Systems*” (CIE 173:2006) é necessária uma fonte artificial controlada, difusa e que apresente dimensões e distanciamento suficientes para garantir ângulos inferiores a 20° entre a entrada do duto e as extremidades da fonte luminosa. É ainda sugerida a utilização de lâmpadas fluorescentes cobertas por um plano difusor para obter essa fonte luminosa.

3.3 DIFUSÃO DA LUZ NATURAL A PARTIR DE DUTOS DE LUZ

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

Ilustração 16. Fluxograma -sistema não convencional para iluminação natural.

O elemento difusor pode ser de diversos materiais, no entanto, comercialmente o mais comum são os difusores opalinos, as lentes *fresnell* e os painéis prismáticos.

CAPÍTULO III

A grande dificuldade das pesquisas e estudos voltados para a difusão da luz natural a partir da saída de dutos de luz é como prever a distribuição dessa em seu percurso até o plano de trabalho. Muitos trabalhos identificam o desempenho e a eficiência do condutor, mas quantificar a luz que atinge o plano de trabalho exige considerar variáveis como as refletâncias internas e as múltiplas reflexões no ambiente, assim como o material difusor e a geometria da saída do condutor.

3.4 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS ENSAIADOS

Foram realizados dois tipos de ensaio, um em laboratório, **ensaio fotométrico**, e o outro sob condição de céu real, utilizando maquete de um ambiente de referência, que chamaremos de **ensaio com maquete sob céu real**. Ambos os ensaios foram realizados com dutos em escala 1:10, assim como as duas maquetes utilizadas também foram confeccionadas na mesma escala.

O ensaio fotométrico passou por duas etapas: ensaio piloto e o ensaio propriamente dito. Durante o ensaio piloto o procedimento de ensaio foi testado e aprimorado.

O ensaio com maquete sob céu real foi realizado nos dias 03/08/11 e 08/08/11, sendo que o segundo dia de ensaio teve maior qualidade dos dados coletados devido as condições de céu estarem mais estáveis nessa data.

3.4.1 ENSAIO FOTOMÉTRICO

O ensaio fotométrico foi realizado no Laboratório de Fotometria (LAFOT) do IEE - USP (Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo), dentro de uma câmara negra destinada a ensaios que a luz externa não deva interferir. Nesses ensaios foram utilizados 36 dutos de seção quadrada espelhados internamente em escala 1:10, sendo estes compostos pela combinação entre as seções de entrada 10cm, 20cm, 25cm, 30cm, 40cm e 50cm com os comprimentos 1m, 1,5m, 2m, 3m, 4m e 5m. A escala 1:10 facilitou o procedimento de ensaio e o manuseio dos mesmos durante todo o processo.

A organização geral dos ensaios fotométricos foi baseada no procedimento recomendado pelo Technical Report Tubular Daylight Guidance Systems (CIE 173:2006). No Capítulo 3 item 3.1 *Índice de desempenho para condutores passivos zenitais* do relatório técnico da CIE é sugerido um procedimento para obtenção do fluxo luminoso na saída de condutores tubulares passivos zenitais.

“Para um sistema condutor de luz tubular dotado de uma abertura de entrada de luz natural, com comprimento L do condutor, tendo um diâmetro D e uma abertura de saída da luz, as características padrão de transferência da luz são determinadas como a seguir: uma fonte de luz difusa é localizada perto da abertura de entrada do duto e a iluminância E é medida na abertura de entrada. O fluxo luminoso que chega à saída do condutor Φ é também medido.” (CIE 173:2006).

O duto estudado é um condutor de luz com seção quadrada, a utilização desse método é, portanto, uma adaptação do método para condutor tubular para aplicação no condutor de seção quadrada. Temos então dutos de seção quadrada conhecida com comprimento L dotado de entrada e saída de luz. A fonte difusa localizada perto da abertura de entrada é a caixa de lâmpadas do céu artificial, a iluminância E na abertura de entrada é medida com um luxímetro digital HOMIS, modelo 824. O fluxo luminoso na saída do duto foi calculado a partir de dados medidos com o auxílio de uma esfera integradora confeccionada especialmente para esse ensaio e tendo como referência uma lâmpada incandescente ($V=220,01$; $W=60,5$ e $i=0,275$) de fluxo luminoso conhecido (715,8 lumens), fornecida pelo LABFOT⁵.

A fonte consiste em um material difuso iluminado por lâmpadas tubulares fluorescentes, como as ilustradas na ilustração 17. Essa deve produzir uma uniformidade luminosa requerida a partir de uma janela condutora (dutada). Especificamente quando vista a partir de qualquer ponto da entrada do condutor para qualquer direção maior que um ângulo de 70° , relativo a direção axial do duto, a luminância observada deve estar dentro de $\pm 20\%$ do valor significativo (principal) (isto implica em um tamanho mínimo requerido para a uniformidade dessa fonte luminosa difusa). Neste caso, a iluminância na entrada do duto será muito uniforme então isto será suficiente para medir o valor E no centro da entrada do condutor usando um medidor de iluminância (luxímetro) calibrado (CIE 173:2006).

Todo o processo recomendado pela CIE está baseado na ilustração 17, sendo que demais explicações e detalhes são omitidos no texto da norma.

⁵ LAFOT – Laboratório de Fotometria do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo.

CAPÍTULO III

“O fluxo na saída Φ deve ser medido por uma esfera integradora suficientemente grande ou por um scanner fotômetro (goniômetro)” (CIE 173:2006).

Ilustração 17. Procedimento de ensaio – esquema, CIE 173:2006.

Desse modo, para a realização de ensaios fotométricos seguindo essas recomendações, são necessárias algumas definições e adaptações.

A adaptação do procedimento sugerido pelo *Technical Report* para a utilização com dutos de seção quadrada em escala reduzida partiu das dificuldades identificadas no texto da norma. A norma CIE 173:2006 relata as dificuldades e as necessidades de se fazer o estudo fotométrico dos condutores de luz natural. Para cada dificuldade foram encontradas soluções e alternativas que permitissem a adaptação necessária.

O primeiro problema identificado diz respeito aos equipamentos disponíveis e suas dimensões.

“Existem inúmeros problemas relativos à fotometria desses sistemas, notadamente que são necessários fotômetros especiais capacitados a aceitar componentes de grande dimensão e existe apenas um número limitado desses (Rosemann et al., 2005)” (CIE 173:2006).

A necessidade de equipamentos de medição com grandes dimensões para ensaiar dutos condutores foi solucionado por meio da utilização de dutos em escala 1:10.

O segundo problema encontrado está relacionado à fonte luminosa

“Um segundo problema é a especificação padronizada e adequada da fonte luminosa para ensaios de sistemas de iluminação natural, o próprio céu natural é insatisfatório para esse propósito. Essa deve ser ou uma esfera integradora, para criar uma luminância constante, ou um céu artificial com a distribuição de luminâncias do céu encoberto padrão CIE.” (CIE 173:2006).

A solução encontrada para essa segunda dificuldade foi à utilização da caixa de lâmpadas do céu artificial construído para fins didáticos (LUZ, 2008).

Ilustração 18. Foto da caixa de lâmpadas.

Essa caixa foi construída em MDF, suas dimensões são 82cm por 62cm e acomoda 8 lâmpadas fluorescentes tubulares (potência 16w, temperatura de cor 4000K a 4100K, índice de reprodução de cor $\geq 85\%$ e comprimento 0,6m). A placa de acrílico leitoso (difusor) tem 64cm por 62cm e foi fixada nas quatro extremidades por parafusos com dupla porca (Ilustração 20). Os reatores eletrônicos de partida instantânea (127V) ficam pelo lado de fora da caixa de MDF para evitar aquecimento que possa prejudicar o rendimento das lâmpadas no interior da caixa (ilustrações 18 e 19).

CAPÍTULO III

Ilustração 19. Esquema da caixa de lâmpadas.

Foram realizadas algumas adaptações na caixa de espelhos para eliminar problemas de uniformidade e fixação do espelho que fecha a caixa atrás das lâmpadas tubulares. Para solucionar os problemas de uniformidade foram colocados parafusos com duas porcas que permitem o movimento do acrílico leitoso (difusor) que fecha a caixa de lâmpadas na frente das tubulares fluorescente. Com esse mecanismo de ajuste foi possível afastar o acrílico das lâmpadas na medida necessária para ter um plano iluminado uniforme e homogêneo.

Ilustração 20. Detalhe do ajuste na caixa de lâmpadas.

Para medir o fluxo luminoso na saída do duto foi confeccionada uma esfera integradora (ilustração 21). Para tanto foi utilizado uma esfera de alumínio de 30cm

de diâmetro, normalmente vendida para fabricação de velas decorativas. Esta esfera que abre em duas metades foi cortada a laser para posicionamento do sensor e da abertura de entrada do duto. A esfera foi pintada com tinta especial para esfera integradora fornecida pelo IEE e a pintura foi realizada por técnicos especializados no reparo das demais esferas existentes no IEE.

Ilustração 21. Corte a laser na esfera para encaixe do duto e do sensor.

O duto foi encaixado na esfera por um elemento de transição feito em madeira compensada (ilustração 22). Este elemento permite que seja variada a seção do condutor sem alterar a abertura da esfera.

Ilustração 22. Suporte de transição para encaixe dos dutos na esfera.

Para a coleta dos dados de iluminância foi utilizado o sensor LMT modelo 30mm com número de série 09A05312 calibrado no dia 19/10/2011 pelo laboratório de Radiometria e Fotometria (Laraf) (ilustração 23) (ver certificado de calibração no Anexo A). Esse sensor, foi ajustado para coleta dos dados pelo técnico do IEE.

CAPÍTULO III

Ilustração 23. Sensor utilizado na coleta dos dados de iluminância.

A montagem do ensaio solicitou suportes para fixar e nivelar as partes integrantes (ilustração 24). Para fixar os dutos e o sensor foram utilizados suportes tripé com ajuste de altura e direção. Para posicionar a esfera foi utilizado um suporte tripé convencionalmente empregado na jardinagem para segurar vasos.

Ilustração 24. Suporte dos dutos, sensor e esfera integradora.

Para evitar vazamento de luminosidade que poderia interferir nos resultados do ensaio, foi utilizado um pano preto fosco para cobrir o sensor e a entrada da esfera sobre o elemento de transição entre duto e esfera.

Para garantir a distância recomendada pela CIE 173:2006 da fonte na entrada do duto, esses foram posicionados a 9cm do plano iluminado, estando a um ângulo inferior a 20° das extremidades da caixa de lâmpada. A distância máxima recomendada para a caixa de lâmpadas utilizada é de 11cm. Após ajustar a altura do duto e a distância deste ao plano iluminado deve ser conferido o nivelamento do mesmo (Ilustração 25).

Ilustração 25. Verificação do nivelamento.

O cálculo do fluxo luminoso emitido pelos dutos foi realizado por meio da comparação com o fluxo emitido e conhecido de uma lâmpada de referência. Esta lâmpada foi acoplada a um dos suportes para transição de encaixe do duto a esfera. Neste suporte foi fixado um papel cartão branco para impedir que o fluxo luminoso direto atingisse o sensor dentro da esfera.

Ilustração 26. Lâmpada de referência com anteparo de papel cartão acoplados ao suporte de transição para encaixe na esfera.

Ao fim do procedimento de ensaio apresentado, foram levantadas algumas considerações importantes para reproduzi-lo, desse modo, devem ser observadas:

1. **A necessidade de esperar o sistema estabilizar:** durante o ensaio foi esperado 30min para estabilidade da rede e das lâmpadas fluorescentes da caixa de lâmpadas, e após cada troca de duto foi esperado a estabilização do conjunto, 1 min, para tomar nota dos dados medidos.
2. **O tempo de montagem do sistema a ser ensaiado:** o ensaio leva em média 1 hora para ser montado e 2 horas para medição de 36 dutos seguindo o procedimento descrito acima.
3. **A equipe necessária para realização do ensaio:** é recomendado o número mínimo de duas pessoas para a realização do ensaio acima descrito.

CAPÍTULO III

4. **A fonte luminosa adequada:** obter ou construir uma fonte luminosa difusora e homogênea.
5. **O equipamento de medição:** obter ou construir uma esfera integradora adequada aos condutores a serem ensaiados e obter sensores calibrados para aquisição dos dados durante o ensaio.
6. **O posicionamento dos componentes do sistema a ser ensaiado:** posicionar criteriosamente todas as partes componentes do arranjo a serem ensaiados, assegurando as distâncias recomendadas da entrada do condutor à fonte luminosa e garantir por meio de suportes adequados o posicionamento dos condutores e do sensor.
7. **A vedação das partes componentes do sistema:** garantir que não ocorra interferência de luminosidades exteriores durante o ensaio.

3.4.2 ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL

Para o ensaio com maquete sob céu real o primeiro passo foi escolher qual seria o ambiente de referência. O ambiente escolhido foi uma sala de aula padrão FDE devido ser este um ambiente simples e fácil de reproduzir em maquete, com refletância das superfícies internas conhecidas, além de ser um ambiente em potencial para aplicação de sistemas passivos de iluminação natural. Os dutos de luz nesse sentido podem contribuir para uma iluminação de qualidade, com níveis adequados a tarefa a ser realizada e ainda minimizar o consumo energético desse tipo de edificação.

Ilustração 27. Ambiente de referência – sala de aula padrão FDE.

Foram construídas duas maquetes idênticas para permitir ensaios simultâneos comparativos.

A construção do modelo foi realizada na escala 1:10 para ser compatível com os dutos já utilizados no mestrado *condução da luz natural por meio de sistemas não convencionais* (LUZ, 2009) com os sensores disponíveis para o ensaio, luxímetros HOMIS modelo 824, fornecido pelo LABAUT (Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo).

Ilustração 28. Posicionamento dos sensores (luxímetros HOMIS modelo 824).

Os sensores foram localizados nos terços médios em grelha de nove pontos. Portanto, abaixo de cada abertura zenital encontra-se um sensor. Na maquete de referência foi colocado apenas um sensor no ponto P5.

Para medir a iluminância externa no plano horizontal desobstruído foi utilizado um sensor (luxímetro) no centro do anel do piranômetro para proteção da radiação direta do sol. Foi desprezada a porção de céu que é mascarada pelo anel, não foi adotada nenhuma correção para essa obstrução.

Ilustração 29. Anel do piranômetro com posicionamento do sensor externo.

As maquetes foram localizadas lado a lado, com a janela lateral da sala completamente vedada e orientada para o norte verdadeiro a fim de organizar o posicionamento dos sensores internamente.

CAPÍTULO III

O ensaio se deu com apenas um duto por vez no ponto central da sala em uma das maquetes, a outra recebeu apenas a abertura zenital com o difusor na entrada para efeito de comparação entre uma zenital comum⁶ e o duto em questão. A zenital comum e o duto foram colocados na abertura que fica acima do ponto P5.

Ilustração 30. Janelas laterais vedadas e zenital comum na posição acima do ponto P5.

3.5 CONFEÇÃO DOS MODELOS (MAQUETES E DUTOS)

3.5.1 DUTOS DE LUZ.

Para o levantamento empírico foram aproveitados os 9 dutos em escala reduzida (1:10) construídos e ensaiados em Luz, 2009, os quais apresentaram excelentes resultados com alta correlação com os dutos em escala real, e construídos mais 27 dutos na escala 1:10 com outras seções e comprimento.

Os espelhos novamente foram doados, já cortados, pela CEBRACE⁷, são espelhos de alta qualidade *optimirror plus* com 4mm de espessura. A confecção dos dutos foi demorada devido ao processo de colagem das peças com silicone que leva 12 horas para secar. Para essa montagem é necessário juntar duas partes formando um “L” e no dia seguinte juntar os “L” para formar um duto. Com o duto seco é necessário encapá-lo com fita isolante para evitar a entrada de luz no interior do duto pelas arestas e não provocar ferimentos ao serem manuseados. Esse processo levou 2 meses.

Desse modo temos 36 dutos de luz escalados, espelhados internamente com seção quadrada de lado 1cm, 2cm, 2cm, 3cm, 4cm e 5cm, e os comprimentos

⁶ Entende-se por zenital comum o buraco com acrílico leitoso acoplado.

⁷ Empresa fabricante de vidros.

variam de 10cm, 15cm, 20cm, 30cm, 40cm e 50cm, que representam os dutos em tamanho real.

36 dutos em vista frontal

36 dutos em vista superior (*topo*)

Ilustração 31. Os 36 dutos construídos.

Os dutos são acoplados em suportes de transição tanto para uso nos ensaios fotométricos como para uso nos ensaios com maquete sob céu real (maquete da sala de aula padrão FDE). Esses encaixes foram confeccionados juntamente com a maquete por um marceneiro especializado em maquetes.

encaixe com difusor apenas

encaixe com difusor e duto –
vista superior (*topo*)

encaixe com difusor e
duto – vista frontal

Ilustração 32. Encaixe de transição.

Na saída do duto foi colocado um acrílico leitoso (próximo ao difusor perfeito) para distribuir a luz no ambiente interno em todas as direções. Na entrada do duto não foi colocado nenhum tipo de coletor especial ou protetor da radiação direta do sol.

CAPÍTULO III

3.5.2 MAQUETES.

As maquetes do ambiente de referência foram confeccionadas por um marceneiro especializado em maquetes. O projeto foi desenvolvido para proporcionar a montagem e desmontagem das peças.

Ilustração 33. Projeto das maquetes com as várias possibilidades de abertura na cobertura.

A maquete foi construída em madeira compensada de modo que esta possa ser desmontada, visando facilitar o transporte e armazenamento desta. O peso da madeira compensada impede que a maquete seja carregada pelo vento nos

ensaios sob condição de céu real. As peças foram unidas por parafuso permitindo sua montagem e desmontagem quando necessário.

Ilustração 34. Foto das maquetes – sala de aula padrão FDE.

No plano que fecha a maquete (cobertura do modelo) foram recortados quadrados de 12cm de lado para encaixe dos elementos de transição com os dutos. O centro de cada uma dessas aberturas coincide com o terço médio da área de piso. No fundo da sala foi aberto um furo suficiente para registros fotográficos e no piso foram abertos dois furos para passar os fios e cabos dos sensores. Foram confeccionadas tampas para todas as aberturas de modo que haja vedação completa do ambiente interno quando necessária.

Ilustração 35. Maquetes – acabamento interno.

A sala de aula padrão FDE tem 7,2m x 7,2m com pé direito de 3m. As paredes e o forro foram pintados de branco e o piso utilizado é o tipo Paviflex comumente empregado nas salas de aula das escolas da FDE. A lousa também foi representada na maquete com refletância similar a situação real.

CAPÍTULO III

3.6 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos da ilustração 36 foram utilizados nos ensaios para registros fotométricos e fotográficos.

Luxímetro Homis

Sensor que mede a Iluminância (lux)

Fotocélula LMT modelo 30mm com número de série 09A05312

Sensor que mede a iluminância (lux), para registros do ensaio fotométrico.

Esfera Integradora

Construída especialmente para o ensaio fotométrico com janela para acoplar os dutos de luz.

Câmera Fotográfica Nikon 4500

Para registros do ensaio

Anel de sombra para piranômetro CM/121. Kipp & Zonen. Delf Holland

Para proteger o sensor externo da radiação direta do sol.

Lâmpada de referência com fluxo luminoso conhecido

Para cálculo do fluxo luminoso emitido pelos dutos.

Ilustração 36. Foto dos Equipamentos.

3.6.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

O equipamento utilizado para a aquisição dos dados durante o ensaio foi o luxímetro HOMIS. Com esse tipo de equipamento a aquisição é manual, o pesquisador anota instantaneamente os valores medidos. Para ensaios sob condições reais a coleta deve ser simultânea em todos os pontos e/ou utilizar um sensor para referência, coletando os valores simultâneos de iluminância externa para cada ponto medido. Desse modo evitam-se erros devido às variações da abóbada celeste. Por ser um equipamento mais simples, porém preciso, esse tipo de aquisição é indicada quando a fonte é artificial, não havendo variações de intensidade luminosa. Ideal para estudos acadêmico de rápida avaliação e visualização dos resultados.

3.6.2 TEMPO DE COLETA DOS DADOS

Na aquisição por meio de luxímetro, o tempo de exposição a fonte é instantâneo. O pesquisador deve estar atento em observar se a fonte de luz está estável, quando esta for artificial. No caso de coleta em condições de exposição a fontes naturais de luz utilizando luxímetro é necessário o sincronismo da coleta nos pontos necessários.

3.6.3 CONDIÇÃO DE EXPOSIÇÃO

Artificiais – Caixa de Lâmpadas do Céu Artificial.

Os ensaios fotométricos, sob condições artificiais de exposição, foram realizados utilizando a caixa de lâmpadas do céu artificial para simular condições de céu encoberto. Para garantir a distância recomendada pela CIE 173:2006 da fonte na entrada do duto, esses foram posicionados a 9cm do plano iluminado, estando a um ângulo inferior a 20° das extremidades da caixa de lâmpada. A distância máxima recomendada para a caixa de lâmpadas utilizada é de 11cm entre o plano iluminado e a seção de entrada do duto de luz. Após ajustar a altura do duto e a distância deste ao plano iluminado deve ser conferido o nivelamento do mesmo.

CAPÍTULO III

Ilustração 37. Distância máxima entre a entrada e a fonte luminosa (caixa de lâmpadas).

Céu Real

Os ensaios com maquete sob céu real foram realizados na FAUUSP no início do mês de agosto (03/08/2011 e 08/03/2011). Esses ensaios haviam sido programados para o mês de julho por ser um mês que costuma apresentar dias claros e estáveis na cidade de São Paulo, no entanto, a construção dos dutos e da maquete excedeu os prazos inicialmente fixados.

Foram realizados dois dias de coleta dos dados devido às condições de céu que no primeiro dia variou muito chegando a chover fraco no final do ensaio. O segundo houve períodos de estabilidade que permitiram a conclusão do ensaio.

3.7 MEDIÇÕES

A coleta dos dados foi realizada em duas etapas, as quais foram divididas em dois grupos:

- Etapa 1: ensaio piloto;
- Etapa 2: ensaio;
- Grupo 1: ensaio fotométrico realizado em laboratório;
- Grupo 2: ensaio com maquete sob céu real realizado sob condição de céu real;

Os ensaios do grupo 1 visam obter o fluxo luminoso emitido por condutores (duto de luz com seção quadrada espelhados internamente) sem elemento captador e dotado de difusor na saída. Já os ensaios do grupo 2 tem por intuito observar a distribuição da luz natural a partir de dutos de luz (sem elemento

captador e dotado de difusor na saída), bem como a eficiência desses considerando um ambiente de referência (sala de aula padrão FDE) sob condições reais de exposição com maquetes em escala reduzida (1:10) e identificar o Coeficiente de Distribuição (CD) e verificar os dados calculados pelo modelo preditivo proposto.

3.7.1 ENSAIO FOTOMÉTRICO

O ensaio piloto teve por objetivo testar o procedimento de ensaio definido e verificar a calibração dos equipamentos. Partindo desse primeiro teste, ajustes foram realizados aprimorando o procedimento.

Os ensaios foram realizados na câmara escura do LAFOT e para isso dependia da disponibilidade do espaço e dos técnicos do IEE.

Esse primeiro teste contou com vários contratempos devidos à inexperiência nesse tipo de arranjo. Levou a manhã toda para ser montado e no período da tarde foi possível realizar apenas a medição da lâmpada de referência e de dois comprimentos de dutos 1m e 1,5m.

No segundo dia de ensaio piloto verificou-se a necessidade de proteger da entrada de luz externa as conexões entre esfera e sensor e o elemento de transição com o duto e a esfera. Esse problema foi solucionado pela utilização de um pano preto fosco cobrindo os encaixes do sistema montado.

Ilustração 38. Pano preto fosco para evitar entrada de luminosidade exterior na esfera.

O segundo problema identificado neste teste foi com relação a distância da entrada do duto à fonte luminosa. A CIE 173:2006 recomenda que a distância máxima seja de 11cm para garantir o ângulo de afastamento das extremidades do plano iluminado de no máximo 20°. Desse modo a entrada do duto foi posicionada

CAPÍTULO III

quase encostada no plano iluminado, desejando garantir o máximo de uniformidade possível. Porém o ensaio iniciou com o duto de maior comprimento e quando foi chegada a vez dos dutos de menor comprimento não foi possível manter essa mesma distância devido aos suportes necessários para segurar o sensor e o próprio duto, visto que esses ocupam um espaço maior que o comprimento dos dutos de 1m em escala 1:10, ou seja, 10cm de distância. Com isso, esse segundo dia de ensaio teve de ser abortado.

Ilustração 39. Distância insuficiente para ensaiar com os dutos pequenos.

Nesse momento com as dificuldades encontradas no ensaio piloto já superadas foi possível realizar as medições dos 36 dutos com a precisão e acurácia necessárias. Os dados foram coletados seguindo o procedimento de ensaio adaptado da norma CIE 173:2006 detalhadamente descrito no item 3.4.1.

A entrada do duto foi posicionada a 9cm da fonte luminosa, estando dentro do recomendado pela CIE 173:2006. O ensaio começou pelos dutos de menor comprimento (1m) evitando problema para posicionamento dos equipamentos entre a esfera e a fonte luminosa.

3.7.2 ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL

O ensaio contou com dois dias de ensaio (03/08/2011 e 08/03/2011) devido às condições de céu que no primeiro dia variou muito chegando a chover fraco no final do ensaio. O segundo dia foi um pouco melhor, havendo períodos de estabilidade que permitiram a conclusão do ensaio piloto. A condição de céu ideal para a realização dos ensaios sob condição de céu real seria de céu encoberto,

Bruna Luz

FAUUSP – 2014

pois permitiria o cálculo do EDL sem as interferências provocadas pela radiação direta do sol.

A montagem da maquete e ajuste de toda a infraestrutura necessária foi conturbada no primeiro dia de ensaio, mas no segundo dia a logística foi aprimorada estando resolvida esta questão para os ensaios futuros.

O local para o ensaio foi o mesmo utilizado nos ensaios realizados em Luz, 2009, no entanto, a posição exata necessitou ser alterada em alguns metros, pois foram instalados 3 mastros de bandeira no local. O local mais apropriado para evitar sombra do entorno e assegurar o nivelamento das maquetes foi definido no segundo dia de ensaio.

Os dutos foram localizados na abertura zenital sobre o ponto P5 e o modelo de referência recebeu a zenital apenas na abertura localizada acima do ponto P5. No entanto, nesse modelo o ponto central (P5) foi denominado de ponto de referência para facilitar a compreensão e análise dos dados tabelados.

Posição da abertura zenital na maquete de referência Posição do duto na maquete

Ilustração 40. Localização das aberturas nas maquetes no ensaio piloto.

Os dados coletados nos dois dias de ensaio foram tabelados e a partir desses foi calculado o Fator de Luz Diurna (FLD) o qual também foi tabelado e ambos estão apresentados no APÊNDICE A.

CAPÍTULO III

3.8 TRATAMENTO DOS DADOS**3.8.1 ENSAIO FOTOMÉTRICO**

No ensaio fotométrico é medida a iluminância com o auxílio da esfera integradora. Esses dados são utilizados para o cálculo do fluxo luminoso emitido pelos dutos. Esse cálculo se dá a partir do fluxo luminoso conhecido e da iluminância medida da lâmpada de referência por meio de regra de três.

O fluxo luminoso foi ainda calculado com base na eficiência do duto fornecida pelo modelo matemático MPELD⁸ (LUZ, 2009). Neste caso foi adotada uma simplificação, transformando a iluminância [lx] prevista no ponto central da seção de saída do duto em fluxo luminoso [lm] pela equação a seguir:

$$\phi_{duto} = (EDL/100) \cdot E_{ext} \cdot b^2$$

Equação 148

Onde:

EDL é a porcentagem de iluminância no ponto central da seção de saída do duto (%);

b^2 é a área da seção de saída do duto (m^2);

E_{ext} é a iluminância externa (lux);

Os dados calculados do fluxo luminoso foram tabelados.

3.8.2 ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL

Com os dados obtidos nos ensaios foram calculados o Fator de Luz Diurna (FLD), a Iluminância Média (E_{med}) e o Coeficiente de Distribuição (CD). Foram ainda tabelados os dados de iluminância de modo a facilitar a visualização da distribuição ocorrida durante o ensaio.

O FLD é a razão entre a iluminação natural num determinado ponto num plano horizontal interno devido à luz recebida direta ou indiretamente da abóbada celeste com uma distribuição de luminâncias conhecida, e a iluminação num plano horizontal externo produzida pela abóbada celeste totalmente desobstruída, expressa como uma porcentagem (ABNT 15215, 2005, parte 1).

⁸ Modelo Preditivo da Eficiência Luminosa em Dutos (MPELD)

$$FLD = \frac{E_p}{E_{ext}} \times 100$$

Equação 149

Onde:

E_p é a iluminância no plano de trabalho (lux);

E_{ext} é a iluminância no plano horizontal desobstruído (lux);

A E_{med} foi obtida pela média aritmética dos 9 pontos coletados durante os ensaios.

O CD é o coeficiente empírico extraído a partir da análise dos dados coletados no ensaio para substituir o Coeficiente de Utilização (CU) no modelo proposto, adequando o modelo a realidade. Para o cálculo do CD foi utilizada a equação a seguir:

$$CD = \frac{E \cdot A}{n \cdot \phi_{duto} \cdot FD}$$

Equação 150

Onde:

E é a iluminância média no plano de trabalho (lux);

A é área do plano de trabalho, ou do ambiente iluminado (m^2);

n é o número de dutos ensaiado;

ϕ_{duto} é fluxo luminoso emitido pelo duto (lumens);

FD é fator de depreciação;

Com os resultados do CD calculados foi identificado qual valor melhor se ajusta para substituir o Coeficiente de Utilização no modelo proposto.

CAPÍTULO III

3.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.9.1 GRUPO 1 – ENSAIO FOTOMÉTRICO REALIZADO EM LABORATÓRIO

- Ensaio Piloto 01 (08/11/2011)

A lâmpada de referência utilizada no ensaio fotométrico foi uma lâmpada incandescente comum, cujo fluxo luminoso é conhecido. Para o ensaio essa lâmpada foi acoplada ao suporte de transição com a esfera integradora, e neste suporte foi colado um papel cartão branco para fazer o mascaramento da luz direta da lâmpada sobre o sensor dentro da esfera integradora.

Tabela 6. Dados da lâmpada de referência do primeiro ensaio fotométrico piloto.

Lâmpada de referência: V=220,01 W=60,5 I=0,275	Iluminância medida: 25.470lx
	Fluxo luminoso conhecido: 715,8 lm

A tabela 6 apresenta o valor medido dentro da esfera integradora com a lâmpada de referência, do qual se observa que o valor de iluminância medido e o fluxo luminoso conhecido são altos, da ordem de 25.470 lux e 715,8 lumens. Já com os dutos em escala 1:10 os valores obtidos e apresentados na tabela 7 são relativamente baixos, isto ocorre, devido à baixa iluminância disponível na entrada do duto fornecida pela fonte luminosa (caixa de lâmpadas).

Tabela 7. Dados medidos e calculados no primeiro ensaio fotométrico piloto.

	Iluminância medida (lux)		Fluxo Luminoso calculado (Lumens)	
Seção quadrada (cm)	Comprimento (m)			
	1	1,5	1	1,5
50	265	233	7,45	6,55
40	170	136	4,78	3,82
30	87	65	2,45	1,83
25	61	30	1,71	0,84
20	48	15	1,35	0,42
10	33	12	0,93	0,34

- Ensaio Piloto 02 (14/12/2011)

Para esse segundo ensaio fotométrico não foi medida a iluminância da lâmpada de referência, visto que isso seria realizado após a medição do último duto

e devido ao abortamento do ensaio essa medida não foi realizada. Desse modo para o cálculo dos fluxos luminosos aqui apresentado foi utilizado o dado da lâmpada de referência coletado no primeiro dia de ensaio fotométrico piloto.

Tabela 8. Dados medidos e calculados no segundo ensaio fotométrico piloto.

Seção quadrada (cm)	Iluminância medida (lux)						Fluxo Luminoso calculado (Lumens)					
	Comprimento (m)						Comprimento (m)					
	5	4	3	2	1,5	1	5	4	3	2	1,5	1
50	92	135	155	189	237	-	2,59	3,79	4,36	5,31	6,66	-
40	44	64	67	96	125	-	1,24	1,80	1,88	2,70	3,51	-
30	15	23	33	34	55	-	0,42	0,65	0,93	0,96	1,55	-
25	8	12	18	21	33	-	0,22	0,34	0,51	0,59	0,93	-
20	4	7	11	11	19	-	0,11	0,20	0,31	0,31	0,53	-
10	0,5	5	6	2	9	-	0,01	0,14	0,17	0,06	0,25	-

As tabelas 7 e 8 apresentam os valores medidos de iluminância em lux e calculados do fluxo luminoso em lumens. Comparando o fluxo luminoso obtido a partir dos dutos ensaiados com o fluxo da lâmpada de referência observa-se que os valores obtidos com os dutos de luz são muito inferiores ao fluxo emitido pela lâmpada. Isso ocorre devido à disponibilidade de luz na entrada do duto da ordem de 7.700lux.

- **ENSAIO**

Os dados obtidos no ensaio do dia 20/12/2011, com as dificuldades do ensaio piloto já superadas, estão apresentados nas tabelas 9, 10 e 11.

Note que o fluxo luminoso medido com a lâmpada de referência diminuiu, esse fato ocorreu devido ao maior tempo necessário à estabilização do fluxo luminoso emitido pela lâmpada (10min).

Tabela 9. Dados iniciais do ensaio fotométrico.

Ensaio 20/12/2011	
distância da fonte:	9cm
lâmpada de referência:	iluminância=21900lx
	v=220,01
	w=60,5
	i=0,275
	fluxo luminoso=715,8lm
Iluminância na entrada do duto:	7700lx

CAPÍTULO III

A tabela 9 apresenta os valores medidos dentro da esfera integradora com a lâmpada de referência, a partir dos quais observa-se:

- Que o valor de iluminância medido com a lâmpada de referência é alto, da ordem de 21.900lux, isso ocorre porque a lâmpada de referência é uma lâmpada comum, que tem um tamanho real muito grande se comparado ao tamanho da esfera.
- Os dutos foram escalados, mas a lâmpada utilizada como referência para o cálculo do fluxo luminoso, não foi também escalada.

As tabelas 10 e 11 apresentam os valores medidos (iluminância) dentro da esfera integradora e os valores calculados (fluxo luminoso) pela correspondência aos valores medidos com a lâmpada de referência:

Tabela 10. Dados medidos no ensaio fotométrico.

seção quadrada (cm)	Iluminância (lux) medida dentro da esfera integradora					
	comprimento (m)					
	1	1.5	2	3	4	5
10	1.59	1.15	0.67	0.36	0.69	0.24
20	16.50	11.10	9.37	6.17	3.82	2.90
25	32.60	26.40	19.65	13.10	8.95	6.83
30	58.50	49.50	36.80	26.50	18.60	14.32
40	147.50	120.40	101.20	68.10	51.20	48.40
50	250.50	219.50	194.80	145.60	114.30	89.00

Tabela 11. Dados calculados a partir dos dados medidos no ensaio fotométrico.

seção quadrada (cm)	Fluxo Luminoso (Lumens) calculado por regra de três com valores da lâmpada de referência					
	comprimento (m)					
	1	1.5	2	3	4	5
10	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01
20	0.46	0.31	0.26	0.17	0.11	0.08
25	0.92	0.74	0.55	0.37	0.25	0.19
30	1.64	1.39	1.03	0.74	0.52	0.40
40	4.15	3.38	2.84	1.91	1.44	1.36
50	7.04	6.17	5.47	4.09	3.21	2.50

Comparando o fluxo luminoso obtido a partir dos dutos ensaiados com o fluxo luminoso da lâmpada de referência observa-se:

- Que os valores obtidos com os dutos de luz, assim como os obtidos no ensaio piloto, são muito inferiores ao fluxo emitido pela lâmpada, isso ocorre devido ao tamanho real dos dutos em escala, ou seja, do tamanho real do duto que foi medido e da fonte luminosa na entrada do duto que fornece uma quantidade muito menor de lux.

No entanto, se fizermos uma simplificação e assumirmos que o fluxo luminoso emitido pelo duto pode ser calculado a partir da iluminância medida no ponto central da seção de saída do duto em ensaio sob condições de céu real, sob fonte artificial (caixa de lâmpadas) ou da prevista pelo modelo MPELD, multiplicando essa iluminância pela área da seção de saída do duto, obtemos assim o fluxo luminoso do duto calculado como apresentado nas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12. Fluxo luminoso calculado a partir dos dados medidos no ensaio fotométrico.

$E_{ext}=7700$ (lux)	Fluxo Luminoso (Lumens) calculado pelo MPELD $\phi_{duto}=(EDL/100).E_{ext}.b^2$					
seção quadrada (m)	comprimento (m)					
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5
0.01	0.21	0.14	0.09	0.05	0.03	0.02
0.02	1.42	1.05	0.83	0.55	0.37	0.28
0.025	2.50	1.97	1.59	1.06	0.77	0.58
0.03	3.95	3.19	2.63	1.87	1.39	1.04
0.04	7.88	6.65	5.67	4.19	3.33	2.71
0.05	13.28	11.55	10.01	7.89	6.35	5.20

Note que com essa simplificação os fluxos luminosos calculados passam a se aproximar do fluxo da lâmpada de referência para alguns dutos, conforme valores realçados nas tabelas 13 e 14. Comparando os resultados das tabelas 13 e 14 com os resultados da tabela 12 fica claro que a baixa disponibilidade de luz fornecida pela caixa de lâmpadas impactou os resultados. Note ainda que o EDL (ver tabela 15) não altera com a escala, ou seja, se aumentar a disponibilidade de luz no plano da entrada do duto o fluxo obtido aumentará em função da eficiência do duto de luz (EDL).

CAPÍTULO III

Tabela 13. Fluxo luminoso calculado a partir dos dados medidos no ensaio sob condições de céu real.

Φ_{duto}						
$E_{ext} = \text{variavel (real)}$	seção quadrada (lados em m)					
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	19	98	842	1729	3635	5434
1.5	12	69	769	1441	3050	447
2	7	57	590	1173	2583	2522
3	5	37	371	731	1909	1948
4	3	25	260	553	1568	2516
5	3	19	184	413	1169	2174

O MPELD fornece a eficiência do duto de luz em porcentagem, ou seja, a porcentagem da iluminância externa do plano horizontal da entrada do duto que atinge o ponto central do plano da saída do duto. Para o cálculo do fluxo luminoso considerando a iluminância externa obtida no ensaio sob condição de céu real, foi utilizada a iluminância medida no plano horizontal externo para calcular a iluminância que atingia o ponto central do plano de saída do duto. E assim, com esse resultado foi calculado o fluxo luminoso apresentado na tabela 13.

Para o fluxo luminoso calculado e apresentado na tabela 14 a iluminância externa considerada no cálculo (20000lx) foi adotada com base na frequência de ocorrência para a cidade de São Paulo, baseada em dados fornecidos pelo software climaticus, disponível para download gratuito no site da FAUUSP.

Tabela 14. Fluxo luminoso calculado a partir dos dados previstos com o MPELD.

Φ_{duto}						
$E_{ext} = 20000 \text{ lx}$	seção quadrada (lados em m)					
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	54	368	650	1026	2048	3450
1.5	36	272	512.5	828	1728	3000
2	24	216	412.5	684	1472	2600
3	14	144	275	486	1088	2050
4	8	96	200	360	864	1650
5	6	72	150	270	704	1350

Pelos valores calculados e apresentados nas tabelas 13 e 14 se verifica o potencial dos dutos de luz para serem aplicados como sistemas complementares ou em substituição a sistemas artificiais de iluminação.

Tabela 15. Eficiência do duto de luz (EDL).

seção quadrada (m)	EDL (%)					
	comprimento (m)					
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5
0.01	27	18	12	7	4	3
0.02	46	34	27	18	12	9
0.025	52	41	33	22	16	12
0.03	57	46	38	27	20	15
0.04	64	54	46	34	27	22
0.05	69	60	52	41	33	27

3.9.2 GRUPO 2 – ENSAIO COM MAQUETE SOB CÉU REAL

Com os dados obtidos nesse ensaio foi analisada a distribuição da iluminância obtida no plano de trabalho, emitida por um único duto sobre o ponto P5 (centro da sala), para os 9 pontos nos quais os dados foram coletados os dados. Nas ilustrações de 41 a 52 está representada a sala com os 9 pontos medidos. Cada célula representa um ponto (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9) e o valor obtido na medição está marcado no centro da célula. Os dados do ensaio realizado no dia 03/08/2011 sofrem distorções em função da variação da condição de céu durante o período da coleta, além dos os sensores dos pontos P3 e P9 que estavam danificados, apresentando dados visivelmente discrepantes dos demais pontos.

Com as iluminâncias medidas em cada ponto foram calculadas as iluminâncias médias (E_{med}) para cada duto ensaiado. Não sendo essa representativa, visto que a sala é demasiadamente grande para ser iluminada por apenas um duto, levando a altos níveis de iluminância no ponto P5, imediatamente abaixo do duto, em comparação com os 8 demais pontos, estando estes últimos muito distante da fonte luminosa.

Nos dutos de seção quadrada, com lado 0,1m, (ilustração 41) a iluminância média fica bem próxima a iluminância coletada no ponto P5, isso ocorre devido esse duto ter mais interreflexões que os demais, visto que a abertura de aquisição do raio luminoso é menor. Com o excesso de interreflexões o montante de luz emitido por esses dutos é muito baixo e a luz que chega ao ponto de coleta sofre maior influência das reflexões internas que da luz direta da fonte.

CAPÍTULO III

0,1x0,1x1 (m)		
10	7	1
10	10	6
15	10	19
$E_{med} = 9.78$		
0,1x0,1x3 (m)		
7	9	1
8	8	5
15	11	14
$E_{med} = 8.67$		
0,1x0,1x1,5 (m)		
9	7	0
9	8	4
14	11	19
$E_{med} = 9.00$		
0,1x0,1x4 (m)		
7	6	0
8	7	5
14	11	19
$E_{med} = 8.56$		
0,1x0,1x2 (m)		
7	5	0
8	7	4
12	9	17
$E_{med} = 7.67$		
0,1x0,1x5 (m)		
5	6	0
5	5	4
11	8	10
$E_{med} = 6.00$		

Ilustração 41. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,1m (ensaio 03/08/11).

0,2x0,2x1 (m)		
9	9	1
8	9	6
11	9	189
$E_{med} = 27.89$		
0,2x0,2x1,5 (m)		
20	13	1
14	27	9
11	10	185
$E_{med} = 32.22$		
0,2x0,2x2 (m)		
10	10	10
9	18	9
10	10	183
$E_{med} = 29.89$		
0,2x0,2x3 (m)		
8	7	0
8	11	5
7	6	179
$E_{med} = 25.67$		
0,2x0,2x4 (m)		
15	8	1
9	9	4
8	6	180
$E_{med} = 26.67$		
0,2x0,2x5 (m)		
14	8	0
11	9	5
9	6	179
$E_{med} = 26.78$		

Ilustração 42. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,2m (ensaio 03/08/11).

0,25x0,25x1 (m)		
19	18	1
18	34	13
19	17	180
$E_{med} = 35.44$		
0,25x0,25x1,5 (m)		
19	15	1
17	30	9
16	14	180
$E_{med} = 33.44$		
0,25x0,25x2 (m)		
16	15	1
14	24	12
15	13	181
$E_{med} = 32.33$		
0,25x0,25x3 (m)		
14	11	1
12	18	10
12	10	182
$E_{med} = 30.00$		
0,25x0,25x4 (m)		
14	13	1
11	14	7
11	9	182
$E_{med} = 29.11$		
0,25x0,25x5 (m)		
11	9	1
9	11	6
11	8	181
$E_{med} = 27.44$		

Ilustração 43. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,25m (ensaio 03/08/11).

CAPÍTULO III

0,3x0,3x1 (m)			0,3x0,3x1,5 (m)			0,3x0,3x2 (m)		
21	22	2	20	23	2	17	17	1
23	59	18	21	52	17	16	38	12
20	23	182	18	20	181	15	16	181
$E_{med} = 41.11$			$E_{med} = 39.33$			$E_{med} = 34.78$		
0,3x0,3x3 (m)			0,3x0,3x4 (m)			0,3x0,3x5 (m)		
12	13	1	11	13	1	11	13	1
11	25	10	10	20	8	9	18	7
11	12	181	10	10	182	10	9	182
$E_{med} = 30.67$			$E_{med} = 29.44$			$E_{med} = 28.89$		

Ilustração 44. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,3m (ensaio 03/08/11).

0,4x0,4x1 (m)			0,4x0,4x1,5 (m)			0,4x0,4x2 (m)		
30	13	2	25	13	2	24	13	2
40	124	35	33	99	28	31	89	26
28	41	181	25	34	181	24	32	181
$E_{med} = 54.89$			$E_{med} = 48.89$			$E_{med} = 46.89$		
0,4x0,4x3 (m)			0,4x0,4x4 (m)			0,4x0,4x5 (m)		
23	13	2	21	13	1	16	13	1
26	68	22	23	57	18	17	40	13
21	26	181	19	23	181	15	17	181
$E_{med} = 42.44$			$E_{med} = 39.56$			$E_{med} = 34.78$		

Ilustração 45. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,4m (ensaio 03/08/11).

0,5x0,5x1 (m)			0,5x0,5x1,5 (m)			0,5x0,5x2 (m)		
41	13	4	48	13	3	26	13	3
59	186	51	55	178	45	34	125	32
40	60	180	38	56	180	26	38	178
$E_{med} = 70.44$			$E_{med} = 68.44$			$E_{med} = 52.78$		
0,5x0,5x3 (m)			0,5x0,5x4 (m)			0,5x0,5x5 (m)		
24	13	2	22	13	2	21	13	2
29	78	22	29	87	25	27	77	23
21	29	177	21	31	176	20	28	176
$E_{med} = 43.89$			$E_{med} = 45.11$			$E_{med} = 43.00$		

Ilustração 46. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,5m (ensaio 03/08/11).

CAPÍTULO III

0,1x0,1x1 (m)			0,1x0,1x1,5 (m)			0,1x0,1x2 (m)		
12	8	8	10	7	8	12	8	9
9	6	5	7	9	5	8	6	5
6	6	3	6	5	3	6	5	3
$E_{med} = 7.00$			$E_{med} = 6.67$			$E_{med} = 6.89$		
0,1x0,1x3 (m)			0,1x0,1x4 (m)			0,1x0,1x5 (m)		
11	7	8	11	7	8	20	11	12
6	6	4	6	6	5	9	10	8
5	5	3	5	6	3	9	9	6
$E_{med} = 6.11$			$E_{med} = 6.33$			$E_{med} = 10.44$		

Ilustração 47. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,1m (ensaio 08/08/11).

0,2x0,2x1 (m)			0,2x0,2x1,5 (m)			0,2x0,2x2 (m)		
5	8	5	3	5	3	4	5	3
8	33	7	8	22	3	7	20	4
8	9	3	8	7	3	6	7	3
$E_{med} = 9.56$			$E_{med} = 6.89$			$E_{med} = 6.56$		
0,2x0,2x3 (m)			0,2x0,2x4 (m)			0,2x0,2x5 (m)		
3	4	2	2	3	2	2	3	2
4	11	2	3	8	1	3	6	1
5	5	3	4	4	6	4	4	6
$E_{med} = 4.33$			$E_{med} = 3.67$			$E_{med} = 3.44$		

Ilustração 48. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,2m (ensaio 08/08/11).

0,25x0,25x1 (m)			0,25x0,25x1,5 (m)			0,25x0,25x2 (m)		
6	10	5	4	7	4	4	7	4
11	40	8	8	32	7	7	26	5
8	10	4	8	10	3	7	8	3
$E_{med} = 11.33$			$E_{med} = 9.22$			$E_{med} = 7.89$		
0,25x0,25x3 (m)			0,25x0,25x4 (m)			0,25x0,25x5 (m)		
2	4	2	2	3	2	2	3	2
4	15	3	3	8	2	3	7	1
5	5	1	5	4	1	4	4	0
$E_{med} = 4.56$			$E_{med} = 3.33$			$E_{med} = 2.89$		

Ilustração 49. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,25m (ensaio 808/11).

CAPÍTULO III

0,3x0,3x1 (m)			0,3x0,3x1,5 (m)			0,3x0,3x2 (m)		
10	16	8	6	7	7	5	9	5
17	61	12	11	52	13	9	34	8
11	14	6	9	14	7	7	9	4
$E_{med} = 17.22$			$E_{med} = 14.00$			$E_{med} = 10.00$		
0,3x0,3x3 (m)			0,3x0,3x4 (m)			0,3x0,3x5 (m)		
3	7	3	2	4	3	2	4	2
5	20	6	4	15	3	3	11	2
5	6	3	5	5	2	4	4	1
$E_{med} = 6.44$			$E_{med} = 4.78$			$E_{med} = 3.67$		

Ilustração 50. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,3m (ensaio 08/08/11).

0,4x0,4x1 (m)			0,4x0,4x1,5 (m)			0,4x0,4x2 (m)		
20	31	19	10	17	10	17	28	17
34	124	33	18	69	18	31	113	31
21	33	17	12	19	10	21	36	16
$E_{med} = 36.89$			$E_{med} = 20.33$			$E_{med} = 34.44$		
0,4x0,4x3 (m)			0,4x0,4x4 (m)			0,4x0,4x5 (m)		
6	11	6	4	8	5	4	7	4
11	42	11	8	32	8	7	27	7
8	12	5	6	9	4	6	8	3
$E_{med} = 12.44$			$E_{med} = 9.33$			$E_{med} = 8.11$		

Ilustração 51. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,4m (ensaio 08/08/11).

0,5x0,5x1 (m)			0,5x0,5x1,5 (m)			0,5x0,5x2 (m)		
27	40	25	19	30	18	15	24	15
45	156	45	33	117	33	26	95	27
29	45	24	22	35	18	18	28	15
$E_{med} = 48.44$			$E_{med} = 36.11$			$E_{med} = 29.22$		
0,5x0,5x3 (m)			0,5x0,5x4 (m)			0,5x0,5x5 (m)		
12	19	11	9	15	9	8	13	8
20	71	20	16	57	16	10	52	14
14	21	11	11	17	9	14	16	8
$E_{med} = 22.11$			$E_{med} = 17.67$			$E_{med} = 15.89$		

Ilustração 52. Distribuição de iluminâncias para os 6 dutos de seção de lado 0,5m (ensaio 08/08/11).

Outra análise realizada a partir desse ensaio foi a comparação entre o fator de luz diurna obtido no plano de trabalho por um duto de luz e o obtido por uma

CAPÍTULO III

zenital comum. Essa segunda análise objetiva verificar a viabilidade de utilização do sistema de iluminação natural duto de luz para aplicação em ambientes de sala de aula na substituição a iluminação artificial durante o período de disponibilidade luminosa da abobada celeste e/ou na complementação da iluminação artificial e natural nos pontos distantes das janelas.

A seguir estão apresentadas as tabelas com os dados calculados de FLD para o ponto de referência no ambiente com a zenital comum e para o ponto P5 no ambiente com o duto de luz. Esses dados são do ensaio realizado no dia 08/08/2011, devido as condições do céu ter sido mais estável nesse dia. Note que na tabela 17 os dados apresentados são os coletados para a zenital de referência, e no entanto, a medida de comprimento apresentada é do duto que foi medido simultaneamente, pois a zenital de referência é apenas uma abertura na cobertura dotada de difusor idêntico ao colocado na saída do duto. Tanto o duto como a zenital comum estão localizados no centro da sala. Ambos os dados foram coletados simultaneamente.

Tabela 16. FLD para P5 (ensaio 08/08/11).

P5						
FLD (%)						
Dados coletados no plano de trabalho (0,64cm)						
COMPRIMENTO (m)	Seção Quadrada (lado em m)					
	0,10	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50
1	0,14	0,17	0,13	0,18	0,35	0,59
1,5	0,12	0,53	0,1	0,15	0,28	5,97
2	0,11	0,34	0,08	0,11	0,25	0,64
3	0,11	0,21	0,07	0,08	0,19	0,41
4	0,1	0,17	0,05	0,07	0,16	0,29
5	0,06	0,17	0,04	0,06	0,12	0,24

Tabela 17. FLD para zenital comum (ensaio 08/08/11).

COMPRIMENTO do duto medido simultaneamente (m)	REFERÊNCIA					
	FLD (%)					
	Dados coletados no plano de trabalho (0,64cm)					
	Seção Quadrada (lado em m)					
	0,10	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50
1	0,30	0,34	0,63	0,28	0,49	0,82
1,5	0,29	0,45	0,24	0,29	0,48	9,06
2	0,31	0,45	0,33	0,28	0,49	1,41
3	0,28	0,27	0,23	0,27	0,48	1,03
4	0,28	0,52	0,19	0,27	0,48	0,78
5	0,18	0,54	0,2	0,27	0,48	0,81

Note que no momento em que foram coletados os dados do duto de comprimento 1,5m e seção quadrada de 0,5m e da zenital comum de mesma

seção, o céu abriu e houve a incidência de luz direta do sol sobre as maquetes, alterando muito os resultados obtidos.

A partir dos dados acima tabelados foram gerados os gráficos apresentados nas ilustrações de 53 a 58.

Ilustração 53. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 10cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.

Ilustração 54. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 20cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.

Ilustração 55. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 25cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.

CAPÍTULO III

Ilustração 56. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 30cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.

Ilustração 57. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 40cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.

Ilustração 58. Grupo 2 – Ensaio com maquete sob céu real – Seção Quadrada de lado 50cm. Comparação – Zenital Comum e Duto de Luz.

Através dos gráficos (ilustrações de 53 a 58), observa-se:

- A zenital comum apresenta rendimento superior aos dutos de luz em quase todos os resultados obtidos. Isso se deve as perdas ocorridas durante o percurso da luz no interior do duto durante as múltiplas reflexões sofridas.
- Em alguns momentos o desempenho dos dutos se aproximou do desempenho observado com a zenital comum, isso provavelmente se deve a maior disponibilidade de luz na abóbada celeste nessa ocasião associada a luz direta do sol presente durante a coleta de alguns dos dados.
- A comparação com a zenital comum faz evidenciar que com o aumento do comprimento do duto as disparidades de rendimento aumentam, pois o duto perde mais luz no percurso devida as múltiplas reflexões internas. Os dados dos ensaios realizados foram ainda utilizados na verificação do modelo proposto e no cálculo do coeficiente de distribuição.

3.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 3, *Ensaio*, apresenta dois tipos de levantamento empírico, os quais investigam a distribuição da luz natural e a eficiência do condutor, partindo de dutos condutores de luz natural com seção quadrada, espelhados internamente, sem coletor especial na entrada e dotados de difusor na saída. Em um primeiro momento foram realizados ensaios pilotos para testar o procedimento de ensaio desenvolvido e adaptado a partir das legislações pertinentes. Foram realizados ensaio com maquete sob céu real e ensaios fotométricos em laboratório.

Os dados coletados no ensaio com maquete sob céu real foram analisados e seus resultados indicam possibilidades de utilizar sistemas não convencionais para complementação de ambientes de sala de aula, considerando curtas distâncias a ser vencida neste primeiro momento e dutos com grandes seções de entrada, para o caso de utilizar dutos com seção quadrada e espelhados.

Os ensaios fotométricos foram realizados baseados nos procedimentos adaptados da norma CIE 173:2006 e os seus resultados foram comparados aos fluxos luminosos calculados a partir do EDL (eficiência do duto de luz) fornecido pelo MPELD com base nos dados coletados no ensaio sob condição de céu real.

CAPÍTULO III

As comparações apresentadas confirmam o potencial de aplicação dos dutos de luz com seção quadrada espelhados internamente em substituição aos sistemas artificiais de iluminação e/ou na complementação da iluminação natural obtida por janelas laterais em ambientes como os das salas de aula no padrão da FDE. Ressaltando que dutos com seções maiores que 30 cm e de curto comprimento são os que melhor atendem na substituição a outros sistemas de iluminação.

Este capítulo descreve o árduo processo da construção da base primária, ou seja, o levantamento dos dados empíricos. O processo para realização dos ensaios, desde seu planejamento até a coleta dos dados propriamente dita, passa por diversos percalços, sendo de fundamental importância os ensaios pilotos, que auxiliam nos ajustes ao procedimento delineado e na correção dos erros.

Os resultados obtidos não foram, em todos os ensaios, exatamente os esperados, mas considerando as dificuldades da condição de céu ideal, do local de exposição dos modelos e das datas compatíveis entre o tempo da pesquisa e dos recursos materiais e humanos envolvidos, o produto final deixa dados e procedimentos que podem alimentar outros trabalhos e gerar mais reflexões futuras.

Recomenda-se aos leitores interessados em reproduzir os procedimentos de ensaio aqui apresentados que escolham um dia de céu encoberto para a realização dos ensaios sob condição de céu real, assim evitando as discrepâncias ocorridas nos “FLDs” calculados e que registrem por meio de fotografias as condições de céu.

Para reproduzir o ensaio fotométrico, lembre-se que a eficiência do duto em porcentagem não varia, e que a iluminância na entrada do duto é que vai determinar o fluxo luminoso obtido e que a escala da lâmpada de referência pode levar a grandes discrepâncias entre os valores de fluxo luminoso obtidos com dutos em escala e o fluxo luminoso conhecido da lâmpada.

CAPÍTULO IV
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesse capítulo são apresentadas as simulações computacionais realizadas com o software *Photopia*, sendo este um programa 3D de design e análise geral de luminárias, o qual foi projetado especificamente para analisar sistemas ópticos de iluminação, podendo avaliar dutos de luz. Este software foi utilizado para comparar os resultados do modelo matemático mais complexo, que utiliza *raytacing*, com o modelo simplificado proposto e apresentado no capítulo 5.

O *Photopia* permite importar modelos 3D do CAD e de outros programas similares e é mais adequado para estudos de dutos de luz devido sua capacidade de considerar grande número de reflexões internas, o que não ocorre por exemplo com o software *Radiance*, que permite no máximo 9 interreflexões de um raio. A base de cálculo do *Photopia* é o *raytracing*. Para realizar esses cálculos, utiliza geometrias reais, lâmpadas, dados direcionais medidos de distribuição de intensidade luminosa, refletância e transmitância para materiais componentes de luminárias. Partindo de definições e especificações fornecidas pelo usuário o *Photopia* permite análises rápidas ou detalhadas do sistema projetado. O andamento do cálculo pode ser observado no computador durante o processamento deste. Desta forma, o usuário pode observar a evolução do processo por meio da porcentagem do total do cálculo.

No *Photopia* a fonte luminosa é representada por uma ou várias lâmpadas artificiais, sendo possível a simulação de um céu com ou sem sol. Este software inclui modelos de lâmpadas para uso em análises de sistemas de iluminação natural, como claraboias, dutos de luz, coletores solares e janelas laterais que utilizam algum sistema de controle da luz natural. Estes modelos (lâmpada) baseiam-se na IESNA RP-2 (apud tutorial do software *Photopia*, 2013), cujas equações de luz natural modelam a radiação direta do sol (iluminância do disco solar) para várias alturas solares e condições de céu.

As abóbadas celestes disponíveis incluem valores de luminosidade variável em todo o hemisfério, conforme descrito no RP-21. Os modelos incluem um ajuste que permite modelar o tamanho angular real do disco solar em sua órbita elíptica. A combinação de ambos os modelos de sol e céu produz uma iluminância total que tem a intenção de se adequar às condições reais exteriores. No entanto, é

CAPÍTULO IV

necessário considerar que as condições reais podem variar muito e as equações do RP-21 representam condições médias. Essa variabilidade é o que torna as medições físicas com sistemas de iluminação natural um desafio e é uma das razões por que a simulação torna-se interessante.

As simulações com sistemas de iluminação natural são diferentes das que utilizam as lâmpadas elétricas, visto que os modelos para luz natural devem iluminar o lado de fora do dispositivo para receber a luz enquanto que os sistemas artificiais devem iluminar a luminária de dentro.

Os modelos padrão de abóbada celeste disponível no *Photopia* estão configurados para iluminar uniformemente uma área de 4" de diâmetro. A fim de iluminar totalmente o dispositivo simulado a abóbada celeste deve ser escalada de acordo com as dimensões do mesmo.

As abóbadas celestes disponíveis são relativamente grandes para gerar uma iluminação uniforme sobre a área que irá acomodar o sistema de iluminação natural. A maior parte da luz se concentra na direção do centro do hemisfério, mas uma pequena parcela se afasta do centro, caindo perto do centro do hemisfério, o que altera a precisão dos modelos. Visto que boa parte da luz gerada pela abóbada celeste não entra no sistema de iluminação natural, torna-se importante traçar um grande número de raios para que haja uma boa resolução dos resultados obtidos.

A eficiência do duto de luz (EDL), mostrado no relatório fotométrico, é a relação dos lumens emitidos a partir do sistema de iluminação natural pelo total de lumens produzido pelo sol e céu. No entanto, os lumens totais produzidos pela abóbada celeste e pelo sol é muito grande em comparação com o número total de lumens que entra efetivamente no sistema de iluminação natural.

Os estudos apresentados por Dutton e Shao (2007), mostraram bons resultados na utilização desse software para predição do desempenho luminoso de dutos de luz comparados a modelos matemáticos existentes. As simulações realizadas e apresentadas neste capítulo, tiveram por objetivo prever a transmitância da luz através de dutos de luz, conforme recomendação recebida do professor Dr. Li Shao da Universidade De Montfort, em visita realizada ao Institute of Energy and Sustainable Development. Para tanto foram simulados 36 dutos com seção de entrada variando de 10cm, 20cm, 25cm, 30cm, 40cm e 50cm e comprimentos variando de 1m, 1,5m, 2m, 3m, 4m e 5m.

4.1 ROTEIRO DE SIMULAÇÃO NO PHOTOPIA

A seguir está apresentado um roteiro passo a passo para a simulação no software *Photopia*, demonstrando como foram realizadas as simulações.

1º Passo: Abrir um documento novo

Ilustração 59. Primeira tela – abrindo um documento novo.

2º Passo: Importar o modelo do cad.

Ilustração 60. Segunda tela – importando modelo do cad.

Após clicar no DXF/DWG, escolher o arquivo do modelo e clicar em abrir, vai ser solicitado especificar a unidade que o modelo foi desenhado. O default será em milímetro, se o software estiver configurando para isto, então é só clicar *enter* que o modelo irá aparecer nas coordenadas 0,0,0 conforme desenhado.

CAPÍTULO IV

Ilustração 61. Terceira tela – verificando a unidade do modelo.

3º Passo: Aplicar Material ao Modelo

O desenho no *cad* deve ser executado em *layers* predeterminada para facilitar a associação do material reflexivo ao duto. Para alterar o tipo de *layer* deve-se clicar na aba *Settings* e escolher a opção *Layers*. Dentro da janela das *layers* clicase em *Non Optical* para mudar o tipo da *layer* para *Reflective*. Com isso, torna-se possível associar a essa *layer* um material reflexivo da biblioteca.

Ilustração 62. (a) Quarta tela – ajustando as *layers*.

Ilustração 63. (b) Quarta tela – ajustando as *layers*.

As *Layers* dos materiais reflexivos devem começar com REFL-nome da *layer*.

Para aplicar o material ao modelo importado, deve-se clicar na aba *Edit* e escolher a opção *Design Properties*. Ao Abrir a ferramenta *Design Properties* vão aparecer quatro abas: *Lamp*, *Reflective*, *Refractive* e *Transmissive*. Na aba *Lamp* estão as propriedades da lâmpada escolhida. Na aba *Reflective*, *Refractive* e

CAPÍTULO IV

Transmissive aparecem as *layers* que foram previamente transformadas em *Reflective*, *Refractive* ou *Transmissive*.

Ilustração 64. Quinta tela – *design properties*.

Para aplicar o material deve ser selecionada a *layer* do material a ser aplicado e clicar no botão *Assign Material*. Com isso será aberta a biblioteca de materiais para serem escolhidos e aplicados.

Ilustração 65. Sexta tela – ajustando os materiais.

Para o duto em questão deve ser associado um espelho de refletância 86%, para ajustar ao espelho utilizado nos modelos ensaiados em escala reduzida.

CAPÍTULO IV

4º Passo: Importar a lâmpada (para o caso dos dutos de luz, deve ser importada a abóbada celeste)

Para importar a lâmpada deve-se clicar na aba *File* e escolher a opção *Import Lamp*. Esta opção abre a biblioteca com todas as lâmpadas disponíveis pelo *Photopia* incluindo as abóbadas celestes com as diferentes alturas solares e diâmetros de abertura.

Ilustração 66. Sétima tela – importando a abóbada celeste.

O *Photopia* tem céu claro (*sun & clear sky-10 deg-1ft aperture*) e céu encoberto (*cloudy sky-90 deg-4ft aperture*) com altura solar variando de 10º a 90º e diâmetro da abóbada celeste variando de 1FT, 2FT e 4FT.

Ao escolher o tipo de céu e clicar em abrir, o software vai perguntar onde inserir, o default é no 0,0,0. Se o modelo foi desenhado com a entrada do duto no 0,0,0, então é só clicar no *Enter* que ele vai para a abertura de entrada, centralizado, conforme desenhado.

Ilustração 67. Oitava tela – verificando o ponto de inserção da abóbada celeste.

A *shield* (material que promove a blindagem do céu para evitar que haja vazamento de luz durante a simulação) tem como *default* a seção circular de abertura para encaixe do duto. Para dutos de outras seções, esta deve ser redesenhada de modo que haja o ajuste perfeito na entrada do duto e assim a completa vedação da junção entre a abóbada celeste e a entrada do mesmo.

Ilustração 68. Nona tela – ajustando a base da abóbada a entrada do duto.

Uma das maneiras de se ajustar a *Shield* na entrada do duto é transformando a *layer REFL-Shield* em *layer current*. Para tanto deve entrar na aba *Settings* e clicar no botão *Layers*. Na tela das *layers*, a *REFL-Shield*, fica no final da lista. Para tornar a *layer corrente* essa deve ser selecionada e após isso, o usuário deve clicar no botão *Set Current*.

CAPÍTULO IV

Ilustração 69. Décima tela – selecionando a *layer refl-shield* como *current*.

Com a *layer REFL-Shield* como *current* é só redesenhar a base da abóbada como se fosse dois grandes “C” fechando o contorno da entrada do duto, ou desenhar dois pequenos “C” por dentro da abertura da base da abóbada. Para isso deve-se clicar na aba *Draw* e escolher a opção *Polygon Surface* para ativar a ferramenta de desenho. Com isso é possível clicar nos *end points* e utilizá-los como guia para o redesenho.

Ilustração 70. Décima primeira tela – desenhando o ajuste da abóbada a entrada do duto.

Para facilitar o redesenho deve ser ajustada a imagem na tela com as ferramentas *Orbit*, *Dynamic Zoom* e *Pan*. Com a nova *shield* desenhada, já pode

apagar a antiga e verificar se a nova *shield* está na *layer REFL-Shield* e portanto está com um material de refletância zero, o que garante que não haverá escape de luz pela base da abóbada celeste.

A parte em rosa é a vista do interior da abóbada celeste, é possível observar a necessidade de ajuste da seção circular da *shield* a seção quadrada do duto.

Ilustração 71. (a) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.

Em vermelho *hachurado* mostra a metade da nova *shield* redesenhada sobre a *shield* original em azul. Note que a nova *shield* se ajusta perfeitamente a seção quadrada do duto.

Ilustração 72. (b) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.

CAPÍTULO IV

Ilustração 73. (c) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.

Ilustração 74. (d) Décima segunda tela – passo a passo para redesenhar a base da abóbada celeste.

Após o redesenho da metade da *shield* pode ser deletada a *shield* original e redesenhada a outra parte. Outra opção é fazer o *mirror* da metade redesenhada e ajustar os possíveis nodes fora do lugar para o encaixe perfeito.

Por fim a *shield* foi completamente redesenhada. Note que a parte rosa visível se restringe a vista do interior da abóbada pela abertura do duto. Não há mais área passível de vazamento de luz que não seja pelo interior do duto

5º Passo: Ajustar as Configurações Fotométricas

Para ajustar as configurações fotométricas é necessário clicar na aba *Analysis* e escolher a opção *Specify Photometric Output*. O *Photometric Output Specification* tem três abas: *Output Summary*, *Photometric Report* e *Illuminance*.

No *Output Summary* tem as opções para as saídas de dados. É recomendado marcar no *Output Types* os dois tipos, *Photometric Report*, pois este é um relatório da simulação e o *Illuminance on a Plane*, pois é desejável ter os dados de iluminância plotados no plano de trabalho ou em um plano de interesse. No *Output*

Scaling a opção *Relative* tem como base as informações da lâmpada escolhida na biblioteca, a opção *Absolute* tem como base o total de lumens que sai do sistema, e a opção *Per Thousand Lamp Lumens* vai assumir 1000 lumens por lâmpada simulada.

Ilustração 75. Décima terceira tela – ajustando as configurações fotométricas.

O *Photométric Report* apresenta as opções fotométricas para serem consideradas durante a simulação. É a configuração propriamente dita do goniômetro virtual. No *File Format* ele dá as características do ensaio de acordo com as normas internacionais havendo três opções possíveis. Para os ensaios no

CAPÍTULO IV

Brasil costuma ser usado o padrão americano IES. Para o caso dos dutos de luz estudados, adotamos também o padrão IES. O *Report Type* dá três opções de função da luminária. Para o caso do duto de luz adotamos *Indoor*, visto que esse tipo de sistema é utilizado internamente aos ambientes. No *Photometric Type* o *Photopia* dá duas opções sendo que para o caso dos dutos de luz o tipo C é o mais adequado, visto que esse sistema é semelhante a uma luminária artificial do tipo usada em ambientes internos. Os Ângulos Horizontais e Verticais são as direções em que serão tomadas as medidas pelo goniômetro virtual. Para o caso dos dutos de luz adotamos de 0° a 90° variando de 5° em 5° no plano Vertical e de 0° a 360° variando de 10° em 10° , pois a luz emitida por esse tipo de sistema é normalmente para baixo no plano vertical e no plano horizontal pode variar em todas as direções. O *Photometric Center* é o centro da abertura de saída e o *Test Distance* é o ponto em que será colocado o sensor virtual do goniômetro virtual, ou seja, onde será coletado o dado medido (simulado). Note que a unidade de medida do *Test Distance* é em metro. A recomendação é de que o *Test Distance* tenha uma distância igual ou superior a 5 vezes a maior dimensão da saída de luz, ou da maior dimensão da área emissora de luz da luminária. O *Decimal Precision* é o número de casas decimais que se deseja ter de precisão. O *Luminous Dimension* é a dimensão da parte luminosa da luminária. O *default* irá marcar a opção *Use Physics Extents from Cad Model*, mas nem sempre o desenho do *Cad* contempla apenas as dimensões da área luminosa. Quando a luminária é embutida e o difusor ou peça emissora é plana, justaposta ao forro, o *Z* fica sendo 0,0,0(zero). Para o caso de dutos circulares o *X* e o *Y* são iguais ao diâmetro da saída e o *Z* zero se for plano o difusor ou emissor. Mas se o duto for retangular, o *X* e o *Y* vão variar e se o difusor ou emissor for proeminente o *Z* será diferente de zero.

Ilustração 76. Décima quarta tela – O *Z* do *Luminous Dimension*.

Na aba *Illuminance* são apresentados os planos nos quais serão plotados os valores de iluminância simulados. Esses planos podem ser construídos de dois modos: clicando no botão *Define a Plane* e inserindo as coordenadas das extremidades do plano ou trazendo um plano de referência já com as coordenadas

do *Cad* e redesenhando o plano com a ferramenta *Illuminance Plane* da aba *Draw*, utilizando os *end points* como referência.

Ilustração 77. Décima quinta tela – ajustando o *Illuminance Plane*.

Caso a opção seja definir o plano inserindo as coordenadas é necessário lembrar que o observador está no 0,00 olhando o plano de cima para baixo.

Para saber se o plano está na posição correta existe uma pequena linha vermelha pontilhada desenhada no ponto *Lower Left Corner*. Para estar correta a posição do *Illuminance Plane*, esta linha pontilhada deve sempre estar apontada na direção que vem a luz do duto ou das luminárias em geral.

Posição correta do *Illuminance Plane*, linha tracejada no *Lower Left Corner* apontando para a abóbada celeste.

Ilustração 78. Décima sexta tela – verificando a posição do *Illuminance Plane*.

6º Passo: Ajustar as Configurações do *Raytrace*

Para ajustar as configurações do *Raytrace* é necessário clicar na aba *Analysis* e escolher a opção *Specify Raytrace Settings*. Ao escolher essa opção, abre uma janela com duas abas *Raytracing* e *Display*. A aba *Raytracing* apresenta opções de parâmetros básicos e avançados de *raytracing*, incluindo parâmetros adicionais. Para as simulações com dutos de luz, devido à dimensão desses, em geral, serem

CAPÍTULO IV

muito longas, para garantir precisão à simulação o *Initial Sources Rays* deve ser de 50 milhões e o *Number of Ray Reactions* deve ser de 50.

Ilustração 79. Décima sétima tela – ajustando as configurações do *raytrace*.

Na aba *Display* é possível definir com qual frequência serão mostrados os raios durante a simulação, por exemplo, se a opção for 10%, serão plotados os raios de 10% em 10% até atingir os 100% dos raios simulados. Ainda é possível visualizar os raios simulados no desenho do *Cad* optando por marcar *Add 3D Rays to Project* e escolhendo o número de raios e o comprimento desses. Essa opção torna-se interessante na análise do percurso dos raios e da performance da luminária.

7º Passo: Iniciar a Simulação

Para iniciar a simulação é necessário clicar na aba *Analysis* e escolher a opção *Begin Analysis*. Com esse último passo, a simulação inicia e após o termino desta é possível obter os resultados no relatório fotométrico ou plotados nas curvas polares e planos previamente estabelecidos.

Ilustração 80. Décima oitava tela – iniciando a simulação.

4.2 TRATAMENTO DOS DADOS

O *Photopia* fornece um relatório fotométrico no qual é dado o fluxo luminoso emitido pela luminária. Este relatório também apresenta a eficiência da luminária. No entanto, para simulações com dutos de luz a eficiência fornecida (EDL) é falsa, pois O *Photopia* faz o cálculo baseado no total de fluxo luminoso produzido pela fonte luminosa, que no caso do duto de luz é a abóbada celeste.

Para o *Photopia*, o valor de eficiência de uma luminária é sempre o quociente entre o total de lumens que sai da luminária pelo total de lumens gerado pelas fontes (lâmpadas). No caso de modelos que utilizam luz natural, este resultado não corresponde à eficiência real da luminária, tendo em vista que a fonte de luz não emana luz de dentro do equipamento, mas sim de fora. Então, como apenas uma pequena fração desta luz é captada pelo duto, o resultado calculado é insignificante. Desse modo, é necessário conhecer o valor do fluxo luminoso que efetivamente entra no duto de luz para que se possa calcular a eficiência correta.

Para calcular o fluxo luminoso que entra no duto de luz é necessário calcular a iluminância horizontal na abertura de entrada do duto (lm/m^2) e multiplicá-la pela área da abertura deste. O *Photopia* disponibiliza uma planilha do Excel que automatiza este cálculo. Trata-se da opção *Daylighting Calculator* que fica no *Menu Help*. Esta ferramenta disponibiliza duas opções de condição de céu, com sol ou sem sol e duas opções de unidades de medidas a serem escolhidas, o sistema

CAPÍTULO IV

Internacional e o sistema Imperial, sendo que o usuário brasileiro deve escolher o sistema métrico internacional, cujas unidades são em metros, lumens e lux. Para cada sistema métrico disponível, o usuário poderá escolher como dados de entrada o horário, a localização (latitude e longitude) e a data da simulação ou a altura solar para poder obter o cálculo do fluxo luminoso que entra no duto de luz. Sugere-se que se use o método *Enter Solar Altitude*, pois nesta opção, basta fornecer a posição angular do sol e a área da abertura de entrada do coletor, que a planilha calcula o valor do fluxo luminoso que entra no duto.

A planilha *Daylighting Calculator* apenas requisita o diâmetro do duto de luz, pois pressupõe-se que o formato do dispositivo é redondo. Caso o formato seja diferente torna-se necessário que o próprio usuário calcule a área da abertura do duto, pois para a planilha *Daylighting Calculator*, o que interessa é a área real da abertura do condutor. Note que a automação do cálculo desta área na planilha é válida apenas para dutos circulares. Se o duto tiver outra forma o usuário deve calcular essa área e depois multiplicá-la pelo valor da Iluminância horizontal média da entrada de luz natural no duto, valor esse calculado pela planilha *Daylighting Calculator*.

$$\phi_{in} = E_{média} \cdot A \quad \text{Equação 151}$$

Onde:

ϕ_{in} é o fluxo luminoso total na entrada do duto (lumens);

$E_{média}$ é a Iluminância média horizontal (lux);

A é a área de entrada do duto de luz (m^2);

Com o fluxo luminoso da entrada (ϕ_{in}) calculado e o valor do fluxo total emitido pelo duto de luz (ϕ_{out}), obtido no relatório fotométrico final da simulação, torna-se possível calcular a eficiência do duto de luz (em porcentagem) por meio da equação 152.

$$E = \frac{\phi_{out}}{\phi_{in}} \cdot 100 \quad \text{Equação 152}$$

Onde, E é a eficiência do duto de luz (EDL) e ϕ_{out} fluxo luminoso total emitido pelo duto;

No relatório fotométrico também está apresentada a tabela de coeficiente de utilização da luminária, mas como o valor do fluxo luminoso que adentra o sistema está incorreto, essa tabela gera resultados muito baixos, tendendo a zero. Para resolver esse problema se faz necessário o uso de um software editor fotométrico, para que possa ser corrigido o valor do fluxo total de entrada no duto e assim obter a tabela com os coeficientes de utilização CU ou fator de utilização FU.

Para gerar as tabelas de Coeficiente de Utilização dos dutos simulados (ver APÊNDICE B), foi adotado o software *photometric toolbox*. Esse editor fotométrico utiliza o arquivo com terminação IES gerado pelo *Photopia*, arquivo este, que tem os dados do relatório fotométrico, para corrigir o valor errado do fluxo luminoso que entra no duto e assim obter os dados corretos tanto para as curvas polares como para os CUs.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas com o software *Photopia* foram recomendadas pelo Dr. Li Shao da Universidade de Leicester, UK, por ser um software que avaliava dutos de luz e fornece dados da eficiência luminosa, curvas polares e coeficiente de utilização. Com esses produtos, o software em questão era exatamente a solução das lacunas encontradas nos ensaios fotométricos realizados (ver capítulo 3), ou seja, fornece o padrão de distribuição da intensidade luminosa (curvas polares) e o coeficiente de utilização (CU), os dois produtos mais difíceis de obter nos ensaios, pois necessitaria de um goniômetro para obter a intensidade luminosa e de múltiplos ambientes e cenários para gerar as tabelas de CU.

A análise das curvas polares (ver ilustração 80) possibilitou identificar um erro ocorrido durante as simulações, o qual foi eliminado com a inserção de um vidro transparente de transmissão luminosa de 99% na entrada de cada duto simulado. O software não reconhecia a porção de fluxo luminoso que entrava no duto pela componente direta, pois o duto, estando aberto nas extremidades, gerava um buraco negro para o fluxo central. Isso foi observado nas curvas geradas após a primeira leva de simulação (ver APÊNDICE C).

Após a colocação do vidro transparente na entrada do duto, o software passa a reconhecer essa porção de fluxo luminoso e a simulação torna-se correta. Esse efeito fica mais evidente nos dutos de maior seção, como pode ser observado na ilustração 81.

CAPÍTULO IV

Ilustração 81. Curvas polares dos dutos simulados.

A princípio as simulações tinham por objetivo obter os dados fotométricos necessários para uso no dimensionamento de sistemas de iluminação com dutos de luz por meio do modelo matemático proposto (ver capítulo 5). Seria utilizado os coeficientes de utilização calculados, a partir das simulações, no cálculo do número de dutos necessários para iluminar um ambiente determinado, com a iluminância requerida no plano de trabalho. Porém, esses coeficientes de utilização mostraram-se inadequados para serem utilizados no cálculo do dimensionamento proposto, sendo necessária a inclusão de um coeficiente empírico em substituição ao calculado com base nos dados da simulação. Os coeficientes calculados com os dados das simulações no *Photopia* forneceram resultados superestimados quando comparados aos resultados dos ensaios com maquete sob céu real (ver item 5.5).

Os dados obtidos nas simulações, e calculados a partir desta, foram tabelados (ver tabelas de 18 a 25) e os gráficos gerados (ilustrações 82 e 83) os quais permitem a análise comparativa entre os resultados simulados, previsto com o Modelo Preditivo da Eficiência Luminosa em Dutos e ensaiados sob condição de céu real (LUZ,2009).

Tabela 18. Resultado da simulação – dutos de seção 10cm de lado.

SEÇÃO QUADRADA (10cm de lado)						
Comprimento (m)	seção (m)	Area (L ²)	FTout	Ehorizontal	FTin	E (%)
1	0.1	0.01	41	16386	163.86	25.02
1.5	0.1	0.01	26	16386	163.86	15.87
2	0.1	0.01	18	16386	163.86	10.98
3	0.1	0.01	10	16386	163.86	6.10
4	0.1	0.01	6	16386	163.86	3.66
5	0.1	0.01	4	16386	163.86	2.44

Tabela 19. Resultado da simulação – dutos de seção 20cm de lado.

SEÇÃO QUADRADA (20cm de lado)						
Comprimento (m)	seção (m)	Area (L ²)	FTout	Ehorizontal	FTin	E (%)
1	0.2	0.04	291	16386	655.44	44.40
1.5	0.2	0.04	216	16386	655.44	32.95
2	0.2	0.04	166	16386	655.44	25.33
3	0.2	0.04	107	16386	655.44	16.32
4	0.2	0.04	73	16386	655.44	11.14
5	0.2	0.04	54	16386	655.44	8.24

Tabela 20. Resultado da simulação – dutos de seção 25cm de lado.

SEÇÃO QUADRADA (25cm de lado)						
Comprimento (m)	seção (m)	Area (L ²)	FTout	Ehorizontal	FTin	E (%)
1	0.25	0.0625	520	16386	1024.125	50.78
1.5	0.25	0.0625	402	16386	1024.125	39.25
2	0.25	0.0625	310	16386	1024.125	30.27
3	0.25	0.0625	212	16386	1024.125	20.70
4	0.25	0.0625	153	16386	1024.125	14.94
5	0.25	0.0625	115	16386	1024.125	11.23

CAPÍTULO IV

Tabela 21. Resultado da simulação – dutos de seção 30cm de lado.

SEÇÃO QUADRADA (30cm de lado)						
Comprimento (m)	seção (m)	Area (L ²)	FTout	Ehorizontal	FTin	E (%)
1	0.3	0.09	824	16386	1474.74	55.87
1.5	0.3	0.09	656	16386	1474.74	44.48
2	0.3	0.09	517	16386	1474.74	35.06
3	0.3	0.09	367	16386	1474.74	24.89
4	0.3	0.09	272	16386	1474.74	18.44
5	0.3	0.09	210	16386	1474.74	14.24

Tabela 22. Resultado da simulação – dutos de seção 40cm de lado.

SEÇÃO QUADRADA (40cm de lado)						
Comprimento (m)	seção (m)	Area (L ²)	FTout	Ehorizontal	FTin	E (%)
1	0.4	0.16	1663	16386	2621.76	63.43
1.5	0.4	0.16	1378	16386	2621.76	52.56
2	0.4	0.16	1115	16386	2621.76	42.53
3	0.4	0.16	839	16386	2621.76	32.00
4	0.4	0.16	652	16386	2621.76	24.87
5	0.4	0.16	520	16386	2621.76	19.83

Tabela 23. Resultado da simulação – dutos de seção 50cm de lado.

SEÇÃO QUADRADA (50cm de lado)						
Comprimento (m)	seção (m)	Area (L ²)	FTout	Ehorizontal	FTin	E (%)
1	0.5	0.25	2439	16386	4096.5	59.54
1.5	0.5	0.25	2211	16386	4096.5	53.97
2	0.5	0.25	1961	16386	4096.5	47.87
3	0.5	0.25	1546	16386	4096.5	37.74
4	0.5	0.25	1242	16386	4096.5	30.32
5	0.5	0.25	1018	16386	4096.5	24.85

Tabela 24. Comparação entre ensaio sob céu real com resultados do *photopia* (céu encoberto).

b	h	EDLmed	EDLcal	PHOTOPIA
		céu	MPELD	
		real	p=0,86	
10	100	23	27	25
10	150	14	18	16
10	200	11	12	11
25	100	54	52	51
25	150	45	41	39
25	200	34	33	30
40	100	68	64	63
40	150	62	54	53
40	200	48	46	43
r ²			0.9862	0.9975
r			0.9931	0.9988

Ilustração 82. Comparação entre os dados medidos e os simulados.

Ilustração 83. Comparação entre os dados calculados e os simulados.

b	h	EDLcal	PHOTOPIA
		MPELD	
		p=0,86	
10	100	27	25
10	150	18	16
10	200	12	11
10	300	7	6
10	400	4	4
10	500	3	2
20	100	46	44
20	150	34	33
20	200	27	25
20	300	18	16
20	400	12	11
20	500	9	8
25	100	52	51
25	150	41	39
25	200	33	30
25	300	22	21
25	400	16	15
25	500	12	11
30	100	57	56
30	150	46	44
30	200	38	35
30	300	27	25
30	400	20	18
30	500	15	14
40	100	64	63
40	150	54	53
40	200	46	43
40	300	34	32
40	400	27	25
40	500	22	20
50	100	69	60
50	150	60	54
50	200	52	48
50	300	41	38
50	400	33	30
50	500	27	25
r ²			0.9933
r			0.9966

Tabela 25. Comparação entre resultados calculados (MPELD) com os do *photopia*.

CAPÍTULO IV

Os resultados obtidos nas simulações com os 36 dutos foram comparados com os ensaios com modelo em escala real sob condição de céu real realizados no mestrado condução da luz natural por sistemas não convencionais (LUZ,2009) e com resultados calculados por meio do modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos de luz (MPELD). Essas comparações estão apresentadas nas tabelas 24 e 25 e nos gráficos das ilustrações 82 e 83.

Comparando os resultados de Eficiência do Duto de Luz (EDL) obtidos com os dados coletados no ensaio sob condição de céu real com os resultados calculados tanto com o MPELD como pelos dados obtidos com o software *Photopia* fica clara a alta correlação existente com R^2 sempre acima de 0,98 como demonstrado nos gráficos 82 e 83.

Analisando as tabelas 18 e 19 é possível observar que as porcentagens de iluminância que chega na saída do duto é muito próxima quando calculada pelo MPELD, simulada pelo *Photopia* ou calculada com base nos dados coletados no ensaio sob condição de céu real. Esses resultados levam a considerar tanto a simulação com o *Photopia* ou a predição por meio do MPELD como ferramentas adequadas para obtenção da eficiência luminosa em dutos de luz. Neste caso, o MPELD leva a vantagem de ser uma equação simples, que pode ser facilmente aplicada com resultados disponíveis em segundos, se utilizada em uma planilha do Excel, por exemplo, ou ainda pode ser calculada manualmente. Já o *Photopia* é um software de custo elevado, desenvolvido pela LTI Optics⁹, que no Brasil é comercializado apenas pela LabLux¹⁰, sendo utilizado principalmente por fabricantes de luminárias. Talvez o custo e a complexidade para realizar a simulação não torne esta ferramenta como a melhor opção para o uso no dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz por arquitetos e projetistas na fase de projeto.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 4 *Simulação Computacional* apresenta o software *Photopia* como uma ferramenta para predição da eficiência luminosa de dutos de luz. Para tanto, é colocado um roteiro de simulação com o passo a passo para simular dutos de luz com ênfase nos dutos de seção quadrada, os quais necessitam de ajustes

⁹ <http://www.ltioptics.com/Photopia/overview.html>

¹⁰ <http://www.lablux.com.br/>

especiais para realizar as simulações, visto que os modelos padrões são para dutos tubulares.

As vantagens dessa ferramenta são os produtos fornecidos: o relatório fotométrico que permite verificar o número de interreflexões de cada raio luminoso, as curvas polares de distribuição da intensidade luminosa, permitindo a comparação do duto com luminárias artificiais e a eficiência do sistema. Como principal limitação da ferramenta tem-se as tabelas de coeficiente de utilização, que no primeiro momento gera a inconveniência de necessitar de outro aplicativo (Photometric Toolbox) para editar os dados simulados, visto que o *Photopia* não considera o fluxo luminoso que efetivamente entra no duto e sim todo o fluxo luminoso emitido pela abóbada celeste como sendo o fluxo inicial. Outro problema encontrado com essas tabelas foi o fato de que, para dimensionar dutos de luz, em comparação aos resultados obtidos com os ensaios sob condição de céu real, não apresentaram valores condizentes. Essa questão foi contornada pela substituição do coeficiente de utilização pelo coeficiente de distribuição (ver pag 147), calculado a partir dos dados coletados no ensaio com maquete sob céu real.

CAPÍTULO V
PROPOSIÇÃO DE MODELO

5 PROPOSIÇÃO DE MODELO

Neste capítulo está apresentada uma proposta de modelo matemático que parte da Eficiência do Duto de Luz (EDL) fornecido pelo modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPELD), (LUZ, 2009) para dimensionar sistemas de iluminação natural que utilizem dutos espelhados de seção quadrada.

O modelo proposto denominado de Modelo para Dimensionamento de Sistemas de Iluminação Natural com Dutos de Luz (MDDL), fornece o número de dutos necessários para iluminar um ambiente determinado com uma iluminância requerida no plano de trabalho. Esse modelo foi desenvolvido a partir da exploração teórica dos métodos dos lumens, das cavidades zonais e do roteiro de cálculo apresentado no manual da OSRAM (Disponível em: <http://www.osram.com.br>) para o dimensionamento de sistemas de iluminação artificial.

A seguir estão apresentados os três métodos teóricos, referidos acima, utilizados na proposição do MDDL.

5.1 MÉTODO DOS LUMENS

O método dos lumens é usado tanto em iluminação natural como artificial para calcular a iluminância média (E) no plano de trabalho de ambientes internos, sendo definida pela equação:

$$E = \frac{\Phi_{total}}{A} \quad \text{Equação 153}$$

onde:

E é a iluminância média (lux);

Φ_{total} é o fluxo luminoso total no plano de trabalho (lumens);

A é a área do plano de trabalho (m²).

O coeficiente de utilização (CU) dá a fração de lumens que atinge o plano de trabalho vindo diretamente da fonte luminosa ou de suas interreflexões. No cálculo do coeficiente de utilização entra a eficiência da luminária, o impacto na distribuição destas pelo ambiente e as superfícies internas do ambiente. Assim, o número de lumens emitido pela luminária multiplicado pelo seu CU determina o número de lumens que chega ao plano de trabalho.

CAPÍTULO V

$$E = \frac{\phi_{total} \cdot CU}{A} \quad \text{Equação 154}$$

Para garantir a iluminância determinada o fator de perda de luminosidade deve ser aplicado para estimar a depreciação do fluxo luminoso ao longo do tempo.

$$E = \frac{\phi_{total} \cdot CU \cdot LLF}{A} \quad \text{Equação 155}$$

onde o LLF é o fator de perda luminosa

Assim sendo a equação final é:

$$E = \frac{n_{luminarias} \cdot n_{lampadas} \cdot \phi_{lampada} \cdot CU \cdot LLF}{A} \quad \text{Equação 156}$$

onde:

$n_{luminarias}$ é o número de luminárias;

$n_{lampadas}$ é o número de lâmpadas;

$\phi_{lampada}$ é o fluxo luminoso de uma lâmpada (lumens).

Esse método apresenta algumas limitações, por exemplo, a iluminância calculada é um valor médio, sendo representativo, apenas, se as luminárias estiverem bem distribuídas, de modo a obter uma iluminância razoavelmente uniforme. Outra limitação é que o cálculo do coeficiente de utilização é baseado em ambientes vazios e com as refletâncias das superfícies internas perfeitamente difusas.

O coeficiente de utilização é medido em ensaios de laboratório para vários ambientes e seus resultados são tabelados. Como o CU depende também da eficiência da luminária, as tabelas são geradas por luminária, no caso dos sistemas artificiais. Para iluminação natural é adotado uma única tabela de CU para qualquer tipo de zenital (IESNA,2000), considerando que a abertura é a própria fonte luminosa, não havendo perda de eficiência pela configuração da mesma.

5.2 MÉTODO DAS CAVIDADES ZONAIS (ZONAL CAVITY)

O procedimento de cálculo usando o método das cavidades zonais inicia-se pela seleção do coeficiente de utilização (CU), passando pela seleção dos fatores de perda luminosa ao longo do tempo e termina com o cálculo da iluminância média requerida.

A seleção do coeficiente de utilização segue 5 passo:

- 1 passo: identificar as refletâncias das cavidades do forro, recinto e piso; a largura e o comprimento do ambiente e as alturas referentes a cada uma das cavidades (forro, recinto e piso). Para tanto, deve ser considerada como cavidade do forro, toda área acima do plano das luminárias, a cavidade do piso é toda a área abaixo do plano de trabalho e a cavidade do recinto é toda a área entre as outras duas (ver ilustração 84).
- 2 passo: determinar as relações das cavidades:
Relação da cavidade do forro (CCR)
Relação da cavidade do recinto (RCR)
Relação da cavidade do piso (FCR)
- 3 passo: determinar a refletância efetiva do forro;
- 4 passo: determinar a refletância efetiva do piso;
- 5 passo: determinar o dado do coeficiente de utilização fornecido pelo fabricante da luminária.

Ilustração 84. Croqui com as Cavidades do recinto.
Fonte: IESNA (2000)

A seleção dos fatores de perda luminosa leva em conta a depreciação pela sujeira do ambiente; a perda luminosa da lâmpada ao longo do tempo; a queima da lâmpada e a sujeira da luminária. O produto dos fatores citados dá o fator total da perda luminosa (LLF).

O cálculo do número de luminárias ou da iluminância média especificada se dão pelas equações 157 e 158:

CAPÍTULO V

$$n_{lu \text{ min árias}} = \frac{E \cdot A}{\phi_{lu \text{ min ária}} \cdot CU \cdot LLF} \quad \text{Equação 157}$$

$$E = \frac{n_{lu \text{ min árias}} \cdot \phi_{lu \text{ min ária}} \cdot CU \cdot LLF}{A} \quad \text{Equação 158}$$

onde:

$n_{luminárias}$ é o número de luminárias;

$\phi_{luminária}$ é o fluxo luminoso de uma lâmpada (lumens).

E é a iluminância média (lux);

CU é o coeficiente de utilização;

LLF é o fator de perda luminosa;

A é a área do plano de trabalho (m^2).

5.2.1 RELAÇÃO DAS CAVIDADES

A troca de radiação entre o forro e a base de um espaço retangular é função das proporções entre seu comprimento, largura e altura. A relação das cavidades aproxima desse efeito pela combinação dessas proporções em uma única quantidade (valor). No método das cavidades zonais o efeito das proporções do ambiente, a altura da luminária e a altura do plano de trabalho sobre o coeficiente de utilização são respectivamente representadas pelas relações de cavidade do recinto, relação da cavidade do forro e relação da cavidade do piso.

Essas relações são determinadas pela divisão do ambiente em 3 cavidades e substituindo as dimensões em metros (m) ou pés (ft) na equação a seguir:

$$RC = \frac{5 \cdot h(a + b)}{a \cdot b} \quad \text{Equação 159}$$

onde:

a e b são as dimensões do ambiente (largura e profundidade);

RC é a relação de cavidade;

h é (h_{rc} para cavidade de recinto, h_{cc} para cavidade de forro e h_{fc} para cavidade de piso)

Para ambientes irregulares a relação de cavidades deve usar a seguinte equação:

$$RC = \frac{2,5 \cdot (h \cdot \text{perimetro})}{A_{base}}$$

Equação 160

5.2.2 REFLETÂNCIAS EFETIVAS DAS CAVIDADES

A refletância efetiva de uma cavidade retangular (ρ_{ef}) é a razão entre o fluxo refletido para fora com o fluxo que entrou na cavidade por suas aberturas. Se consideramos que as refletâncias são perfeitamente difusas e assumirmos que o fluxo que entra na cavidade também entra perfeitamente difuso, torna-se possível calcular a refletância efetiva da cavidade usando a teoria de transferência de fluxos, sendo:

$$\rho_{ef} = \frac{\rho_b \cdot \rho_p \cdot f \left(2 \cdot \frac{A_b}{A_p} \cdot (1-f) + \rho_b \cdot f^2 + \rho_p \cdot \frac{A_b}{A_p} \cdot (1-f)^2 \right)}{1 - \rho_b \cdot \rho_p \cdot \frac{A_b}{A_p} \cdot (1-f)^2 - \rho_p \left(1 - 2 \cdot \frac{A_b}{A_p} \cdot (1-f) \right)}$$

Equação 161

onde:

A_b e A_p são respectivamente a área da base da cavidade (forro ou piso) e a área das paredes da cavidade (m^2);

ρ_b e ρ_p são respectivamente a refletância da base da cavidade e a refletância das paredes da cavidade;

f é o fator de forma entre a abertura da cavidade e a base da cavidade.

O fator de forma da equação 161 é dado por:

$$\begin{aligned} f = & \frac{2}{\pi \cdot x \cdot y} \ln \left(\frac{(1+x^2) \cdot (1+y^2)}{1+x^2+y^2} \right)^{1/2} \\ & + \frac{2}{\pi \cdot x} \cdot (1+x^2)^{1/2} \cdot \arctan \left(\frac{x}{(1+x^2)^{1/2}} \right) \\ & + \frac{2}{\pi \cdot y} \cdot (1+y^2)^{1/2} \cdot \arctan \left(\frac{y}{(1+y^2)^{1/2}} \right) \\ & - \frac{2}{\pi \cdot x} \cdot \arctan y - \frac{2}{\pi \cdot y} \cdot \arctan x \end{aligned}$$

Equação 162

onde x e y tem os seguintes valores:

$$x = \frac{a}{b}$$

Equação 163

CAPÍTULO V

$$y = \frac{a}{b} \quad \text{Equação 164}$$

onde a é o comprimento da cavidade e b é a profundidade da cavidade.

Os arcos tangentes são expressos em radianos, mas se assumirmos que as cavidades são em metros, então:

$$x = y = \frac{10}{RC} \quad \text{Equação 165}$$

onde RC é a razão de cavidade.

A refletância efetiva de uma cavidade de forro inclinado pode ser determinada pela equação a seguir:

$$\rho_{\text{forro}} = \frac{\rho}{\frac{A_s}{A_a} - \rho \left(\frac{A_s}{A_a} - 1 \right)} \quad \text{Equação 166}$$

onde:

A_s é a área da superfície do forro (m^2);

A_a é a área do forro aberta (m^2);

ρ é a refletância da superfície do forro.

A equação da ρ_{forro} pode ser usada para forros hemisféricos do tipo domos, onde todas as partes do forro ficam expostas umas às outras. Se a refletância do forro não é a mesma para todas as partes, uma média das áreas pode ser tirada. Assim, se um forro tem n partes, então:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{Equação 167}$$

onde:

ρ_i é a refletância de todos os pedaços de forro;

A_i é a área de todos os pedaços de forro (m^2).

5.2.3 COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO DAS LUMINÁRIAS

A absorção da luz na luminária é levada em consideração no coeficiente de utilização (CU) das luminárias. O manual da IES (IESNA,2000) fornece as tabelas

com os coeficientes de utilização para luminárias típicas, calculados pelo método das cavidades zonais.

Os coeficientes fornecidos nessas tabelas são para refletâncias de cavidade de piso igual a 20%. No entanto, qualquer CU pode ser corrigido para diferentes ρ_{cp} pela aplicação de multiplicadores apropriados.

Essas tabelas não são para serem usadas diretamente, e sim como base para adaptar a luminária requerida. Um conceito importante desses coeficientes é que para luminária com performances similares de distribuição, mas de eficiência diferente pode ser analisada pelo uso do CU fornecido com uma simples correção de um multiplicador.

Considerando que o fator de perda luminosa inclui as perdas devido a manutenção e desgastes do tempo, a refletância das paredes ρ_p podem ser adotadas com o valor previsto ou requerido. Na refletância das paredes é considerada a média das refletâncias de toda a envoltória interna ao ambiente. Os valores de CU na tabela podem ser interpolados quando necessário.

5.2.4 CALCULO DA EXITÂNCIA MÉDIA PELO MÉTODO DOS LUMENS

Os coeficientes de exitância são similares aos coeficientes de utilização, exceto pelo fato de serem aplicados às superfícies das cavidades do ambiente. Eles podem ser utilizados dentro de uma variação dos métodos dos lumens, substituindo o CU na formula. O resultado obtido pode ser tanto a exitância média da parede ou a exitância média da cavidade do forro, no lugar da iluminância média no plano de trabalho.

$$E_{med} = \phi_{total} \cdot \frac{CE_{forro}}{A_{piso}} \quad \text{Equação 168}$$

onde:

E_{med} é a exitância média inicial da parede ou a exitância média inicial da cavidade de forro (lux);

ϕ_{total} é o fluxo total das lâmpadas (lumens);

CE_{Forro} é o coeficiente da exitância do forro ou o coeficiente da exitância da cavidade de forro;

A_{piso} é a área do piso (m^2).

CAPÍTULO V

O fator de perda luminosa é introduzido nessas duas equações da mesma forma que na equação para a obtenção da iluminância média.

Se a parede apresentar várias refletâncias diferentes da média uma correção pode ser aplicada para determinar a exitância aproximada de cada parte da parede.

$$E = E_{med} \cdot \frac{\rho_{\text{área}}}{\rho_{med}} \quad \text{Equação 169}$$

onde:

E é a exitância;

E_{med} é a exitância média da parede;

$\rho_{\text{área}}$ é a refletância da área;

ρ_{med} é a refletância média da parede.

5.2.5 COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO PELO MÉTODO DOS LUMENS

As tabelas de coeficiente de utilização CU, os coeficientes de exitância das paredes e o coeficiente de exitância da cavidade do forro podem ser preparados. É desejável ter as tabelas padrões, como as fornecidas no manual da IES, para esses valores, prevenindo assim enganos e facilitando a comparação direta entre luminárias diferentes.

Esses coeficientes são derivados a partir de conceitos tidos como “princípios básicos”. Existem 5 conceitos básicos utilizados para gerar os coeficientes das cavidades zonais:

1. As superfícies do ambiente são lambertianas;
2. O fluxo incidente sobre as superfícies é uniformemente distribuído;
3. As luminárias são uniformemente distribuídas no ambiente;
4. O ambiente está vazio;
5. As superfícies do ambiente são espectralmente neutras.

É recomendado que os CUs tenham duas casas decimais e que os coeficientes de exitância das paredes e das cavidades de forro tenham 3 casas decimais. Essas recomendações são para ajustar melhor aos programas computacionais que fazem pequenas variações entre os coeficientes considerando essas casas decimais.

O manual da IES apresenta um roteiro de cálculo com 8 itens para aplicação do método dos lumens por computação e neste roteiro constam as equações para obtenção dos coeficientes de utilização tabelados, correlacionando esses com as diversas possibilidades de relações de cavidade de recinto RCR calculada.

5.3 MÉTODO DA OSRAM

O método da OSRAM é destinado ao cálculo de iluminação artificial para determinação do número de luminárias necessário para iluminar determinado ambiente, com base no tipo de luminária e suas características fotométricas e nas características do ambiente a ser iluminado. As equações desse método, são baseadas no método dos lumens e no método das cavidades zonais.

Para determinar o número de luminárias necessárias deve ser calculado o índice de recinto (Kd) e o Fator de Utilização (FU).

O índice de recinto é a relação entre as dimensões do local a ser iluminado e é dado pelas equações 170 e 171:

- Para iluminação direta

$$kd = \frac{a \cdot b}{h(a + b)} \quad \text{Equação 170}$$

- Para iluminação indireta

$$kd = \frac{3 \cdot a \cdot b}{2 \cdot h' (a + b)} \quad \text{Equação 171}$$

onde:

Kd é o índice do recinto;

a,b são as dimensões do ambiente;

h é o pé direito útil (do plano da luminária até o plano de trabalho);

h' distância do forro ao plano de trabalho.

O Fator de Utilização (FU) pode ser calculado pela equação 172, mas normalmente é fornecido em tabelas pelos fabricantes de luminárias. Essa equação relaciona o rendimento da luminária com o rendimento do recinto. O rendimento do recinto (η_R) também é normalmente dado em tabelas pelos fabricantes e

CAPÍTULO V

correlaciona as refletâncias de parede, piso e forro com a curva de distribuição luminosa da luminária e o índice de recinto (Kd). O rendimento da luminária (η_L) é a quantidade de fluxo efetivo que sai da luminária sob determinadas condições e esse valor também é dado pelo fabricante.

$$FU = \eta_L \cdot \eta_R \quad \text{Equação 172}$$

Com o Kd e o Fu calculados é possível encontrar o número de luminárias necessárias pela equação 173:

$$n = \frac{E_m \cdot A \cdot Fd}{\Phi \cdot FU \cdot BF} \quad \text{Equação 173}$$

n é quantidade de lâmpadas;

Φ é o fluxo luminoso de uma lâmpada (lumens);

E_m é a iluminância média (lux);

A é a área do ambiente (axb) (m^2);

Fd é o fator de depreciação (1,25 se a manutenção for boa e 1,67 se a manutenção for crítica);

BF é o fator de fluxo luminoso do reator (considerar apenas quando utilizado com lâmpadas de descarga)

5.4 DIMENSIONAMENTO DE DUTO DE LUZ

Partindo do método dos lumens para dimensionar um sistema de iluminação é necessário ter o fluxo luminoso emitido pela luminária, o coeficiente de utilização referente a essa luminária, o fator de perda luminosa ao longo do tempo e a área do plano de trabalho a ser iluminado. Assim sendo, fazendo as adaptações cabíveis, para dimensionar um sistema de iluminação com dutos de luz é necessário, primeiramente, obter o fluxo luminoso emitido por esse duto. Para tanto, assumimos que o plano da saída do duto no ambiente é a luminária em questão e seu fluxo pode ser calculado multiplicando o EDL (eficiência em dutos de luz) pela área da seção de saída do duto no ambiente, conforme a equação 175.

O EDL é dado pela equação 174, a qual foi baseada no princípio do ângulo sólido projetado ou conceito do hemisfério unitário, ou seja, essa equação é resultado da relação entre a disponibilidade de luz no plano horizontal da entrada do duto com a obtida no ponto central da seção de saída do duto, considerando o

plano horizontal da entrada desobstruído. Desse modo, a obtenção do fluxo luminoso do duto pela equação 175 faz uma simplificação ao considerar que a iluminância no ponto central é representativa da área toda da saída, ou seja, o EDL assume esse erro e considera o plano iluminado da saída como sendo um plano de iluminância uniforme em toda a área.

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

Equação 174

$$\varphi_{duto} = (EDL/100) \cdot E_{ext} \cdot b^2$$

Equação 175

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 (m);

h é o comprimento do duto (m);

ρ é a refletância interna ao duto;

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

O próximo passo seguindo os métodos explorados teoricamente seria a inclusão das características do recinto por meio do cálculo do coeficiente do recinto (K ou RCR) conforme a equação 176. Assim, de posse do coeficiente do recinto RCR seria possível identificar o coeficiente de utilização (CU) em uma tabela para cada duto, a qual levaria em consideração as refletâncias internas das paredes, piso e forro dos ambientes padrões ensaiados.

$$RCR = \frac{5h(a+b)}{a \cdot b}$$

Equação 176

onde:

RCR é o coeficiente do recinto;

a, b são as dimensões do ambiente (m);

h é o pé direito útil (da saída no forro até o plano de trabalho) (m).

Durante o desenvolvimento do modelo foi testado utilizar o resultado do RCR tanto para encontrar o CU nas tabelas de coeficiente de utilização gerados a partir

CAPÍTULO V

dos dados simulados no software *photopia*¹¹ (ver capítulo 4), considerando o duto como uma luminária artificial, como para encontrar o CU na tabela para zenitais naturais, fornecida pela IES, considerando o duto como uma luminária natural. No entanto, para ambos os testes os resultados foram insatisfatórios em comparação com os resultados obtidos nos ensaios. Com isso, foi feita uma análise dos dados medidos nos ensaios sob condição de céu real com o ambiente de referência (ver capítulo 3) e foi adotado o Coeficiente de Distribuição (CD) como o coeficiente empírico que substitui o CU. O CD apresenta a limitação de ser um coeficiente que satisfaz apenas a ambientes similares ao ambiente de referência (sala de aula padrão FDE). No entanto, por meio do mesmo procedimento de cálculo utilizado para obter o CD para esse ambiente é possível obter a tabela de coeficientes de distribuição para outros ambientes como ocorre com os coeficientes de utilização fornecidos pelos fabricantes de luminárias artificiais.

Por fim, o modelo para dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz (MDDL) pode ser expresso pela equação 177, ou seja, o número de dutos (luminárias) necessários para iluminar determinado ambiente com o nível de iluminância requerido é dado por meio da equação 177:

$$n = \frac{E \cdot A}{\Phi_{duto} \cdot CD \cdot Fd} \quad \text{Equação 177}$$

onde:

n é o número de dutos;

E é a iluminância requerida (lux);

A é a área do ambiente a ser iluminado (m²);

Fd é o fator de depreciação (0,7 se a manutenção for boa, 0,6 para áreas industriais e 0,5 se a manutenção for crítica)¹²;

Φ_{duto} é o fluxo luminoso do duto (lumens);

CD é o coeficiente de distribuição;

¹¹ <http://www.ltiopics.com/Photopia/overview.html>

¹² Os valores sugeridos para o fator de depreciação foram obtidos no manual da IES (IESNA, 2000).

5.5 VALIDAÇÃO DO MDDL

O processo de validação do MDDL interage com o desenvolvimento do modelo, ocorrendo paralelamente, pois durante a validação foram utilizados os coeficientes de utilização, tanto para luminárias artificiais, calculados a partir do software *Photopia*¹³, como para zenitais naturais, fornecido pela IES, e foi observada a ineficiência desses para serem aplicados com dutos de luz.

Mesmo considerando os dutos de luz com distribuição semelhante a distribuição de luminárias artificiais, o funcionamento, desses sistemas que tem fonte luminosa natural, difere das fontes artificiais. Mas diferente do que poderíamos supor, também não pode ser tratado como sendo uma zenital comum.

A seguir está apresentado o passo a passo da validação, ou seja, da aplicação do modelo (MDDL) para comparar os resultados calculados com os medidos nos ensaios. Esta inicia-se com a utilização do CU calculado com base nos dados simulados pelo software *Photopia*, depois com o CU obtido do manual da IES e por fim com o CD calculado a partir dos dados coletados nos ensaios sob condição de céu real, chegando ao $CD=3$ como valor que melhor ajusta para substituir o CU com os dutos em estudo para esse ambiente de referência.

1º.Passo: Definir um ambiente de referência para aplicar o modelo.

O ambiente escolhido foi a sala de aula padrão FDE para proporcionar comparação dos resultados calculados pelo MDDL com os resultados medidos em condições de céu real.

2º.Passo: Calcular o RCR para o ambiente de referência escolhido.

3º.Passo: Calcular a área do ambiente de referência escolhido.

4º.Passo: Escolher o FD de acordo com o ambiente de referência escolhido.

O resumo dos 4 primeiros passos está apresentado na tabela 26.

¹³ <http://www.ltioptics.com/Photopia/overview.html>

CAPÍTULO V

Tabela 26. Dimensões do ambiente de referência, RCR (coeficiente de recinto), FD (fator de depreciação) e área do ambiente de referência.

	a	b
sala de aula padrao FDE	7.2	7.2
	h	
altura do forro ao plano de trabalho	2.36	
RCR	3.277778	
FD	0.7	
A	51.84	

5°.Passo: Definir a Iluminância requerida no plano de trabalho.

Esse seria o quinto passo na aplicação do modelo, mas na validação o objetivo é encontrar a iluminância obtida no plano de trabalho tendo um único duto no centro da sala. Ou seja, não houve o oitavo passo que seria encontrar o número de dutos, visto que este já estava previamente definido, como sendo 1 duto.

6°.Passo: Calcular o fluxo luminoso emitido pelo duto.

O fluxo luminoso emitido pelo duto é calculado com base na porcentagem de iluminância que chega ao ponto central da saída do duto com relação a iluminância disponível no plano horizontal desobstruído da entrada do duto. Na validação foi utilizada a iluminância de 20000lx, considerando 70% do tempo para a cidade de São Paulo¹⁴ e também foi utilizada a iluminância variável encontrada nas medições durante o período de ensaio sob condição de céu real (ver tabelas .27 e 28).

Tabela 27. Fluxo luminoso dos dutos calculado com iluminância externa de 20000lx.

Φ_{duto}						
$E_{ext} = 20000 \text{ lx}$	seção quadrada (lados em m)					
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	54	368	650	1026	2048	3450
1.5	36	272	512.5	828	1728	3000
2	24	216	412.5	684	1472	2600
3	14	144	275	486	1088	2050
4	8	96	200	360	864	1650
5	6	72	150	270	704	1350

¹⁴ Dado obtido pelo software climáticus. Disponível em:
<http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>.

Tabela 28. Fluxo luminoso dos dutos calculado com iluminância externa variável segundo o ensaio.

Φ_{duto}						
E_{ext} = variavel	seção quadrada (lados em m)					
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	93	543	397	826	3062	4433
1.5	62	423	313	671	2264	3570
2	41	372	250	557	1936	2886
3	24	256	166	365	1360	2214
4	14	173	120	263	1020	1724
5	11	130	90	193	820	1478

7°. Passo: Com base no RCR calculado (≈ 3) encontrar os CU ou aplicar o CD.

8°. Passo: Encontrar o número de dutos

O processo de cálculo do fluxo luminoso parte do EDL (eficiência do duto de luz), que pode ser calculado pelo MPELD ou obtido como resultado da simulação no software *Photopia*. O processo apresentado nas tabelas 29 e 30, partiram do EDL calculado pelo MPELD. Assim, por meio das porcentagens de luz que atingiram o centro da saída do duto, foi calculado o fluxo luminoso, considerando céu real variável (dados coletados no ensaio com maquete sob céu real) ou céu hipotético de 20000lx.

Para ficar mais claro, tomamos como exemplo a primeira linha da tabela 29, na qual temos o EDL calculado pelo MPELD igual a 27%, ou seja, 27% da disponibilidade de luz no plano horizontal desobstruído da entrada do duto atingiram o centro da seção de saída. Considerando um céu de 20000lx, os 27% representam 5400lx. Utilizando esses 5400lx obtemos o fluxo luminoso calculado de 54lumens emitido pelo duto de 0,1x0,1x1(m).

CAPÍTULO V

Tabela 29. Processo de cálculo do fluxo luminoso dos dutos calculado com $E_{\text{ext}} = 20000 \text{ lx}$.

Comprimento (m)	b (m)	EDL	$E_{\text{ext}} \cdot (\text{EDL}/100)$	$\phi_{\text{duto}} = (\text{EDL}/100) \cdot E_{\text{ext}} \cdot b^2$
		$\rho = 0,86$	$E_{\text{ext}} = 20000$	
		MPELD (%)	(lux)	
1	0.1	27	5400	54
1.5	0.1	18	3600	36
2	0.1	12	2400	24
3	0.1	7	1400	14
4	0.1	4	800	8
5	0.1	3	600	6
1	0.2	46	9200	368
1.5	0.2	34	6800	272
2	0.2	27	5400	216
3	0.2	18	3600	144
4	0.2	12	2400	96
5	0.2	9	1800	72
1	0.25	52	10400	650
1.5	0.25	41	8200	512.5
2	0.25	33	6600	412.5
3	0.25	22	4400	275
4	0.25	16	3200	200
5	0.25	12	2400	150
1	0.3	57	11400	1026
1.5	0.3	46	9200	828
2	0.3	38	7600	684
3	0.3	27	5400	486
4	0.3	20	4000	360
5	0.3	15	3000	270
1	0.4	64	12800	2048
1.5	0.4	54	10800	1728
2	0.4	46	9200	1472
3	0.4	34	6800	1088
4	0.4	27	5400	864
5	0.4	22	4400	704
1	0.5	69	13800	3450
1.5	0.5	60	12000	3000
2	0.5	52	10400	2600
3	0.5	41	8200	2050
4	0.5	33	6600	1650
5	0.5	27	5400	1350

Tabela 30. Processo de cálculo do fluxo luminoso dos dutos calculado com E_{ext} = variável.

Comprimento (m)	b (m)	EDL	$E_{ext} \cdot (EDL/100)$	$\phi_{duto} = (EDL/100) \cdot E_{ext} \cdot b^2$	$E_{ext} (lux)$
		$\rho=0,86$	$E_{ext} = real$		ensaio
		MPELD (%)	(lux)	(lumens)	08/11/2011
1	0.1	27	9288	93	34400
1.5	0.1	18	6156	62	34200
2	0.1	12	4080	41	34000
3	0.1	7	2352	24	33600
4	0.1	4	1356	14	33900
5	0.1	3	1071	11	35700
1	0.2	46	13570	543	29500
1.5	0.2	34	10574	423	31100
2	0.2	27	9288	372	34400
3	0.2	18	6408	256	35600
4	0.2	12	4320	173	36000
5	0.2	9	3258	130	36200
1	0.25	52	6344	397	12200
1.5	0.25	41	5002	313	12200
2	0.25	33	3993	250	12100
3	0.25	22	2662	166	12100
4	0.25	16	1920	120	12000
5	0.25	12	1440	90	12000
1	0.3	57	9177	826	16100
1.5	0.3	46	7452	671	16200
2	0.3	38	6194	557	16300
3	0.3	27	4050	365	15000
4	0.3	20	2920	263	14600
5	0.3	15	2145	193	14300
1	0.4	64	19136	3062	29900
1.5	0.4	54	14148	2264	26200
2	0.4	46	12098	1936	26300
3	0.4	34	8500	1360	25000
4	0.4	27	6372	1020	23600
5	0.4	22	5126	820	23300
1	0.5	69	17733	4433	25700
1.5	0.5	60	14280	3570	23800
2	0.5	52	11544	2886	22200
3	0.5	41	8856	2214	21600
4	0.5	33	6897	1724	20900
5	0.5	27	5913	1478	21900

CAPÍTULO V

Comparando os resultados de iluminância (E), obtidos com os CU artificial (tabela 31) e com o CU natural (tabela 34), com os resultados medidos no ensaio do dia 08/08/11 (ver tabelas 32, 33, 35, 36 e 40) fica claro que existe uma disparidade muito grande entre os valores obtidos, sendo da ordem de **3028.07 lx** e **3891.07 lx** (CU artificial, tabelas 32 e 33) e **38.67 lx** e **49.69 lx** (CU natural, tabelas 33 e 34) para a iluminância calculada contra 156lx para a iluminância medida no duto de luz com dimensão 0,5x0,5x1m.

Tabela 31. Coeficiente de Utilização – calculado a partir da simulação no *Photopia*.

CU (artificial)						
RC 80 RW70 RF20	seção quadrada (lados em m)					
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	25	43	49	54	60	65
1.5	16	33	39	44	51	56
2	11	26	31	36	43	49
3	6	17	21	26	33	39
4	4	12	16	19	26	31
5	3	9	12	15	21	26

Tabela 32. Iluminância calculada com CU artificial e $E_{ext}=20000lx$.

$E_{ext} = 20000 lx$	E (LUX)					
$E=n \cdot \phi_{duto} \cdot CU \cdot FD/A$	seção quadrada (lados em m)					
n=1; CU= artificial	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
Comprimento (m)						
1	18.23	213.67	430.07	748.13	1659.26	3028.07
1.5	7.78	121.20	269.89	491.94	1190.00	2268.52
2	3.56	75.83	172.67	332.50	854.69	1720.29
3	1.13	33.06	77.98	170.63	484.81	1079.57
4	0.43	15.56	43.21	92.36	303.33	690.68
5	0.24	8.75	24.31	54.69	199.63	473.96

Tabela 33. Iluminância calculada com CU artificial e E_{ext} =variável.

E_{ext} = variavel	E (LUX)					
$E=n \cdot \phi_{duto} \cdot CU \cdot FD/A$	seção quadrada (lados em m)					
n=1; CU= artificial	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
Comprimento (m)						
1	31.35	315.17	262.34	602.24	2480.59	3891.07
1.5	13.30	188.47	164.63	398.48	1558.90	2699.54
2	6.06	130.43	104.47	270.99	1123.92	1909.53
3	1.91	58.84	47.18	127.97	606.02	1165.94
4	0.73	28.00	25.93	67.42	357.93	721.76
5	0.43	15.84	14.58	39.10	232.57	518.98

Tabela 34. Coeficiente de Utilização –tabela fornecida no manual da IES para zenital natural.

CU (natural)						
RC 80 RW50 RF20	seção quadrada (lados em m)					
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
1.5	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
2	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
3	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
4	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
5	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83

Tabela 35. Iluminância calculada com CU natural e E_{ext} =20000lx.

E_{ext} = 20000lx	E (LUX)					
$E=n \cdot \phi_{duto} \cdot CU \cdot FD/A$	seção quadrada (lados em m)					
n=1; CU= natural	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
Comprimento (m)						
1	0.61	4.12	7.28	11.50	22.95	38.67
1.5	0.40	3.05	5.74	9.28	19.37	33.62
2	0.27	2.42	4.62	7.67	16.50	29.14
3	0.16	1.61	3.08	5.45	12.19	22.98
4	0.09	1.08	2.24	4.03	9.68	18.49
5	0.07	0.81	1.68	3.03	7.89	15.13

CAPÍTULO V

Tabela 36. Iluminância calculada com CU natural e E_{ext} =variável.

E_{ext} = variável	E (LUX)					
$E = n \cdot \phi_{duto} \cdot CU \cdot FD / A$	seção quadrada (lados em m)					
n=1; CU= natural	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
Comprimento (m)						
1	1.04	6.08	4.44	9.26	34.31	49.69
1.5	0.69	4.74	3.50	7.52	25.37	40.01
2	0.46	4.16	2.80	6.25	21.69	32.35
3	0.26	2.87	1.86	4.09	15.24	24.81
4	0.15	1.94	1.34	2.95	11.43	19.32
5	0.12	1.46	1.01	2.16	9.19	16.57

Os coeficientes de distribuição calculados com os dados obtidos, no ponto P5 do ensaio com maquete sob céu real (08/08/11), estão apresentados na tabela 37.

Tabela 37. Coeficiente de Distribuição – calculado a partir dos dados do ensaio sob céu real.

CD (coeficiente de distribuição) (P5 - ensaio 08/08/11)						
$CD = E \cdot A / n \cdot \phi_{duto} \cdot FD$	seção quadrada (lados em m)					
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	5	5	7	5	3	3
1.5	11	4	8	6	2	2
2	11	4	8	5	4	2
3	16	3	7	4	2	2
4	33	3	5	4	2	2
5	69	3	6	4	2	3

Pela análise dos CDs apresentados na tabela 37, foi considerado o valor $CD=3$ o que melhor se ajusta ao ambiente estudado. Desse modo, ao substituir o CU pelo $CD=3$ os valores de iluminância calculados se aproximam dos medidos em todos os dutos, mas isso fica mais evidente nos dutos de maior seção e menor comprimento (ver tabelas 38 e 39).

Tabela 38. Iluminância calculada com $CD=3$ e $E_{ext}=variável$.

$E_{ext} = \text{variável}$	E (LUX)					
$E = n \cdot \phi_{duto} \cdot CD \cdot FD/A$	seção quadrada (lados em m)					
$n=1$ e $CD=3$	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
Comprimento (m)						
1	3.76	21.99	16.06	33.46	124.03	179.59
1.5	2.49	17.13	12.66	27.17	91.70	144.62
2	1.65	15.05	10.11	22.58	78.41	116.91
3	0.95	10.38	6.74	14.77	55.09	89.69
4	0.55	7.00	4.86	10.65	41.30	69.85
5	0.43	5.28	3.65	7.82	33.22	59.88

Tabela 39. Iluminância medida no ensaio 08/08/11 (P5).

E (LUX) - medido (P5)						
ensaio (08/08/11)	seção quadrada (lados em m)					
$n=1$						
Comprimento (m)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
1	6	33	40	61	124	156
1.5	9	22	32	52	69	117
2	6	20	26	34	113	95
3	5	11	15	20	42	71
4	6	8	8	15	32	57
5	10	6	7	11	27	52

Para a comparação entre os resultados calculados com o MDDL e os obtidos no estudo experimental (ver capítulo 3) foi adotado o $CD = 3$ e $E_{ext} = 20000lx$. Partindo desses resultados foram feitas correlações entre os dados calculados (MDDL) e medidos (P5 – ensaio de 08/08/11). Foi arbitrado o $CD=3$ para esta comparação após as seguintes verificações:

- Os resultados calculados de CD com base no ensaio do dia 08/08/11 apresentaram valores entre 2, 3 e 4 na maior parte dos dutos.
- Utilizando $CD=3$ no cálculo do MDDL, o número de dutos necessários para obter a iluminância de 257lx (valor este obtido no ensaio do dia 08/08/11 com 3 dutos de 0,5x0,5m de seção e 3m de comprimento,

CAPÍTULO V

alinhados sobre os pontos P4, P5 e P6) foi de 2,87. Com esse resultado verificou que o desempenho do modelo MDDL com a utilização do CD=3 está até o presente momento satisfatório.

As correlações apresentaram R^2 superior a 0,95, exceto para os dutos de seção quadrada 0,1m, que a correlação foi muito baixa, devido as múltiplas reflexões que levam a valores de iluminância muito baixos nesses dutos. E os dutos de seção 0,4m apresentaram R^2 igual a 0,76, pois apresentou um ponto da medição fora do padrão dos demais. Nos gráficos das ilustrações de 85 a 90 estão apresentadas as correlações entre os resultados medidos e calculados com CD=3. Nesses fica clara a correlação existente. Portanto, para o duto estudado e ensaiado o modelo proposto corresponde satisfatoriamente.

Ilustração 85. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,1.

Ilustração 86. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,2.

Ilustração 87. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,25.

Ilustração 88. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,3.

Ilustração 89. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,4.

CAPÍTULO V

Ilustração 90. Correlação entre os valores de Iluminância (E) medidos (ensaio de 08/08/11) e calculados (MDDL) – dutos de seção quadrada de lado 0,5.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 5, *Proposição de Modelo*, apresenta uma proposta de modelo matemático para dimensionar dutos de luz (MDDL) baseado na exploração teórica dos métodos tradicionais em iluminação *Método dos Lumens* e *Método das Cavidades Zonais*. O MDDL torna-se semi-empírico na medida que foi necessária a inclusão do Coeficiente de Distribuição (CD) calculado a partir de dados coletados nos ensaios para substituir o Coeficiente de Utilização (CU).

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6 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, que parte da primeira, é conduzi-la a longas distâncias. A terceira, como dimensionar os sistemas condutores de luz natural do tipo duto de luz, para atingir os níveis de iluminância requerido no plano de trabalho. Assim os sistemas condutores de luz natural do tipo dutos de luz possibilitam levar a luz natural aos ambientes de difícil acesso, conduzindo-a por longas distancias, e o modelo de dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz (MDDL) permite dimensionar sistemas de iluminação que utilizem dutos de luz com seção quadrada e espelhados internamente.

A pesquisa sobre dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz foi motivada pelos resultados da pesquisa realizada durante o mestrado intitulado *Condução da luz natural por sistemas não convencionais* (LUZ, 2009), a qual, teve como foco a busca por sistemas capazes de conduzir a luz para promover a iluminação de subsolos ou locais muito distantes das aberturas, e verificar a eficiência de dutos espelhados com seção quadrada, para a condução da luz natural. Como resultado desta, foi proposto o modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPELD), que fornece a eficiência luminosa (EDL) dos dutos estudados. No entanto, esse modelo não estima a iluminância média obtida no plano de trabalho e não determina o número de dutos necessário para iluminar determinado ambiente.

A fim de preencher essa lacuna, a presente pesquisa, foi iniciada pela busca por modelos matemáticos e métodos preditivos da eficiência luminosa que permitissem avaliar a distribuição luminosa a partir de dutos de luz. E com isso, tornar possível o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz espelhados de seção quadrada.

Por meio da revisão bibliográfica foram levantados os modelos preditivos da eficiência e distribuição luminosa a partir de dutos de luz, apresentados no capítulo

CAPÍTULO VI

2, identificando que esses são baseados em exploração teórica e levantamentos empíricos, os quais, são utilizados como verificadores dos modelos propostos ou para ajustá-los por meio das constantes obtidas em análises paramétricas dos dados coletados.

Os capítulos 3, *Ensaio*, e 4, *Simulação Computacional*, construíram a base primária da pesquisa (levantamento empírico), a partir da qual foram supridas as lacunas e necessidades levantadas na exploração das referências bibliográficas pesquisadas (base secundária da pesquisa).

Considerando como objeto da pesquisa a difusão da luz a partir da saída de dutos de luz (difusor) com seção quadrada, espelhados internamente, e tendo como objetivo a proposição de um modelo matemático para o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, partindo da hipótese que o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, pode ser obtido por meio de modelagem matemática similar a aplicada no dimensionamento de sistemas artificiais e naturais de iluminação, foram analisados os métodos e procedimentos levantados no capítulo 2, os dados coletados e calculados a partir do levantamento empírico dos capítulos 3 e 4 e por fim, os métodos dos lumens e das cavidades zonais, apresentados no capítulo 5, para embasar a proposta do modelo para dimensionamento de sistemas de iluminação natural com duto de luz (MDDL).

Por meio da base empírica levantada no estudo experimental foi possível verificar e ajustar o modelo para dimensionamento de sistemas de iluminação natural com duto de luz (MDDL), proposto no capítulo 5.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as considerações finais, sintetizando o desenvolvimento da pesquisa: motivação inicial desta, revisão bibliográfica, bases teóricas, procedimentos de ensaio desenvolvidos e aplicados, bases empíricas, desenvolvimento e verificação do modelo proposto.

Ainda no capítulo 6 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.

Conforme pode ser observado, a comprovação da hipótese, de que o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, pode ser

obtido por meio de modelagem matemática similar a aplicada no dimensionamento de sistemas artificiais e naturais de iluminação, constrói-se ao longo dos capítulos apresentados.

6.1 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 e AMORIM, 2006) e modelo preditivo da eficiência luminosa (LUZ, 2009). A maior parte das pesquisas nacionais levantadas aborda os mecanismos de controle óptico objetivando melhorias na eficiência dos sistemas convencionais. Não foram encontradas referência a pesquisas nacionais que abordem o dimensionamento de dutos de luz por meio de modelos preditivos da eficiência e distribuição luminosa, fornecendo a iluminância média obtida no plano de trabalho e o número de dutos requeridos para atender as necessidades de iluminação.

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*¹⁵. 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-Marwaei e Carter (2006) e Oakley 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 Zastrow e Wittwer (1986) apresentado por Swift e Smith (1995), Edmonds e Moore (1995), Zhang e Muneer (2000 e 2002), Jenkins e Muneer (2003), método da CIE 173:2006 (2006), Dutton e Shao (2007) e Kocifaj (2009).

Outras referências contribuíram para a formação do aparato necessário às considerações, análises e discussões desenvolvidas sobre o dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz: Whitehead et al., (1984), Nutter et al., (1988), Saxe (1989), Edmonds (1995), Shao et al., (1998), Molteni et al., (2000), IEA (2000), Miguët e Groleau (2001), Scartezzini e Courret (2002), Carter (2002),

¹⁵ Disponível em: www.bartenbach.com, acessado em 30/07/2014.

CAPÍTULO VI

Earp et al., (2004), Dobrre e Achard (2005), Silva et al., (2005), Rosemann et al., (2005), Rosa (2006), CIE (2006), Mohelnilkova (2009), Li et al., (2010) e Baroncini et al., (2010).

Neste contexto a presente pesquisa se insere entre os trabalhos que propõem modelos preditivos com base em exploração teórica e levantamentos empíricos. Apresenta uma coletânea de modelos e métodos matemáticos preditivos em conjunto com a análise dos métodos dos lumens e cavidades zonais, utilizados para dimensionamento de sistemas de iluminação natural e artificial. E considera a eficiência do duto de luz (EDL), ensaiado sob condições reais de exposição em função do comprimento e da área de seção de entrada da luz, para propor um modelo de dimensionamento de luz (MDDL) que parte do EDL, ensaiado (ensaio fotométrico), simulado (software *Photopia*) ou calculado pelo modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPELD), para dimensionar sistemas de iluminação natural com dutos.

6.2 APLICAÇÃO DOS RESULTADOS

6.2.1 USOS PRÁTICOS

O primeiro uso prático dos resultados obtidos diz respeito ao procedimento desenvolvido e testado para levantamentos empíricos com dutos de luz, em especial as adaptações ao procedimento recomendado pela CIE 173:2006, ou seja, o ensaio fotométrico com a esfera integradora de pequenas dimensões e com os dutos em escala 1:10.

O segundo uso prático se refere ao roteiro de simulação no software *Photopia*, para dutos de luz, apresentado no capítulo 4. Esse roteiro visa facilitar e esclarecer lacunas no uso do software *Photopia* para simulações com dutos de luz, em especial com dutos de seção não circular.

O terceiro uso prático se refere ao tratamento dos dados obtidos no estudo experimental e nas simulações, dando origem ao coeficiente empírico CD (coeficiente de distribuição), para ajuste do modelo proposto. O procedimento utilizado na obtenção do CD pode ser utilizado para produzir tabelas de CD para outros ambientes e geometrias de dutos.

O quarto e último uso prático refere-se ao modelo para dimensionamento de sistema de iluminação natural com dutos de luz (MDDL), que permite dimensionar

dutos de luz a partir da iluminância desejada no plano de trabalho, fornecendo o número de dutos necessários ou verificar a eficiência desses no processo de projeto.

Com esses quatro usos práticos os arquitetos podem: utilizar os procedimentos desenvolvidos e apresentados para estudar dutos de luz iguais ou similares aos estudados nessa pesquisa; simular dutos de luz, no software *Photopia*, pelo procedimento descrito; realizar ensaios para obtenção de tabelas de CD para diversos ambientes e dimensionar sistemas de iluminação com dutos de luz, para complementar ou iluminar salas de aula, com dimensões e refletâncias, similares as salas no padrão FDE.

6.2.2 USOS TEÓRICOS

O primeiro uso teórico diz respeito à revisão bibliográfica, a qual engloba o levantamento dos modelos e métodos preditivos da eficiência e distribuição luminosa a partir de dutos de luz, apresentada no capítulo 2. Esse capítulo fornece a 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 3 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 de dimensionamento desenvolvido e apresentado no capítulo 5. Por meio dos conceitos e princípios físicos dos métodos dos lumens e cavidades zonais, associados a recursos geométricos e analíticos, foi possível chegar à equação 177 (página 206), 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 MDDL.

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.

CAPÍTULO VI

6.3 DESDOBRAMENTOS FUTUROS**6.3.1 PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA**

Para a realização da pesquisa foram desenvolvidos dois procedimentos de ensaio, sendo um de campo (com ambiente de referência) e outro em laboratório (fotométrico). Por meio deste foram coletados dados de iluminância e calculados os fluxos luminosos e o EDL para dutos de luz com seis seções e seis comprimentos diferentes, fornecendo uma combinação de 36 dutos ensaiados.

O prosseguimento será realizado em três partes, sendo a primeira, por meio da introdução de outros ambientes de referência, aumentando a amostra de dados para o refinamento do coeficiente de distribuição (CD). O objetivo é gerar as tabelas com CD para diferentes refletâncias e geometrias. A segunda é realizar ensaios com mais que um duto por ambiente. O objetivo é verificar o modelo para uma amostra mais completa e próxima a realidade. A terceira é realizar ensaios associando os dutos com a janela lateral, presente no ambiente de referência adotado (sala de aula FDE). O objetivo é verificar como sistemas de iluminação com dutos de luz podem ser aplicados na complementação da iluminação de salas de aula.

O prosseguimento descrito pode ser incrementado pela 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, condutores e difusores de luz natural; (2) proposição das tabelas com CD (coeficiente de distribuição) para dutos espelhados de seção quadrada; (3) quadro comparativo entre eficiência do captador, do difusor 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.

6.3.2 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 consequente 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, considerando outros ambientes. A quarta e a quinta partem dos conhecimentos desenvolvidos por essa pesquisa, adequando e ampliando esses para estudar outros tipos de sistemas não convencionais.

- 1ª. A base de dados levantada no estudo experimental é restrita, contando com dutos de seis seções e seis comprimentos e um ambiente de referência. A continuação dos ensaios nos mesmos moldes dos realizados com esses modelos, para outras seções, comprimentos e ambientes, contribuirá para a verificação da validade do modelo proposto (MDDL).
- 2ª. Aprofundamentos teóricos poderiam levar ao desenvolvimento de novos modelos ou a adequação do MDDL para incluir outras geometrias de dutos, por exemplo, dutos retangulares e circulares.
- 3ª. 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 várias 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.

CAPÍTULO VI

- 4ª. 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.
- 5ª. 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 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.

6.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente estudo trata do dimensionamento de sistemas de iluminação natural com dutos de luz, por se tratar de uma pesquisa que aplica o método experimental indutivo, esse estudo apresenta diversas limitações que estão relacionadas as várias etapas do processo produtivo exposto.

O sistema condutor escolhido: dutos de seção quadrada espelhados internamente com difusor na saída e sem sistema especial de captação. Esse recorte promove a primeira limitação da tese, pois os demais sistemas condutores do tipo duto de luz, com outras geometrias e seções estão fora do estudo apresentado.

O ambiente de referência escolhido: sala de aula padrão FDE. Esse segundo recorte gera a segunda grande limitação do estudo, na medida que outros ambientes com outras geometrias, dimensões e refletâncias não foram contemplados no estudo apresentado.

O ensaio fotométrico, ensaio em laboratório com a esfera integradora de pequenas dimensões, produz algumas das limitações encontradas no estudo apresentado, como a dimensão dos condutores ensaiados na escala 1:10, não sendo possível o ensaio de dutos com dimensões muito superiores, pois o recorte a laser realizado na esfera para posicionamento do elemento de transição só permite o ensaio de dutos com seção de entrada até 0,5m; a caixa de lâmpadas por produzir 7700lx, na entrada do duto, determina o baixo fluxo luminoso emitido, sendo esse muito inferior ao disponível sob condições reais de exposição, o que limita o comprimento do condutor.

O ensaio com maquete sob céu real apresenta diversas limitações ao presente estudo, como as variabilidades da condição de céu que ocorreram durante os dias de ensaio, havendo poucas horas de céu encoberto, condição essa, mais adequada para a coleta dos dados; dois sensores apresentaram erros, prejudicando a coleta dos dados em dois pontos; o uso de apenas um duto no ponto central do ambiente de referência, considerando a sala de aula padrão da FDE como um ambiente de grandes dimensões, foi insuficiente para a análise satisfatória da distribuição da luz no plano de trabalho.

A simulação com o software *Photopia*, por não considerar a luz que efetivamente entra no duto, produz a limitação de não ser possível utilizar apenas os resultados por ele fornecidos, sendo necessário um editor fotométrico (photometric toolbox) para corrigir os resultados simulados; e o coeficiente de utilização (CU) produzido não corresponde ao duto simulado.

O modelo proposto apresenta a limitação de não atender a qualquer geometria de dutos de luz, não considera curvas e ou cotovelos no percurso do duto e o coeficiente de distribuição (CD) só foi encontrado para o ambiente de referência utilizado no ensaio com maquete, ou seja, para a sala de aula no padrão da FDE.

Para superar as limitações citadas em estudos futuros, recomenda-se a realização de novos ensaios sob condição de céu real, observando a condição de céu encoberto, utilizando mais dutos, com outras combinações de posicionamento e a variação dos ambientes de referência e das geometrias dos condutores. Para o ensaio fotométrico, as limitações podem ser contornadas com a alteração da fonte

CAPÍTULO VI

luminosa por outra mais eficiente e ajustando a escala da esfera e dos dutos para atingir os objetivos desejados.

6.5 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 VII
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7 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.
- BARONCINI, C., BOCCIA, O., CHELLA, F., ZAZZINI P. **Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission.** Solar Energy. 84, 2010. pp, 296-307.
- BUNGE, M. **Teoria e Realidade.** São Paulo: Perspectiva, 1974.
- CALLOW, Joel. **Daylighting Using Tubular Light Guide Systems.** University of Nottingham, 2003. (Tese de Doutorado).

CAPÍTULO VII

- CALLOW, J. and SHAO, L. **Air-Clad optical rod daylighting system.** Lighting Research and Technology 35,1. 2003. p. 31-38.
- 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.
- CARTER, D.J. **The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems.** Lighting Research and Technology 34,1. 2002. p. 39-52.
- CIE – Commission Internationale de L'Eclairage. Technical Report. CIE 173:2006. **Tubular Daylight Guidance Systems.**
- CLIMATICUS_2011 (beta), **Software de conforto ambiental.** Disponível em: <http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>, acessado em 30 jun. 2014.
- COLORPLAST, - **Manual Técnico de Iluminação Zenital.**
- 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).
- DARULA, S., KOCIFAJ, M. e MOHELNIKOVA, J.. **Hollow light guide efficiency and illuminance distribution on the light-tube base under overcast and clear sky conditions.** Optik - International Journal for Light and Electron Optics. v124. 2013. p. 3165-3169.
- DOBRRE, O. & ACHARD, G. **Optical simulation of lighting by hollow light pipes.** Building Simulation. Ninth International IBPSA Conference. Montreal, Canadá. 2005.
- DUTTON, S. e SHAO, L. **Raytracing simulation for predicting light pipe transmittance.** International Journal of Low Carbon Technologie, v02. 2007.
- 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.
- EDMONDS, I., MOORE, G. L, SMITH, G. B. and SWIFT, P. D. **Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels** Lighting Research and Technology, 27(1), 1995. p. 27-35.

- EDMONDS, I. **Transmission of mirror light pipes whit triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section.** Solar Energy. 84, 2010. P. 928-938.
- EGAN, M. J. **Concepts in Architectural Lighting.** New York, McGraw-Hill, 1983.
- 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.
- 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.
- FROTA, A. B. e SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico.** 4 Edição. 2000.
- FROTA, A. B. **Geometria da Insolação.** 1 Edição. 2004.
- 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.
- GIL-MARTÍN, L. M., PEÑA-GARCÍA, A., JIMÉNEZ, A. e HERNÁNDEZ-MONTES, E. **Study of light pipes for the use of sunlight in road tunnels: from a scale model to real tunnels.** Tunnelling and Underground Space Technology, v 41, 2014. p. 82-87.
- HELIOBUS. **Empresa Suíça de dutos de luz e heliostatos.** Disponível em: www.heliobus.com, acessado em 30 jun. 2014.
- HOPKINSON, R.G; PETHERBRIDGE, P.& LONGMORE, J. **Iluminação Natural.** Lisboa, Fundação Kalouste Gulbenkian, 1975.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA – Solar Heating and Cooling Programme – Energy Conservation in Buildings & Community Systems. **Daylight in Buildings – A Source Book on Daylighting Systems and Components.** USA, 2000.

CAPÍTULO VII

- 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 e KUBIE, Jorge. **A design too for predicting the performances of light pipes**. Energy and Buildings, 37, 2005. p. 485-492.
- JENKINS, David; ZHANG, Xiaodong e MUNEER, Tariq. **Formulation of semi-empirical models for predicting the illuminance of light pipes**. Energy Conversion and Management, 46, 2005. p. 2288-2300.
- KOCIFAJ, M., Darula S., Kittler R. **HOLIGILM: hollow light guide interior illumination method – an analytic calculation approach for cylindrical light tubes**. Solar Energy. Vol. 82, 2008. p. 247–259.
- KOCIFAJ, M. **Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing**. Solar Energy. Vol. 83, 2009. p. 186–192.
- KOCIFAJ, M., Kundracik, F., Darula S., Kittler R **Availability of luminous flux below a bended light pipe: design modelling under optimal daylight conditions**. Solar Energy. Vol. 86, 2012. p. 2753–2761.
- LABLUX. **Distribuidor do software photopia no Brasil**. Disponível em: <http://www.lablux.com.br>, acessado em 30 jul. 2014.
- LAM, William M. C. **Sunlighting as Formgivers for Architecture**. New York, McGraw-Hill, 1986.
- LI, D.H.W., TSANG, E.K.W., CHEUNG, K.L., TAM, C.O. **An Analysis of light pipe system via full-scale measurements**. Applied Energy 87, 2010. pp, 799–805.
- LOVE, J. A., ARCH, D., ENG, P. e DRATNAL P. **Photometric comparison of mirror light pipe systems**. unpublished report prepared for CIF Management Calgary, The University of Calgary, Alberta, Canada, 1995.
- LUZ, B., (2008). **Céu artificial retilíneo da FAU-USP: desenvolvimento e construção de equipamento para aplicação didática**. In 7º Seminário

Internacional Espaço Sustentável – Inovações e Edifícios e Cidades (NUTAU 2008), São Paulo, BR, September 08-12.

- LUZ, B. **Condução da luz natural por sistemas não convencionais.** Universidade de São Paulo. FAUUSP. São Paulo, 2009. (Dissertação de mestrado).
- LUZ, B., ALUCCI, M. and MONTEIRO, L. M., (2010). **A luminous efficiency predictive model of light-pipes.** In 10th REHVA WORLD CONGRESS “Sustainable Energy Use in Buildings” (CLIMA-2010), Antalya, Turkey, May 09-12.
- 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.
- MOHELNILKOVA, J. **Tubular light guide evaluation.** Building and Environment 44, 2009. p. 2193–2200.
- 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^{os} 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, acessado em 30 jul. 2014.

CAPÍTULO VII

- NEWTON, V. B; Doca, R. H; & BISCUOLA, G. J. **Tópicos de Física 2. Termologia, Ondulatória e Óptica.** Editora Saraiva. 16ª edição reformulada e ampliada, 2001.
- NILSSON, A. M., JONSSON, J. C. e ROOS, A. **Spectrophotometric measurements and ray tracing simulation of mirror light pipes to evaluate the color of the transmitted light.** Solar Energy Materials and Solar Cells. V124, 2014. p. 172-179.
- NUTTER, S.L. BOWER, C. R. GEBHARD, M. W. HEINZ, R.M. **The transmittance by hollow specularly reflecting cylindrical light pipe of isotropically incident radiation.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A273, 1988. p. 389-396.
- OAKLEY, G; RIFFAT, S.B. & SHAO, L. **Daylight Performance of Lightpipes.** Solar Energy. Vol. 69, N° 2, 2000. p. 89-98.
- OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático.** Disponível em: <http://www.osram.com.br>, acessado em 30 jul. 2014.
- PHOTOPIA. **Software da LTI Optics.** Disponível em: <http://www.ltioptics.com>. acessado em 30 jul. 2014.
- ROBBINS, Claude. **Daylighting. Design and Analysis.** New York, Van Nostrand, 1986.
- ROSA, Érico Naves. **The Evaluation of Daylight Guide Systems and Their Impact on Building Design.** Harvard, 2006. (Tese, Doutorado em Design, Harvard Design School).
- ROSEMAN, A., KLOSS, S.H., MULLER, T., AYDINLI, S., KAASE H. **The photometry of hollow light guides.** Lighting Research and Technology 37,1. 2005. p. 60-72.
- 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.

- SHAO, L., ELMUALIM, A. A., YOHANNES, I. **Mirror lightpipes: Daylighting performance in real buildings.** Lighting Research and Technology 30,1. 1998. p. 37-44.
- SILVA, A. D. **Avaliação teórica e experimental do desempenho de dutos de luz na cidade de São Carlos.** São Carlos, 2005. (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos)
- 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.
- SOLATUBE. **Commercial & Residential Idea Book.** Disponível em: www.solatube.com, acessado em 30 out. 2009.
- SOTO, F. J. I. **Avaliação do desempenho luminoso de dutos de luz.** Maceió: UFAL, 2010. (Dissertação de mestrado).
- 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; SMITH, G.B., **Cylindrical mirror light pipes.** Solar Energy Materials & Solar Cells 36. 1995. p. 159 - 168.
- SWIFT, P.D; SMITH, G.B.; FRANKLIN, J., **Hotspots in cylindrical mirror light pipes: description and removal.** Lighting Research and Technology 38,1. 2006. p. 19-31.

CAPÍTULO VII

- 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.
- SWIFT, P.D, **Splayed mirror light pipes**. Solar Energy 84. 2010. p. 160 - 165.
- 3M. **Filme Prismático**. Disponível em: <http://www.3m.com/index.html?change=true>, acessado em 30 out. 2009.
- TOLEDO, G. E. **Parametros de design para configuração de dutos de luz solar**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2013. (Dissertação de mestrado).
- TOLEDO, G. E; PELEGRINI, A. V. **Identificação dos parametros de design de dutos de luz solar através do emprego da simulação computacional**. Design & Tecnologia. V5. 2013.
- TROPLUX. **Programa para avaliação de iluminação natural em ambiente construído**. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br>, acessado em 30 out. 2009.
- VELUX. **Sun Tunnels**. Disponível em: 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 .
- ZASTROW, A., WITTWER, V. **Daylighting with mirror lightpipes and with fluorescent planar concentrator**. Proceedings of photo-optical. Instrumentation Engineering. v692. 1986. p. 227-234.
- ZHANG, X. MUNEEER, T. **Mathematical model for the performance of light pipe**. Lighting Research and Technology 32,3. 2000. p. 141-146.
- ZHANG, X. MUNEEER, T. and KUBIE, J. **A design guide for performance assessment of solar light-pipes**. Lighting Research and Technology 34. 2002.

APÊNDICES

APÊNDICES

A. DADOS COLETADOS NOS ENSAIOS.

Os valores marcados em **negrito** nas tabelas são referentes aos horários durante os ensaios que estava sob condição de céu claro, ou seja, havia a presença do sol direto.

Ensaio do dia 03 de agosto de 2011.

Tabela 40. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.

		Seção quadrada de lado 10X10 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7100	21	10	7	1	10	10	6	15	11	19
1,5	6600	19	9	7	0	9	8	4	14	10	19
2	6200	19	7	5	0	8	7	4	12	9	17
3	7100	20	7	9	1	8	8	5	15	11	14
4	7200	20	7	6	0	8	7	5	14	11	14
5	8500	15	5	6	0	5	5	4	11	8	10

APÊNDICES

Tabela 41. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.

		Seção quadrada de lado 10X10 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 42. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 20cm.

		Seção quadrada de lado 20X20 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5300	18	9	9	1	8	9	6	11	9	189
1,5	5100	23	20	13	1	14	27	9	11	10	185
2	5300	24	10	10	1	9	18	9	10	10	183
3	5200	14	8	7	0	8	11	5	7	6	179
4	5200	27	15	8	1	9	9	4	8	6	180
5	5200	28	14	8	0	11	9	5	9	6	179

APÊNDICES

Tabela 43. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 20cm.

		Seção quadrada de lado 20X20 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%
1,5	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	4%
2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%
3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%
4	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%
5	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%

Tabela 44. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 25cm.

		Seção quadrada de lado 25X25 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	25900	163	19	18	1	18	34	13	19	17	180
1,5	30000	71	19	15	1	17	30	9	16	14	180
2	28600	94	16	15	1	14	24	12	15	13	181
3	27000	61	14	11	1	12	18	10	12	10	182
4	26000	50	14	13	1	11	14	7	11	9	182
5	24500	48	11	9	1	9	11	6	11	8	181

APÊNDICES

Tabela 45. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 25cm.

		Seção quadrada de lado 25X25 (cm)									
		FLD (%)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
1,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%

Tabela 46. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 30cm.

		Seção quadrada de lado 30X30 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	33700	95	21	22	2	23	59	18	20	23	182
1,5	34800	100	20	23	2	21	52	17	18	20	181
2	34300	96	17	17	1	16	38	13	15	16	181
3	30100	80	12	13	1	11	25	9	11	12	181
4	30700	83	11	13	1	10	20	8	10	10	182
5	30600	82	11	13	1	9	18	7	10	9	182

APÊNDICES

Tabela 47. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 30cm.

		Seção quadrada de lado 30X30 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
1,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%

Tabela 48. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.

		Seção quadrada de lado 40X40 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	35500	175	30	13	2	40	124	35	28	41	181
1,5	35300	170	25	13	2	33	99	28	25	34	181
2	35100	173	24	13	2	31	89	26	24	32	181
3	35100	170	23	13	2	26	68	22	21	26	181
4	36300	174	21	13	1	23	57	18	19	23	181
5	33200	161	16	13	1	17	40	13	15	17	181

APÊNDICES

Tabela 49. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.

		Seção quadrada de lado 40X40 (cm)									
		FLD (%)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
1,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%

Tabela 50. Dados medidos no primeiro ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 50cm.

		Seção quadrada de lado 50X50 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	31500	258	41	13	4	59	186	51	40	60	180
1,5	2980	270	48	13	3	55	178	45	38	56	180
2	19400	274	26	13	3	34	125	32	26	38	178
3	19000	195	24	13	2	29	78	22	21	29	177
4	30500	237	22	13	2	29	87	25	21	31	176
5	32200	260	21	13	2	27	77	23	20	28	176

APÊNDICES

Tabela 51. Dados calculados no primeiro ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 50cm.

		Seção quadrada de lado 50X50 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%
1,5	9%	2%	0%	0%	2%	6%	2%	1%	2%	6%
2	1%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%
3	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
4	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
5	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%

Ensaio do dia 08 de agosto de 2011.

Tabela 52. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.

		Seção quadrada de lado 10X10 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	34400	24	12	8	8	9	6	5	6	6	3
1,5	34200	19	10	7	8	7	9	5	6	5	3
2	34000	20	12	8	9	8	6	5	6	5	3
3	33600	19	11	7	8	6	5	4	5	5	3
4	33900	20	11	7	8	6	6	5	5	6	3
5	35700	39	20	11	12	9	10	8	9	9	6

APÊNDICES

Tabela 53. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 10cm.

		Seção quadrada de lado 10X10 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1,5	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela 54. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 20cm.

		Seção quadrada de lado 20X20 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	29500	121	5	8	5	8	33	7	8	9	3
1,5	31100	87	3	5	3	8	22	3	8	7	3
2	34400	109	4	5	3	7	20	4	6	7	3
3	35600	118	3	4	2	4	11	2	5	5	3
4	36000	90	2	3	2	3	8	1	4	4	6
5	36200	180	2	3	2	3	6	1	4	4	6

APÊNDICES

Tabela 55. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 20cm.

		Seção quadrada de lado 20X20 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1,5	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela 56. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 25cm.

		Seção quadrada de lado 25X25 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	12200	141	6	10	5	11	40	8	8	10	4
1,5	12200	144	4	7	4	8	32	7	8	10	3
2	12100	144	4	7	4	7	26	5	7	8	3
3	12100	144	2	4	2	4	15	3	5	5	1
4	12000	144	2	3	2	3	8	2	5	4	1
5	12000	144	2	3	2	3	7	1	4	4	0

APÊNDICES

Tabela 57. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 25cm.

		Seção quadrada de lado 25X25 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,2%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
1,5	1,2%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
2	1,2%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%
3	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela 58. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real – dutos com seção quadrada de lado 30cm.

Seção quadrada de lado 30X30 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	16100	135	10	16	8	17	61	12	11	14	6
1,5	16200	211	6	11	7	11	52	13	9	14	7
2	16300	217	5	9	5	9	34	8	7	9	4
3	15000	216	3	7	3	5	20	6	5	6	3
4	14600	205	2	4	3	4	15	3	5	5	2
5	14300	204	2	4	2	3	11	2	4	4	1

APÊNDICES

Tabela 59. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 30cm.

		Seção quadrada de lado 30X30 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,8%	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,4%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
1,5	1,3%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
2	1,3%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
3	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela 60. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.

		Seção quadrada de lado 40X40 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	29900	217	20	31	19	34	124	33	21	33	17
1,5	26200	133	10	17	10	18	69	18	12	19	10
2	26300	320	17	28	17	31	113	31	21	36	16
3	25000	132	6	11	6	11	42	11	8	12	5
4	23600	131	4	8	5	8	32	8	6	9	4
5	23300	129	4	7	4	7	27	7	6	8	3

APÊNDICES

Tabela 61. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 40cm.

		Seção quadrada de lado 40X40 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,7%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,4%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
1,5	0,5%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,3%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%
2	1,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,4%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
3	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela 62. Dados medidos no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 50cm.

		Seção quadrada de lado 50X50 (cm)									
		Iluminância (lux)									
		Pontos									
COMPRIMENTO (m)	EXTERNO	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	25700	234	27	40	25	45	156	45	29	45	24
1,5	23800	204	19	30	18	33	117	33	22	35	18
2	22200	194	15	24	15	26	95	27	18	28	15
3	21600	182	12	19	11	20	71	20	14	21	11
4	20900	173	9	15	9	16	57	16	11	17	9
5	21900	188	8	13	8	10	52	14	14	16	8

Tabela 63. Dados calculados no segundo ensaio com maquete sob céu real– dutos com seção quadrada de lado 50cm.

		Seção quadrada de lado 50X50 (cm)								
		FLD (%)								
		Pontos								
COMPRIMENTO (m)	REFERÊNCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,9%	0,1%	0,2%	0,1%	0,2%	0,6%	0,2%	0,1%	0,2%	0,1%
1,5	0,9%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,5%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
2	0,9%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,4%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
3	0,8%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
4	0,8%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
5	0,9%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%

APÊNDICES

B. TABELAS COM COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO

A tabela 64 apresenta os coeficientes de utilização para zenitais naturais. Tabela que foi retirada do *handbook* da IES, (IESNA, 2000). As tabelas de 65 a 100, foram geradas com dados simulados pelo software *photopia* e editados pelo editor fotométrico *photometric toolbox*.

Tabela 64. Coeficiente de Utilização para zenital natural.

Ceiling Reflectance (Percent)	RCR*	Wall Reflectance (Percent)		
		50	30	10
80	0	1.19	1.19	1.19
	1	1.05	1.00	0.97
	2	0.93	0.86	0.81
	3	0.83	0.76	0.70
	4	0.75	0.67	0.60
	5	0.67	0.59	0.53
	6	0.62	0.53	0.47
	7	0.57	0.49	0.43
	8	0.54	0.47	0.41
	9	0.53	0.46	0.41
	10	0.52	0.45	0.40
50	0	1.11	1.11	1.11
	1	0.98	0.95	0.92
	2	0.87	0.83	0.78
	3	0.79	0.73	0.68
	4	0.71	0.64	0.59
	5	0.64	0.57	0.52
	6	0.59	0.52	0.47
	7	0.55	0.48	0.43
	8	0.52	0.46	0.41
	9	0.51	0.45	0.40
	10	0.50	0.44	0.40
20	0	1.04	1.04	1.04
	1	0.92	0.90	0.88
	2	0.83	0.79	0.76
	3	0.75	0.70	0.66
	4	0.68	0.62	0.58
	5	0.61	0.56	0.51
	6	0.57	0.51	0.46
	7	0.53	0.47	0.43
	8	0.51	0.45	0.41
	9	0.50	0.44	0.40
	10	0.49	0.44	0.40

Tabela 65. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x1m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 10CM_1M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	29	29	29	29	28	28	28	28	27	27	27	26	26	26	25	25	25	24
1	27	27	26	26	27	26	26	25	25	25	24	24	24	24	23	23	23	23
2	26	25	24	23	25	24	24	23	24	23	22	23	22	22	22	22	21	21
3	25	23	22	21	24	23	22	21	22	21	20	22	21	20	21	20	20	19
4	23	22	20	19	23	21	20	19	21	20	19	20	19	19	20	19	18	18
5	22	20	19	18	22	20	19	18	19	18	17	19	18	17	19	18	17	17
6	21	19	17	16	21	19	17	16	18	17	16	18	17	16	18	17	16	16
7	20	18	16	15	20	18	16	15	17	16	15	17	16	15	17	16	15	15
8	19	17	15	14	19	17	15	14	16	15	14	16	15	14	16	15	14	14
9	18	16	14	13	18	16	14	13	16	14	13	15	14	13	15	14	13	13
10	17	15	14	13	17	15	14	13	15	13	13	15	13	13	14	13	13	12

Tabela 66. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x1m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 20CM_1M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	52	52	52	52	51	51	51	51	49	49	49	47	47	47	45	45	45	44
1	49	48	47	46	48	47	46	45	45	44	43	44	43	42	42	41	41	40
2	46	44	42	40	45	43	41	39	41	40	38	40	39	38	39	38	37	36
3	43	40	37	35	42	39	37	35	38	36	34	37	35	34	36	34	33	32
4	41	37	34	31	40	36	33	31	35	33	31	34	32	30	33	31	30	29
5	38	34	31	28	37	33	30	28	32	30	28	32	29	28	31	29	27	27
6	36	31	28	26	35	31	28	26	30	27	25	29	27	25	29	27	25	24
7	34	29	26	23	33	28	25	23	28	25	23	27	25	23	27	25	23	22
8	32	27	24	22	31	26	24	21	26	23	21	25	23	21	25	23	21	20
9	30	25	22	20	29	25	22	20	24	22	20	24	21	20	23	21	20	19
10	28	23	20	18	28	23	20	18	23	20	18	22	20	18	22	20	18	18

APÊNDICES

Tabela 67. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x1m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 25CM_1M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	60	60	60	60	59	59	59	59	56	56	56	54	54	54	51	51	51	50
1	56	55	53	52	55	54	52	51	52	50	49	50	49	48	48	47	46	46
2	53	50	47	45	52	49	46	44	47	45	43	45	44	42	44	43	42	41
3	49	45	42	39	48	44	41	39	43	40	38	42	40	38	40	39	37	36
4	46	41	38	35	45	40	37	35	39	36	34	38	36	34	37	35	33	33
5	43	38	34	31	42	37	34	31	36	33	31	35	33	31	34	32	30	29
6	40	35	31	28	39	34	31	28	33	30	28	33	30	28	32	29	27	27
7	38	32	28	26	37	32	28	26	31	28	25	30	27	25	30	27	25	24
8	35	30	26	23	35	29	26	23	29	26	23	28	25	23	28	25	23	22
9	33	28	24	22	33	27	24	22	27	24	22	26	23	21	26	23	21	21
10	32	26	22	20	31	26	22	20	25	22	20	25	22	20	24	22	20	19

Tabela 68. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x1m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 30CM_1M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	66	66	66	66	65	65	65	65	62	62	62	59	59	59	57	57	57	56
1	62	60	59	57	61	59	57	56	57	55	54	55	54	53	53	52	51	50
2	58	54	52	49	57	53	51	49	52	49	47	50	48	46	48	47	45	44
3	54	49	46	43	53	48	45	42	47	44	42	45	43	41	44	42	40	39
4	50	45	41	38	49	44	40	38	43	40	37	42	39	37	40	38	36	35
5	47	41	37	34	46	40	36	34	39	36	33	38	35	33	37	35	33	32
6	44	37	33	30	43	37	33	30	36	33	30	35	32	30	34	32	29	28
7	41	35	30	27	40	34	30	27	33	30	27	33	29	27	32	29	27	26
8	38	32	28	25	38	32	28	25	31	27	25	30	27	25	30	27	25	24
9	36	30	26	23	36	29	26	23	29	25	23	28	25	23	28	25	23	22
10	34	28	24	21	34	27	24	21	27	24	21	26	23	21	26	23	21	20

Tabela 69. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x1m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 40CM_1M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	75	75	75	75	73	73	73	73	70	70	70	67	67	67	64	64	64	63
1	70	68	66	64	69	66	65	63	64	62	61	61	60	59	59	58	57	56
2	65	61	58	55	64	60	57	54	58	55	53	56	53	52	54	52	50	49
3	60	55	51	47	59	54	50	47	52	49	46	50	48	45	49	47	45	43
4	56	50	45	41	55	49	45	41	47	44	41	46	43	40	45	42	40	38
5	52	45	40	37	51	44	40	37	43	39	36	42	39	36	41	38	35	34
6	49	41	36	33	47	41	36	33	40	36	32	39	35	32	38	34	32	31
7	45	38	33	30	44	37	33	30	37	32	29	36	32	29	35	32	29	28
8	43	35	30	27	42	35	30	27	34	30	27	33	29	27	32	29	26	25
9	40	32	28	25	39	32	28	25	31	27	24	31	27	24	30	27	24	23
10	38	30	26	23	37	30	26	23	29	25	23	29	25	22	28	25	22	21

Tabela 70. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x1m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 50CM_1M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	82	82	82	82	80	80	80	80	76	76	76	73	73	73	70	70	70	68
1	76	74	71	69	74	72	70	68	69	67	66	66	65	64	64	63	62	61
2	70	66	62	59	69	65	61	58	62	59	57	60	58	55	58	56	54	53
3	65	59	54	51	64	58	54	50	56	52	49	54	51	48	53	50	48	46
4	60	53	48	44	59	52	48	44	51	47	43	49	46	43	48	45	42	41
5	56	48	43	39	55	48	43	39	46	42	38	45	41	38	44	40	38	36
6	52	44	39	35	51	43	38	35	42	38	34	41	37	34	40	37	34	32
7	49	40	35	31	48	40	35	31	39	34	31	38	34	31	37	33	31	29
8	46	37	32	28	45	37	32	28	36	31	28	35	31	28	34	31	28	27
9	43	34	29	26	42	34	29	26	33	29	26	33	29	26	32	28	25	24
10	40	32	27	24	40	32	27	24	31	27	24	30	26	24	30	26	23	22

APÊNDICES

Tabela 71. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x1,5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 10CM_1-5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	18	18	18	18	18	18	18	18	17	17	17	16	16	16	16	16	16	15
1	18	17	17	17	17	17	17	16	16	16	16	16	15	15	15	15	15	15
2	17	16	16	15	16	16	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14
3	16	15	14	14	16	15	14	14	15	14	14	14	14	13	14	13	13	13
4	15	14	14	13	15	14	13	13	14	13	13	14	13	13	13	13	12	12
5	15	14	13	12	14	13	13	12	13	12	12	13	12	12	13	12	12	12
6	14	13	12	11	14	13	12	11	13	12	11	12	12	11	12	12	11	11
7	14	12	11	11	13	12	11	11	12	11	11	12	11	11	12	11	11	10
8	13	12	11	10	13	12	11	10	11	11	10	11	11	10	11	11	10	10
9	12	11	10	10	12	11	10	10	11	10	10	11	10	10	11	10	10	9
10	12	11	10	9	12	11	10	9	10	10	9	10	10	9	10	10	9	9

Tabela 72. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x1,5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 20CM_1-5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	39	39	39	39	38	38	38	38	36	36	36	35	35	35	33	33	33	33
1	37	36	35	34	36	35	34	34	34	33	33	33	32	32	31	31	31	30
2	35	33	31	30	34	32	31	30	31	30	29	30	29	29	29	29	28	27
3	33	30	29	27	32	30	28	27	29	28	26	28	27	26	27	26	26	25
4	31	28	26	24	30	28	26	24	27	25	24	26	25	24	26	24	23	23
5	29	26	24	22	28	26	24	22	25	23	22	24	23	22	24	23	22	21
6	27	24	22	20	27	24	22	20	23	22	20	23	21	20	22	21	20	19
7	26	23	20	19	25	22	20	19	22	20	19	21	20	19	21	20	19	18
8	25	21	19	18	24	21	19	17	21	19	17	20	19	17	20	18	17	17
9	23	20	18	16	23	20	18	16	19	18	16	19	17	16	19	17	16	16
10	22	19	17	15	22	19	17	15	18	16	15	18	16	15	18	16	15	15

Tabela 73. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x1,5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 25CM_1-5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	46	46	46	46	45	45	45	45	43	43	43	41	41	41	40	40	40	39
1	44	43	41	40	43	42	41	40	40	39	39	39	38	37	37	37	36	36
2	41	39	37	36	40	38	37	35	37	36	34	36	35	34	35	34	33	32
3	39	36	33	32	38	35	33	31	34	32	31	33	32	30	32	31	30	29
4	36	33	30	28	35	32	30	28	31	29	28	31	29	27	30	28	27	26
5	34	30	28	26	33	30	27	26	29	27	25	28	27	25	28	26	25	24
6	32	28	25	23	31	28	25	23	27	25	23	26	24	23	26	24	23	22
7	30	26	23	21	30	26	23	21	25	23	21	25	23	21	24	22	21	20
8	29	24	22	20	28	24	22	20	24	21	20	23	21	20	23	21	19	19
9	27	23	20	18	27	23	20	18	22	20	18	22	20	18	21	20	18	18
10	26	21	19	17	25	21	19	17	21	19	17	21	18	17	20	18	17	16

Tabela 74. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x1,5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 30CM_1-5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	53	53	53	53	52	52	52	52	49	49	49	47	47	47	45	45	45	44
1	50	48	47	46	49	47	46	45	45	45	44	44	43	42	42	42	41	40
2	47	44	42	40	46	43	41	40	42	40	39	40	39	38	39	38	37	36
3	44	40	37	35	43	39	37	35	38	36	34	37	35	34	36	35	33	33
4	41	37	34	32	40	36	33	31	35	33	31	34	32	31	33	32	30	29
5	38	34	31	28	37	33	30	28	32	30	28	32	29	28	31	29	27	27
6	36	31	28	26	35	31	28	26	30	27	25	29	27	25	29	27	25	24
7	34	29	26	24	33	29	26	23	28	25	23	27	25	23	27	25	23	22
8	32	27	24	22	31	27	24	22	26	23	21	26	23	21	25	23	21	21
9	30	25	22	20	29	25	22	20	24	22	20	24	22	20	24	21	20	19
10	28	23	21	19	28	23	20	19	23	20	18	23	20	18	22	20	18	18

APÊNDICES

Tabela 75. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x1,5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 40CM_1-5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	62	62	62	62	61	61	61	61	58	58	58	56	56	56	53	53	53	52
1	59	57	55	54	57	56	54	53	53	52	51	51	51	50	50	49	48	47
2	55	51	49	46	53	50	48	46	49	47	45	47	45	44	46	44	43	42
3	51	47	43	41	50	46	43	40	44	42	40	43	41	39	42	40	38	37
4	47	42	39	36	46	42	38	36	41	38	35	39	37	35	38	36	34	33
5	44	39	35	32	43	38	35	32	37	34	32	36	34	31	35	33	31	30
6	41	36	32	29	41	35	32	29	34	31	29	34	31	28	33	30	28	27
7	39	33	29	26	38	32	29	26	32	28	26	31	28	26	30	28	26	25
8	37	30	27	24	36	30	27	24	30	26	24	29	26	24	28	26	24	23
9	34	28	25	22	34	28	25	22	28	24	22	27	24	22	26	24	22	21
10	33	26	23	20	32	26	23	20	26	23	20	25	22	20	25	22	20	19

Tabela 76. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x1,5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 50CM_1-5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	70	70	70	70	68	68	68	68	65	65	65	62	62	62	60	60	60	58
1	65	63	61	60	64	62	60	59	59	58	57	57	56	55	55	54	53	52
2	61	57	54	51	59	56	53	51	54	52	49	52	50	48	50	49	47	46
3	56	51	48	45	55	51	47	44	49	46	43	47	45	43	46	44	42	41
4	52	47	42	39	51	46	42	39	45	41	38	43	40	38	42	40	37	36
5	49	42	38	35	48	42	38	35	41	37	34	40	36	34	39	36	34	33
6	46	39	34	31	45	38	34	31	37	34	31	36	33	31	36	33	30	29
7	43	36	31	28	42	35	31	28	35	31	28	34	30	28	33	30	28	27
8	40	33	29	26	39	33	29	26	32	28	26	31	28	25	31	28	25	24
9	38	31	26	24	37	30	26	24	30	26	23	29	26	23	29	26	23	22
10	36	29	25	22	35	28	24	22	28	24	22	27	24	22	27	24	21	21

Tabela 77. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x2m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 10CM_2M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11
1	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10
2	12	11	11	11	12	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10
3	11	11	10	10	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9
4	11	10	10	9	11	10	10	9	10	9	9	10	9	9	9	9	9	9
5	10	10	9	9	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8
6	10	9	9	8	10	9	9	8	9	9	8	9	9	8	9	8	8	8
7	10	9	8	8	10	9	8	8	9	8	8	9	8	8	8	8	8	8
8	9	9	8	8	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7
9	9	8	8	7	9	8	8	7	8	8	7	8	8	7	8	8	7	7
10	9	8	7	7	9	8	7	7	8	7	7	8	7	7	8	7	7	7

Tabela 78. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x2m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 20CM_2M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	30	30	30	30	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27	26	26	26	25
1	28	28	27	26	28	27	27	26	26	26	25	25	25	24	24	24	24	23
2	27	26	25	24	26	25	24	23	24	24	23	24	23	22	23	22	22	22
3	26	24	23	21	25	23	22	21	23	22	21	22	21	21	22	21	20	20
4	24	22	21	20	24	22	21	20	21	20	19	21	20	19	20	20	19	18
5	23	21	19	18	22	20	19	18	20	19	18	20	19	18	19	18	17	17
6	22	19	18	17	21	19	18	17	19	18	17	18	17	16	18	17	16	16
7	21	18	17	16	20	18	17	16	18	16	15	17	16	15	17	16	15	15
8	20	17	16	15	19	17	16	15	17	15	14	16	15	14	16	15	14	14
9	19	16	15	14	18	16	15	14	16	15	14	16	14	14	15	14	13	13
10	18	15	14	13	18	15	14	13	15	14	13	15	14	13	15	14	13	12

APÊNDICES

Tabela 79. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x2m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 25CM_2M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	37	37	37	37	36	36	36	36	34	34	34	33	33	33	32	32	32	31
1	35	34	33	32	34	33	33	32	32	31	31	31	30	30	30	29	29	29
2	33	31	30	29	32	31	30	28	30	29	28	29	28	27	28	27	27	26
3	31	29	27	26	30	28	27	26	28	26	25	27	26	25	26	25	24	24
4	29	27	25	23	29	26	25	23	26	24	23	25	24	23	24	23	22	22
5	28	25	23	21	27	25	23	21	24	22	21	23	22	21	23	22	21	20
6	26	23	21	20	26	23	21	20	22	21	19	22	20	19	22	20	19	19
7	25	22	20	18	24	21	19	18	21	19	18	21	19	18	20	19	18	17
8	23	20	18	17	23	20	18	17	20	18	17	19	18	17	19	18	17	16
9	22	19	17	16	22	19	17	16	19	17	16	18	17	16	18	17	16	15
10	21	18	16	15	21	18	16	15	18	16	15	17	16	15	17	16	15	14

Tabela 80. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x2m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 30CM_2M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	43	43	43	43	42	42	42	42	40	40	40	38	38	38	37	37	37	36
1	41	40	39	38	40	39	38	37	37	37	36	36	35	35	35	34	34	33
2	38	36	35	33	37	36	34	33	34	33	32	33	32	31	32	31	31	30
3	36	33	31	30	35	33	31	29	32	30	29	31	30	28	30	29	28	27
4	34	31	28	27	33	30	28	26	29	28	26	29	27	26	28	27	26	25
5	32	28	26	24	31	28	26	24	27	25	24	27	25	24	26	25	23	23
6	30	26	24	22	29	26	24	22	25	23	22	25	23	22	24	23	22	21
7	28	25	22	20	28	24	22	20	24	22	20	23	21	20	23	21	20	19
8	27	23	20	19	26	23	20	19	22	20	19	22	20	19	21	20	19	18
9	25	21	19	18	25	21	19	17	21	19	17	21	19	17	20	19	17	17
10	24	20	18	16	24	20	18	16	20	18	16	19	18	16	19	17	16	16

APÊNDICES

Tabela 81. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x2m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 40CM_2M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	53	53	53	53	51	51	51	51	49	49	49	47	47	47	45	45	45	44
1	50	48	47	46	48	47	46	45	45	44	43	44	43	42	42	41	41	40
2	46	44	42	40	45	43	41	39	42	40	38	40	39	38	39	38	37	36
3	43	40	37	35	42	39	37	35	38	36	34	37	35	34	36	34	33	32
4	41	37	34	31	40	36	33	31	35	33	31	34	32	30	33	31	30	29
5	38	34	30	28	37	33	30	28	32	30	28	31	29	28	31	29	27	26
6	36	31	28	26	35	31	28	25	30	27	25	29	27	25	29	27	25	24
7	34	29	26	23	33	28	25	23	28	25	23	27	25	23	27	24	23	22
8	32	27	24	21	31	26	23	21	26	23	21	25	23	21	25	23	21	20
9	30	25	22	20	29	25	22	20	24	22	20	24	21	20	23	21	20	19
10	28	23	20	18	28	23	20	18	23	20	18	22	20	18	22	20	18	18

Tabela 82. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x2m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 50CM_2M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	60	60	60	60	59	59	59	59	56	56	56	54	54	54	52	52	52	51
1	57	55	53	52	55	54	52	51	52	51	50	50	49	48	48	47	47	46
2	53	50	47	45	52	49	47	45	47	45	44	46	44	43	44	43	42	41
3	49	45	42	39	48	44	42	39	43	41	38	42	40	38	41	39	37	36
4	46	41	38	35	45	41	37	35	39	37	34	38	36	34	37	35	33	33
5	43	38	34	31	42	37	34	31	36	33	31	35	33	31	34	32	30	29
6	40	35	31	28	39	34	31	28	33	30	28	33	30	28	32	29	27	27
7	38	32	28	26	37	32	28	26	31	28	25	30	27	25	30	27	25	24
8	35	30	26	23	35	29	26	23	29	26	23	28	25	23	28	25	23	22
9	33	28	24	22	33	27	24	22	27	24	21	26	23	21	26	23	21	20
10	32	26	22	20	31	26	22	20	25	22	20	25	22	20	24	22	20	19

APÊNDICES

Tabela 83. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x3m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 10CM_3M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6
1	7	7	7	6	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
2	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6	5	5	5
4	6	6	6	5	6	6	6	5	6	5	5	6	5	5	5	5	5	5
5	6	6	5	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	5	5	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	6	5	5	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
10	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	4	5	5	4	5	5	4	4

Tabela 84. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x3m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 20CM_3M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	19	19	19	19	19	19	19	19	18	18	18	17	17	17	16	16	16	16
1	18	18	17	17	18	17	17	17	17	17	16	16	16	16	16	15	15	15
2	17	17	16	16	17	16	16	15	16	15	15	15	15	15	15	15	14	14
3	17	16	15	14	16	15	15	14	15	14	14	15	14	14	14	14	14	13
4	16	15	14	13	16	15	14	13	14	14	13	14	13	13	14	13	13	13
5	15	14	13	12	15	14	13	12	13	13	12	13	13	12	13	12	12	12
6	14	13	12	12	14	13	12	12	13	12	12	13	12	11	12	12	11	11
7	14	13	12	11	14	12	12	11	12	11	11	12	11	11	12	11	11	11
8	13	12	11	10	13	12	11	10	12	11	10	11	11	10	11	11	10	10
9	13	11	10	10	13	11	10	10	11	10	10	11	10	10	11	10	10	10
10	12	11	10	9	12	11	10	9	11	10	9	11	10	9	10	10	9	9

Tabela 85. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x3m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 25CM_3M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	25	25	25	25	24	24	24	24	23	23	23	22	22	22	21	21	21	21
1	24	23	23	22	23	23	22	22	22	21	21	21	21	20	20	20	20	19
2	23	22	21	20	22	21	20	20	20	20	19	20	19	19	19	19	18	18
3	21	20	19	18	21	20	19	18	19	18	18	19	18	17	18	18	17	17
4	20	19	18	17	20	19	17	17	18	17	16	18	17	16	17	17	16	16
5	19	18	16	16	19	17	16	15	17	16	15	17	16	15	16	16	15	15
6	18	17	15	14	18	16	15	14	16	15	14	16	15	14	16	15	14	14
7	18	16	14	14	17	15	14	13	15	14	13	15	14	13	15	14	13	13
8	17	15	14	13	16	15	14	13	14	13	13	14	13	13	14	13	13	12
9	16	14	13	12	16	14	13	12	14	13	12	14	13	12	13	12	12	12
10	15	13	12	11	15	13	12	11	13	12	11	13	12	11	13	12	11	11

Tabela 86. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x3m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 30CM_3M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	30	30	30	30	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27	26	26	26	25
1	29	28	27	27	28	27	27	26	26	26	25	25	25	25	24	24	24	23
2	27	26	25	24	27	25	24	24	25	24	23	24	23	23	23	23	22	22
3	26	24	23	22	25	24	22	21	23	22	21	22	21	21	22	21	20	20
4	24	22	21	20	24	22	21	20	21	20	19	21	20	19	20	20	19	19
5	23	21	19	18	23	21	19	18	20	19	18	20	19	18	19	18	18	17
6	22	20	18	17	21	19	18	17	19	18	17	19	17	17	18	17	16	16
7	21	18	17	16	20	18	17	16	18	16	16	18	16	15	17	16	15	15
8	20	17	16	15	19	17	16	15	17	15	15	17	15	14	16	15	14	14
9	19	16	15	14	19	16	15	14	16	15	14	16	14	14	15	14	14	13
10	18	15	14	13	18	15	14	13	15	14	13	15	14	13	15	14	13	12

APÊNDICES

Tabela 87. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x3m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 40CM_3M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	39	39	39	39	38	38	38	38	36	36	36	35	35	35	33	33	33	33
1	37	36	35	34	36	35	34	34	34	33	33	33	32	32	31	31	31	30
2	35	33	32	30	34	32	31	30	31	30	29	30	29	29	29	29	28	27
3	33	30	29	27	32	30	28	27	29	28	26	28	27	26	27	26	26	25
4	31	28	26	24	30	28	26	24	27	25	24	26	25	24	26	24	23	23
5	29	26	24	22	28	26	24	22	25	23	22	24	23	22	24	23	22	21
6	27	24	22	20	27	24	22	20	23	22	20	23	21	20	22	21	20	19
7	26	23	20	19	25	22	20	19	22	20	19	21	20	19	21	20	18	18
8	25	21	19	17	24	21	19	17	21	19	17	20	19	17	20	18	17	17
9	23	20	18	16	23	20	18	16	19	17	16	19	17	16	19	17	16	16
10	22	19	17	15	22	19	17	15	18	16	15	18	16	15	18	16	15	15

Tabela 88. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x3m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 50CM_3M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	47	47	47	47	45	45	45	45	43	43	43	42	42	42	40	40	40	39
1	44	43	42	41	43	42	41	40	40	39	39	39	38	38	37	37	36	36
2	41	39	37	36	40	38	37	35	37	36	34	36	35	34	35	34	33	32
3	39	36	33	32	38	35	33	31	34	32	31	33	32	30	32	31	30	29
4	36	33	30	28	36	32	30	28	31	29	28	31	29	28	30	28	27	26
5	34	30	28	26	33	30	27	26	29	27	25	28	27	25	28	26	25	24
6	32	28	25	23	31	28	25	23	27	25	23	26	24	23	26	24	23	22
7	30	26	23	21	30	26	23	21	25	23	21	25	23	21	24	22	21	20
8	29	24	22	20	28	24	21	20	24	21	20	23	21	20	23	21	19	19
9	27	23	20	18	27	23	20	18	22	20	18	22	20	18	21	19	18	17
10	26	21	19	17	25	21	19	17	21	19	17	20	18	17	20	18	17	16

Tabela 89. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x4m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 10CM_4M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3
5	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	3	4	3	3	4	3	3	3
6	4	4	3	3	4	4	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
9	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Tabela 90. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x4m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 20CM_4M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11
1	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11
2	12	12	11	11	12	12	11	11	11	11	11	11	11	10	11	10	10	10
3	12	11	11	10	11	11	11	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
4	11	11	10	10	11	10	10	10	10	10	9	10	10	9	10	9	9	9
5	11	10	9	9	11	10	9	9	10	9	9	10	9	9	9	9	9	9
6	10	10	9	9	10	9	9	9	9	9	9	9	9	8	9	9	8	8
7	10	9	9	8	10	9	9	8	9	8	8	9	8	8	9	8	8	8
8	10	9	8	8	10	9	8	8	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	8	8	7	9	8	8	7	8	8	7	8	8	7	8	8	7	7
10	9	8	8	7	9	8	8	7	8	7	7	8	7	7	8	7	7	7

APÊNDICES

Tabela 91. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x4m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 25CM_4M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	18	18	18	18	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16	15	15	15	15
1	17	17	16	16	17	16	16	16	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14
2	16	16	15	15	16	15	15	14	15	14	14	14	14	14	14	14	14	13
3	16	15	14	13	15	15	14	13	14	14	13	14	13	13	13	13	13	13
4	15	14	13	13	15	14	13	12	13	13	12	13	13	12	13	12	12	12
5	14	13	12	12	14	13	12	12	13	12	12	12	12	11	12	12	11	11
6	14	12	12	11	13	12	12	11	12	11	11	12	11	11	12	11	11	11
7	13	12	11	10	13	12	11	10	12	11	10	11	11	10	11	11	10	10
8	13	11	10	10	12	11	10	10	11	10	10	11	10	10	11	10	10	10
9	12	11	10	9	12	11	10	9	11	10	9	10	10	9	10	10	9	9
10	12	10	10	9	11	10	9	9	10	9	9	10	9	9	10	9	9	9

Tabela 92. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x4m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 30CM_4M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	22	22	22	22	22	22	22	22	21	21	21	20	20	20	19	19	19	19
1	21	21	20	20	21	20	20	20	20	19	19	19	19	18	18	18	18	17
2	20	19	19	18	20	19	18	18	18	18	17	18	17	17	17	17	17	16
3	19	18	17	16	19	18	17	16	17	17	16	17	16	16	16	16	16	15
4	18	17	16	15	18	17	16	15	16	16	15	16	15	15	16	15	15	14
5	17	16	15	14	17	16	15	14	15	15	14	15	14	14	15	14	14	13
6	17	15	14	13	16	15	14	13	15	14	13	14	14	13	14	13	13	13
7	16	14	13	12	16	14	13	12	14	13	12	14	13	12	13	13	12	12
8	15	13	12	12	15	13	12	12	13	12	12	13	12	12	13	12	12	11
9	15	13	12	11	14	13	12	11	13	12	11	12	12	11	12	11	11	11
10	14	12	11	10	14	12	11	10	12	11	10	12	11	10	12	11	10	10

Tabela 93. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x4m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 40CM_4M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	30	30	30	30	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27	26	26	26	25
1	29	28	27	27	28	27	27	26	26	26	25	25	25	25	24	24	24	23
2	27	26	25	24	26	25	24	24	24	24	23	24	23	22	23	22	22	22
3	26	24	23	22	25	24	22	21	23	22	21	22	21	21	22	21	20	20
4	24	22	21	20	24	22	21	20	21	20	19	21	20	19	20	20	19	18
5	23	21	19	18	23	20	19	18	20	19	18	20	18	18	19	18	17	17
6	22	19	18	17	21	19	18	17	19	17	17	18	17	16	18	17	16	16
7	21	18	17	16	20	18	17	15	18	16	15	17	16	15	17	16	15	15
8	20	17	16	15	19	17	15	14	17	15	14	16	15	14	16	15	14	14
9	19	16	15	14	18	16	15	14	16	14	14	16	14	13	15	14	13	13
10	18	15	14	13	18	15	14	13	15	14	13	15	14	13	15	13	13	12

Tabela 94. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x4m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 50CM_4M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	37	37	37	37	36	36	36	36	35	35	35	33	33	33	32	32	32	31
1	35	34	33	33	34	33	33	32	32	32	31	31	31	30	30	30	29	29
2	33	31	30	29	32	31	30	29	30	29	28	29	28	27	28	27	27	26
3	31	29	27	26	31	29	27	26	28	26	25	27	26	25	26	25	24	24
4	29	27	25	23	29	26	25	23	26	24	23	25	24	23	25	23	22	22
5	28	25	23	21	27	25	23	21	24	22	21	23	22	21	23	22	21	20
6	26	23	21	20	26	23	21	20	22	21	19	22	20	19	22	20	19	19
7	25	22	20	18	24	21	19	18	21	19	18	21	19	18	20	19	18	17
8	23	20	18	17	23	20	18	17	20	18	17	19	18	17	19	18	17	16
9	22	19	17	16	22	19	17	16	19	17	16	18	17	16	18	17	16	15
10	21	18	16	15	21	18	16	15	18	16	15	17	16	15	17	16	15	14

APÊNDICES

Tabela 95. Coeficiente de Utilização – duto 0,1x0,1x5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 10CM_5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2	3	2	2	2
5	3	3	3	2	3	3	3	2	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2
6	3	3	2	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabela 96. Coeficiente de Utilização – duto 0,2x0,2x5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 20CM_4M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11
1	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11
2	12	12	11	11	12	12	11	11	11	11	11	11	11	10	11	10	10	10
3	12	11	11	10	11	11	11	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
4	11	11	10	10	11	10	10	10	10	10	9	10	10	9	10	9	9	9
5	11	10	9	9	11	10	9	9	10	9	9	10	9	9	9	9	9	9
6	10	10	9	9	10	9	9	9	9	9	9	9	9	8	9	9	8	8
7	10	9	9	8	10	9	9	8	9	8	8	9	8	8	9	8	8	8
8	10	9	8	8	10	9	8	8	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	8	8	7	9	8	8	7	8	8	7	8	8	7	8	8	7	7
10	9	8	8	7	9	8	8	7	8	7	7	8	7	7	8	7	7	7

Tabela 97. Coeficiente de Utilização – duto 0,25x0,25x5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 25CM_5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11
1	13	13	12	12	13	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11
2	12	12	11	11	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10
3	12	11	11	10	12	11	11	10	11	10	10	11	10	10	10	10	10	10
4	11	11	10	10	11	11	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	9	9
5	11	10	10	9	11	10	10	9	10	9	9	10	9	9	9	9	9	9
6	11	10	9	9	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	8
7	10	9	9	8	10	9	9	8	9	9	8	9	8	8	9	8	8	8
8	10	9	8	8	10	9	8	8	9	8	8	9	8	8	8	8	8	8
9	9	9	8	8	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	7
10	9	8	8	7	9	8	8	7	8	8	7	8	8	7	8	7	7	7

Tabela 98. Coeficiente de Utilização – duto 0,3x0,3x5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 30CM_5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC	80				70				50			30			10			0
RW	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	17	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16	15	15	15	15	15	15	14
1	16	16	16	15	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	13
2	16	15	14	14	15	15	14	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13
3	15	14	13	13	15	14	13	13	14	13	13	13	13	12	13	13	12	12
4	14	13	13	12	14	13	12	12	13	12	12	13	12	12	12	12	12	11
5	14	13	12	11	13	12	12	11	12	12	11	12	11	11	12	11	11	11
6	13	12	11	11	13	12	11	11	12	11	11	11	11	10	11	11	10	10
7	13	11	11	10	12	11	11	10	11	10	10	11	10	10	11	10	10	10
8	12	11	10	10	12	11	10	10	11	10	9	10	10	9	10	10	9	9
9	12	10	10	9	11	10	10	9	10	9	9	10	9	9	10	9	9	9
10	11	10	9	9	11	10	9	9	10	9	9	10	9	9	10	9	9	8

APÊNDICES

Tabela 99. Coeficiente de Utilização – duto 0,4x0,4x5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 40CM_5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	24	24	24	24	23	23	23	23	22	22	22	21	21	21	20	20	20	20
1	23	22	22	21	22	22	21	21	21	21	20	20	20	20	19	19	19	19
2	22	21	20	19	21	20	20	19	20	19	19	19	19	18	18	18	18	17
3	21	19	18	17	20	19	18	17	18	18	17	18	17	17	17	17	17	16
4	20	18	17	16	19	18	17	16	17	16	16	17	16	16	17	16	15	15
5	19	17	16	15	18	17	16	15	16	15	15	16	15	15	16	15	14	14
6	18	16	15	14	17	16	15	14	15	14	14	15	14	14	15	14	14	13
7	17	15	14	13	17	15	14	13	15	14	13	14	13	13	14	13	13	12
8	16	14	13	12	16	14	13	12	14	13	12	14	13	12	13	13	12	12
9	15	13	12	12	15	13	12	12	13	12	11	13	12	11	13	12	11	11
10	15	13	12	11	14	13	12	11	13	12	11	12	11	11	12	11	11	11

Tabela 100. Coeficiente de Utilização – duto 0,5x0,5x5m.

IES INDOOR REPORT

PHOTOMETRIC FILENAME : 50CM_5M_MM.IES

COEFFICIENTS OF UTILIZATION - ZONAL CAVITY METHOD

Effective Floor Cavity Reflectance 0.20

RC RW	80				70				50			30			10			0
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10	0
0	30	30	30	30	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27	26	26	26	25
1	29	28	27	27	28	27	27	26	26	26	25	25	25	25	24	24	24	23
2	27	26	25	24	27	25	24	24	25	24	23	24	23	23	23	23	22	22
3	26	24	23	22	25	24	22	21	23	22	21	22	21	21	22	21	20	20
4	24	22	21	20	24	22	21	20	21	20	19	21	20	19	20	20	19	18
5	23	21	19	18	23	21	19	18	20	19	18	20	19	18	19	18	18	17
6	22	19	18	17	21	19	18	17	19	18	17	19	17	16	18	17	16	16
7	21	18	17	16	20	18	17	16	18	16	15	17	16	15	17	16	15	15
8	20	17	16	15	19	17	16	15	17	15	14	16	15	14	16	15	14	14
9	19	16	15	14	18	16	15	14	16	15	14	16	14	14	15	14	13	13
10	18	15	14	13	18	15	14	13	15	14	13	15	14	13	15	14	13	12

C.CURVAS POLARES

As ilustrações a seguir mostram as curvas polares geradas com dados das simulações no software *Photopia*, com e sem o vidro na seção de entrada do duto.

Seção: 10cm
Comprimento: 1m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 41lm
Seção: 10cm
Comprimento: 2m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 18lm

Seção: 10cm
Comprimento: 1m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 41lm
Seção: 10cm
Comprimento: 2m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 18lm

Seção: 10cm
Comprimento: 1,5m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 26lm
Seção: 10cm
Comprimento: 3m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 10lm

Seção: 10cm
Comprimento: 1,5m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 26lm
Seção: 10cm
Comprimento: 3m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido: 10lm

APÊNDICES

Seção: 10cm
Comprimento: 4m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 6lm

Seção: 10cm
Comprimento: 4m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 6lm

Seção: 10cm
Comprimento: 5m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 4lm

Seção: 10cm
Comprimento: 5m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 4lm

Seção: 20cm
Comprimento : 1m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 291lm

Seção: 20cm
Comprimento : 1m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 291lm

Seção: 20cm
Comprimento : 1,5m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 216lm

Seção: 20cm
Comprimento :
1,5m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 216lm

Seção: 20cm
Comprimento : 2m
Sem Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 166lm

Seção: 20cm
Comprimento : 2m
Com Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 166lm

Seção: 20cm
Comprimento : 3m
Sem Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 107lm

Seção: 20cm
Comprimento : 3m
Com Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 107lm

Seção: 20cm
Comprimento : 4m
Sem Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 73lm

Seção: 20cm
Comprimento : 4m
Com Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 74lm

Seção: 20cm
Comprimento : 5m
Sem Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 54lm

Seção: 20cm
Comprimento : 5m
Com Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 54lm

APÊNDICES

Seção: 25cm
Comprimento : 1m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
520lm

Seção: 25cm
Comprimento : 1m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
520lm

Seção: 25cm
Comprimento : 1,5m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
402lm

Seção: 25cm
Comprimento : 1,5m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
402lm

Seção: 25cm
Comprimento : 2m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
310lm

Seção: 25cm
Comprimento : 2m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
319lm

Seção: 25cm
Comprimento : 3m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
212lm

Seção: 25cm
Comprimento : 3m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
216lm

Seção: 25cm
Comprimento : 4m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 153lm

Seção: 25cm
Comprimento : 4m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 155lm

Seção: 25cm
Comprimento : 5m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 115lm

Seção: 25cm
Comprimento : 5m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 117lm

Seção: 30cm
Comprimento : 1m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
824lm

Seção: 30cm
Comprimento : 1m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
825lm

APÊNDICES

Seção: 30cm
Comprimento : 1,5m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 653lm

Seção: 30cm
Comprimento : 1,5m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 656lm

Seção: 30cm
Comprimento : 2m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido:
517lm

Seção: 30cm
Comprimento : 2m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 536lm

Seção: 30cm
Comprimento : 3m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 367lm

Seção: 30cm
Comprimento : 3m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 376lm

Seção: 30cm
Comprimento : 4m
Sem Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 272lm

Seção: 30cm
Comprimento : 4m
Com Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 278lm

Seção: 30cm
Comprimento : 5m
Sem Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 210lm

Seção: 30cm
Comprimento : 5m
Com Vidro

Fluxo luminoso
emitido: 213lm

Seção: 40cm
Comprimento : 1m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 1663lm

Seção: 40cm
Comprimento : 1m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 1658lm

APÊNDICES

Seção: 40cm
Comprimento : 1,5m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 1378lm

Seção: 40cm
Comprimento : 1,5m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 1379lm

Seção: 40cm
Comprimento : 2m
Sem Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso emitido:
1115lm

Seção: 40cm
Comprimento : 2m
Com Vidro

— 0.0 - 180.0
— 90.0 - 270.0

Fluxo luminoso
emitido: 1162lm

Seção: 40cm
Comprimento : 3m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 839lm

Seção: 40cm
Comprimento : 3m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 862lm

Seção: 40cm
Comprimento : 4m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 652lm

Seção: 40cm
Comprimento : 4m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 665lm

Seção: 40cm
Comprimento : 5m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 520lm

Seção: 40cm
Comprimento : 5m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 528lm

APÊNDICES

Seção: 50cm
Comprimento : 1m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 2439lm

Seção: 50cm
Comprimento : 1m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido:
2813lm

Seção: 50cm
Comprimento : 1,5m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 2211lm

Seção: 50cm
Comprimento : 1,5m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido:
2403lm

Seção: 50cm
Comprimento : 2m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 1961lm

Seção: 50cm
Comprimento : 2m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido:
2081lm

Seção: 50cm
Comprimento : 3m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido: 1608lm

Seção: 50cm
Comprimento : 3m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido: 1546lm

APÊNDICES

Seção: 50cm
Comprimento : 4m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido:
1242lm

Seção: 50cm
Comprimento : 4m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido:
1280lm

Seção: 50cm
Comprimento : 5m
Sem Vidro

Fluxo luminoso emitido:
1018lm

Seção: 50cm
Comprimento : 5m
Com Vidro

Fluxo luminoso emitido:
1043lm

ANEXOS

ANEXOS

A.CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Serviço Público Federal Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro
<h1>Certificado de Calibração</h1>	
DIMCI 2347/2011 Número do Certificado	
Cliente	
Nome: Instituto de Eletrotécnica e Energia (USP/IEE)	
Endereço: Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289 - Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP: 05508-010	
Identificação do Item	
Item: Cabeça Fotométrica	
Fabricante: LMT	
Modelo/Tipo: 30 mm	
Número de Série: 09A05312	Código de Identificação: Não identificado
Informações Administrativas	
Processo Inmetro: 008209/2011	Data da Calibração: 19/10/2011
Laboratório Responsável: Laboratório de Radiometria e Fotometria (LaraF)	
27/10/2011 Data de Emissão
Iakya Borraquens Couceiro Chefe da Divisão de Metrologia Óptica	
O presente certificado de calibração atende aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 e é válido apenas para o item acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral. Reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo Inmetro.	
Inmetro - Av. Nossa Senhora das Graças, 50 - Neréus, Duque de Caxias, RJ, Brasil, CEP: 25250-020 Samci - Tel: (21) 2679-9077/9210 - e-mail: samci@inmetro.gov.br	
(Pág. 1/4)	

VALIDO SOMENTE PARA A DIVISÃO

ANEXOS

Certificado de Calibração

DIMCI 2347/2011
Número do Certificado

Características do Item

Visor: digital
Valor de uma divisão: 0,1 lx (> 0 ou $= 200$ lx e < 1000 lx) e 1 lx (> 1000 lx)
Leitora LMT S1000 (NS:09A0531) com código de identificação MT1079.
Cabeça fotométrica com cabo de conexão de 15 m.

Informações Pertinentes à Calibração

A calibração foi realizada utilizando-se um sistema de medição composto por um banco fotométrico, um fotômetro e uma lâmpada padrão de trabalho.

O sistema é alinhado previamente com o auxílio de um laser e o fotômetro é utilizado para controlar a estabilidade do padrão.

Os resultados da calibração são rastreados ao Sistema Internacional de Unidades (SI), por intermédio dos padrões metrológicos nacionais. As medições realizadas estão referenciadas ao seguinte padrão: Lâmpada W40G-642, Código de Identificação nº Laraf PT 006, Certificado nº DIMCI 0341/2010, emitido pelo Inmetro.

O instrumento foi calibrado na faixa de automática.

A temperatura ambiente média durante a medição foi de $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$ e a umidade relativa foi de $(50 \pm 5) \%$.

Procedimento de Medição

A calibração do instrumento foi feita comparando-se os valores de leitura, com os valores de iluminância calculados a partir da intensidade luminosa de uma lâmpada padrão e da distância lâmpada-instrumento.

Sobre um banco fotométrico é posicionada a lâmpada padrão de Intensidade luminosa e mede-se uma série de valores de distâncias correspondentes a distintos valores de iluminância lidos para cada escala do instrumento.

A Norma utilizada é a NIT-Laraf-001-Rev02.

Resultados e Declaração da Incerteza de Medição

Os resultados da calibração estão contidos nas Tabelas 1 e 2, onde a incerteza expandida da medição (U) é declarada como a incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k , com v_{eff} graus de liberdade efetivos o qual corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. A incerteza expandida da medição foi determinada de acordo com a Terceira Edição Brasileira do "Guia para Expressão da Incerteza de Medição" (ISO GUM).

Nas figuras 1 e 2 estão os as representações gráficas dos resultados.

(Pág. 2/4)

DIMCI 2347/2011

Número do Certificado

TABELA 1 – Resultados da cabeça fotométrica 09A05312 no canal 1 com cabo de 15 m.

Iluminância Lida I_x	Iluminância Calculada I_x	v_{eff}	k	U %
200,0	202,4	∞	2,00	1,1
1000	1008	∞	2,00	1,2
1600	1613	∞	2,00	1,2

Figura 1: Representação gráfica dos resultados da calibração no canal 1.

TABELA 2 - Resultados da cabeça fotométrica 09A05312 no canal 2 com cabo de 15 m.

Iluminância Lida I_x	Iluminância Calculada I_x	v_{eff}	k	U %
200,0	202,4	∞	2,00	1,1
1000	1008	∞	2,00	1,2
1600	1613	∞	2,00	1,2

Figura 2: Representação gráfica dos resultados da calibração no canal 2.

Certificado de Calibração

DIMCI 2347/2011

Número do Certificado

Observações

- 1) O instrumento deve ser utilizado na faixa de medição apropriada.

2) Plano de Referência

Carla Trezza Costa

Carla Thereza Coelho
Técnico Executor

Giuseppe Arlinda

Giovanna Fonseca Borghi de Almeida
Chefe do Laboratório de Radiometria e Fotometria

(Pag. 4/4)

B.FREQUENCIA DE OCORRENCIA DA ILUMINANCIA DIFUSA EM PLANO HORIZONTAL PARA SÃO PAULO