

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo

**Avaliação e Calibração de um Céu Artificial
para Estudos de Iluminação Natural com
Modelos Físicos em Escala Reduzida.**

Dissertação de Mestrado
Alexander González Castaño

Florianópolis
2007

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para Estudos de Iluminação Natural com Modelos Físicos em Escala Reduzida.

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para Estudos de Iluminação Natural com Modelos Físicos em Escala Reduzida.

Alexander González Castaño

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em
Arquitetura e Urbanismo Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD

Florianópolis
2007

GONZÁLEZ C, Alexander. Avaliação e calibração de um céu artificial para estudos de iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida. Florianópolis, 2007. 122 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Defesa: 29/06/2007

O presente trabalho apresenta o procedimento de avaliação, calibração e funcionamento de um céu artificial, para estudos de iluminação natural com modelos arquitetônicos em escala reduzida.

Alexander González Castaño

Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para Estudos de Iluminação Natural com Modelos Físicos em Escala Reduzida.

Esta dissertação vai ser julgada e aprovada para a obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo pelo Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 29 de junho 2007

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD
Orientador

Profa. Roberta Vieira Gonçalves de Souza, Dra.

Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Profa. Marta Dischinger, Dra.

AGRADECIMIENTOS

Con gran satisfacción agradezco a todas aquellas personas que de una u otra forma participaron de esta etapa de mi crecimiento personal. Intentar nombrarlas a todas sería una lista demasiado larga, en la que los nombres quedarían reducidos a pequeñas referencias, mejor procurare entregar abrazos y agradecimientos personales...

...entretanto, não posso deixar de falar do maravilhoso abraço e abrigo que o povo do Brasil, presenteou para mim. No Brasil fiz amigos para a vida toda: Roberto Carlos, Feco, Eló, Isaque, Cláudio, Alberto, Manú, Sonia, Marcus, Virginia, Rapha, Guilherme, Solange, Beth, Marcela, Américo, de todo coração...muito brigado!!!

RESUMO

Os ambientes controlados de iluminação, conhecidos como Céus Artificiais, são desenhados e construídos para o desenvolvimento de estudos qualitativos e quantitativos de iluminação, utilizando modelos arquitetônicos em escala reduzida. Nestes ambientes as condições de iluminação são simuladas com uma distribuição similar a um céu real encoberto, para obter dados de luminância e iluminância, na avaliação da iluminação natural na arquitetura. O princípio de desenho deste tipo de céu são os reflexos infinitos no horizonte, que produzem uma diminuição da iluminação a um menor ângulo de altura. Assim é possível reproduzir a distribuição da luminância do céu, proposta pela *Commission Internationale de L'Eclairage (C.I.E)*, para um céu encoberto.

A calibração de um céu artificial de caixa de espelhos é importante para assegurar a confiabilidade dos dados de iluminação. Esta calibração tem dois interesses principais: o primeiro é fornecer uma distribuição de luminâncias reais, que simule o modelo padronizado pela C.I.E, conhecido como “Standard Overcast Sky” (ISO - CIE, 2003). O segundo é fornecer níveis suficientes de iluminação que superem os faixas de atuação dos equipamentos fotométricos. O céu artificial do LabCon-Arq, da Universidade Federal de Santa Catarina, foi desenhado e construído no final do ano 2005 e calibrado durante o ano de 2006, atualmente é usado para pesquisa e atividades de ensino.

Nesta dissertação é apresentado o método de calibração do céu artificial, que consiste na geração de mapas de distribuição de luminâncias com o sistema fotométrico digital IQCam RT-32, da empresa Lumetrix, e uma lente “olho de peixe” com um ângulo de 185°. No processo de calibração, os dados de luminância obtidos foram comparados considerando sua altura angular com relação ao modelo teórico proposto pela C.I.E. Foram necessários alguns ajustes no céu artificial de caixa de espelhos, tais como: sistema de difusão, lâmpadas, controle de refletâncias no fosso do céu e melhoramento do sistema de ventilação, para finalmente obter uma distribuição de luminâncias similar ao modelo teórico da C.I.E.

ABSTRACT

The controlled illumination ambients, known as artificial skies, have been designed and built for the development of quantitative and qualitative daylighting studies using reduced scale architecture models. In these ambients, the light conditions are simulated with a very similar distribution to the real sky, allowing the obtention of luminance and illuminance data in order to evaluate daylight performance in architectural scale models. The principle of a mirror box artificial sky is the infinite reflections in the mirrored horizon that create a reduction on its luminance towards a lower angle of altitude. Thus, it is possible to reproduce a sky luminance distribution, like the one proposed by the International Commission of L'Eclairage (ISO - CIE, 2003) for an overcast sky.

The calibration of the mirror box artificial sky is important to ensure reliable quantitative data collection. There are two main concerns: the first one is to provide a luminance distribution as close as possible to CIE "Standard Overcast Sky", while the second is to produce sufficient illuminance levels to be measured with basic photometric equipment. The artificial sky of LabCon/ARQ, at Federal University of Santa Catarina, Brazil, was designed and built by the end of 2005 and calibrated during 2006, and since then it has been used for research and teaching activities. In this paper, an artificial sky calibration method is presented; it consists of mapping the sky luminance distribution with an imaging photometric system, IQCam RT-32, from Lumetrix, with a "fish eye" lens with an angle of 185°. During the whole process, the luminance distribution was monitored through digital maps; luminances were plotted against altitude angles that allowed the comparison with the CIE overcast sky distribution.

Several adjustments in the sky room were done: diffusing ceiling, lamps, floor and walls reflectances and ventilation system. At the end, it was possible to reach a luminance distribution very similar to the CIE sky.

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. Formulação do problema.	1
1.2. Justificativa.	3
1.3. Objetivo geral	4
1.4. Objetivos específicos	4
1.5. Estrutura do trabalho	4
Capítulo 2. Fundamentação teórica.....	7
2.1. O Fenômeno da luz.	7
2.1.1. Fotometria.	7
2.1.2. Luz natural e arquitetura.	9
2.1.3. Determinantes da iluminação natural.	11
2.1.4. <i>Daylight Factor</i> (DF)	13
2.2. Métodos de calculo	14
2.2.1. Métodos gráficos	15
2.2.3. Métodos analíticos	18
2.2.4. Modelagem por computador	18
2.3. Estudos de iluminação natural com modelos físicos	19
2.3.1. Considerações iniciais.	19
2.3.2. O modelo da arquitetura: Maquete	24
2.3.3. Avaliação de iluminação com maquetes	25
2.3.3.1. Estudos qualitativos	27
2.3.3.2. Estudos quantitativos	29
2.3.4. Precisão e erros do método	29
2.3.5. Ambientes de exposição	31
2.4. Classificação do céu para estudos de iluminação natural	32
2.4.1. Modelos analíticos de iluminação da C.I.E.	33
2.4.2. Classificação dos céus	34
2.4.3. Céu encoberto padrão da C.I.E.	34
2.5. Céus artificiais	35
2.5.1. Céus hemisféricos	35
2.5.2. Céus retangulares ou “caixa de espelhos”	40
2.6. Construção e calibração de céus artificiais de caixa de espelhos.	41
2.6.1. Método de avaliação do Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL).	42
2.6.2. Efeitos das variáveis analisadas nos céus de prova.	43
2.6.3. Padrão de desenho e construção de um céu artificial retangular.	47
2.6.4. Calibração do céu artificial	48
2.6.5. Conclusões.	49
2.7. Referências de céus artificiais de tipo “caixa de espelhos”	49
Capítulo 3. Procedimentos metodológicos e equipamentos.....	52
3.1. Considerações Iniciais.	52
3.2. Equipamentos de fotometria	53
3.2.1. Sistema fotométrico digital Lumetrix	54

3.2.2. Sistema fotométrico LI-Cor	55
3.2.3. Calibração de equipamentos	55
3.2.4. Processamento de Dados	56
3.3. Ajustes do céu artificial	57
3.4. Análise de luminâncias.	57
3.5. Análise de Iluminâncias.	59
3.6. Avaliação de modelos físicos em escala reduzida.	61

Capítulo 4. Avaliação e calibração.....62

4.1. Céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC.	62
4.1.1. Construção.	63
4.1.2. Ajustes. do céu artificial.	64
4.1.2.1. Ventilação.	65
4.1.2.2. Tratamento do fosso do céu.	66
4.1.2.3. Saída de cabos dos equipamentos.	66
4.1.2.4. Estabilização do céu.	67
4.2. Distribuição de luminâncias no céu artificial	68
4.2.1. Verificação da distribuição de luminâncias com o difusor acrílico.	68
4.2.1.1. Modificações realizadas no sistema difusor	71
4.2.2. Verificação da distribuição das luminâncias com o difusor de tecido	72
4.2.2.1. Aproximação do PDL do céu artificial com o modelo Standard Overcast Sky da C.I.E .	75
4.2.2.2. Funcionamento do PDL com variação da altura da linha do horizonte	76
4.2.3. Configuração final da distribuição das luminâncias	79
4.3. Distribuição de iluminâncias no céu artificial	80
4.3.1 Distribuição das iluminâncias variando a altura da linha do horizonte.	84
4.4. Espaço de trabalho no céu artificial.	86
4.5. Outros aspectos para avaliação de modelos arquitetônicos em escala reduzida.	87
4.5.1. Orientação dos modelos	87
4.5.2. Efeito da escala.	89
4.5.3. Tratamento de superfícies exteriores	91
4.6. Manutenção do céu.	94

Capítulo 5. Conclusões.....96

5.1. Limitações do trabalho	98
5.2. Recomendações para trabalhos futuros.	100

Referências bibliográficas.....101

I. Anexo I. Recomendações gerais para avaliação de iluminação natural com modelos em escala reduzida sob céu artificial.....105

I.1. Planejamento do estudo	105
I.2. Determinantes do projeto	106
I.2.1. Definição da área de análise	107
I.2.1.1. Malha de pontos	108

I.2.1.2. Sistema de suporte das fotocélulas	109
I.2.2. Tamanho e escala dos modelos arquitetônicos	110
I.2.3. Modelagem	111
I.3. Seleção das variáveis do estudo	113
I.4. Construção dos modelos arquitetônicos	114
I.4.1. Materiais	114
I.4.2. Encaixe	115
I.4.3. Qualidade nos acabamentos	116
I.4.4. Superfícies externas	116
I.5. Instalação das maquetes no céu artificial	116
I.6. Medição de dados	118
I.7. Processamento e representação dos dados	119
I.8. Utilização do céu artificial de caixa de espelhos LabCon-Arq-UFSC	119

II. Anexo. Análise da Residência Haus H. 121

II. 1. Análise do ambiente	121
II. 2. O modelo	121
II. 3. Variáveis de análise	122
II. 4. Processo	122
II.4.1. Projeto original	123
II.4.2. Painéis metálicos	123
II.4.3. Painéis de tecido	124
II.4.4. Cortina fluida	124
II.4.5. Cortina fluida + painéis metálicos	125
II.4.6. Painéis de tecido entreabertos	125
II. 5. Resultados	125
II. 6. Considerações sobre o trabalho.	126

III. Anexo. Análise da Capela da Luz do Arq. Tadao Ando. 127

III. 1. Análise do ambiente	127
III. 2. O modelo	128
III. 3. Variáveis de análise	128
III. 4. Processo	129
III.4.1. Projeto original	129
III.4.2. A cor do vidro da fenda	130
III.4.3. A geometria da fenda	131
III.4.4. Modificação das dimensões da cruz	132
III.4.5. Modificando a cobertura da capela com a abertura de uma fenda	133
III. 5. Obtenção do DF	133
III. 6. Avaliação da luz interior da igreja, cruzando os resultados com a norma NBR 5413 – Iluminância de Interiores.	135
III. 7. Conclusões	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comprimentos de onda do Espectro Eletromagnético	7
Figura 2. Prisma	7
Figura 3. Apresentação gráfica das grandezas fotométricas	8
Figura 4. Relações entre as grandezas fotométricas	9
Figura 5. Palácio da Cultura. Medellín Colômbia.	10
Figura 6. Componentes da Iluminação no ambiente interior	13
Figura 7. Luminância da seção do céu vista através da janela por um ponto P no interior do ambiente.	14
Figura 8. Aplicação dos ábacos BRS	16
Figura 9. Aplicação do diagrama de pontos	16
Figura 10. Hemisfera de raio unitário projetada no plano horizontal	17
Figura 11. Princípio do ângulo sólido projetado	17
Figura 12. Superposição da máscara de obstrução sobre o DCRL	17
Figura 13. Globo com partições da abóbada.	19
Figura 14. Partições do modelo digital para cálculos de iluminação por radiossidade	19
Figura 15. Esquema de operação dos três métodos de análises Propostos para a solução de problemas de engenharia, na década de 70	21
Figura 16. Esquema de operação dos métodos de avaliação quantitativa em problemas de engenharia na época atual	22
Figura 17. Prova sísmica de segurança num modelo de escala de uma casa de adobe	23
Figura 18. Maquete de uma Igreja em escala 1:20	23
Figura 19. Maquete de uma Pagoda Chinês	24
Figura 20. Maquete de um Tepee	24
Figura 21. Lê Corbusier. 1965	25
Figura 22. Frank Lloyd Wright	25
Figura 23. Maquete em escala 1:20 da Sala de Leitura Biblioteca EPM, Medellín.	26
Figura 24. Sala de Leitura da Biblioteca EPM, Medellín fase de construção em março de 2005.	26
Figura 25. Maquete em escala 1:20 da sala de leitura da Biblioteca Pública de EPM. Medellín. 2004	27
Figura 26. Estudo de luz e sombra no interior de uma maquete 1:20 de uma igreja.	28
Figuras 27-28. Estudo qualitativo de iluminação no projeto de uma cozinha. Escala da maquete 1:15	28
Figura 29. Iluminação natural numa maquete em escala 1:20. Biblioteca de EPM, Medellín.	29
Figura 30. Processo de construção da Biblioteca EPM, Medellín.	29
Figura 31. Céu hemisférico por Reflexão.	36
Figura 32. Céu Hemisférico por Transmissão.	36
Figuras 33-34. Céu Artificial do Welsh School of Architecture	37
Figuras 35-36. Céu claro padrão da C.I.E	37
Figura 37. Modelo modificado da distribuição de parcelas no céu	38
Figura 38. Disposição de lâmpadas e Uniformidade. Bélgica	38
Figuras 39. Céu Artificial Bartenbach L'chtLabor	39
Figuras 40. Modelo em escala do Palais Epstein	39
Figura 41. Princípio de funcionamento do céu artificial de caixa de espelhos.	40
Figura 42. Avaliações em seção com o céu de prova	43
Figura 43. Avaliações da geometria da planta do céu de prova	43

Figura 44. Avaliação das superfícies interiores no céu de prova	44
Figura 45. Altura dos espelhos e definição da linha do horizonte	45
Figura 46. Avaliações de luminância em planta segundo o azimute	46
Figura 47. Exterior do Céu Artificial de Caixa de Espelhos do SCL	47
Figura 48. Avaliação de uma maquete	47
Figura 49. Medição das luminâncias para calibração do céu SCL	48
Figura 50. Laboratório de Luz Natural e Tecnologia da Energia.	50
Figura 51. Interior do Céu Artificial da Unidade de Pesquisa de Arquitetura de Baixa Energia. LEARN.	50
Figura 52. Centro de Pesquisa Habitat e Energia, da Faculdade de Arquitetura Desenho e Urbanismo.	50
Figura 53. Instituto de Estudos Do Habitat	51
Figura 54. Céu Artificial de Caixa de Espelhos do LabCon-Arq-UFSC.	51
Figura 55. IQCam – Lumetrix	54
Figura 56. Fotocélula LI-210SA da LICOR	55
Figura 57. Data Logger LI-1000 da LI-COR	55
Figura 58. Instalação da câmera no Céu Artificial	58
Figura 59. Registro visual da câmera IQCam	58
Figura 60. Registro fotométrico da câmera IQC	58
Figura 61. Avaliação de luminâncias no sistema fotométrico Lumetrix.	59
Figura 62. Vista aérea em planta do céu artificial	60
Figura 63. Estrutura de suporte para mapeamento de iluminâncias.	60
Figura 64. Nivelção das fotocélulas.	60
Figuras 65. Seção do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq- UFSC.	63
Figura 66. Cavidade das lâmpadas com acabamento branco e dois circuitos de luminárias T8.	63
Figura 67. Céu artificial do LabCon-Arq-USFC em setembro de 2005.	64
Figura 68. Aberturas para ventilação na parede lateral do Céu Artificial.	65
Figura 69. Temperaturas registradas no céu artificialantes e depois das aberturas de ventilação.	65
Figura 70. Céu artificial sem tratamento no fosso.	66
Figura 71. Céu artificial com tratamento no fosso.	66
Figura 72. Câmara IQCam instalada no interior do céu e ligada ao computador na sala contígua.	67
Figura 73. Fios das fotocélulas saindo do céu por um dos furos	67
Figura 74. Curva de estabilização do céu artificial	68
Figura 75. Tela de análise dos dados da luminância do programa RT-32	69
Figura 76. Curva do PDL do céu com dados da primeira avaliação.	70
Figura 77. Os quadrados verdes apresentam os dados de erro que foram desconsiderados da avaliação do MAPE entre o PDL acrílico e o modelo analítico do céu encoberto da C.I.E.	71
Figura 78. Instalação do tecido de cetim branco	72
Figura 79. Lâmpadas de reforço ao sistema de geração de iluminação do céu artificial.	72
Figura 80. Tela de análise dos dados da luminâncias do programa RT-32	72
Figura 81. Comparação das luminâncias da tela acrílica em relação com as luminâncias do tecido.	73
Figura 82. PDL do céu com tecido de cetim e curva do modelo analítico C.I.E, no sentido Leste–Oeste.	74
Figura 83. PDL do céu com tecido de cetim e curva do modelo analítico C.I.E, no sentido norte–sul.	74
Figura 84. Erros desconsiderados na seção leste-oeste.	76
Figura 85. Erros desconsiderados na seção norte-sul.	76

Figura 86. Fotografia a 50 cm	77
Figura 87. Fotografia a 75 cm	77
Figura 88. Fotografia a 100 cm.	77
Figura 89. Fotografia a 125 cm	77.
Figura 90. Fotografia a 140 cm	77.
Figura 91. PDL geral do céu artificial avaliado e processado no programa MatLab.	80
Figura 92. Curvas de isolux do céu artificial superpostas na malha de pontos.	82
Figura 93. Zona 1 para localização de modelos arquitetônicos no céu artificial.	83
Figura 94. Zona 2 para avaliação do entorno dos projetos ou avaliações urbanas.	84
Figura 95. Suporte para fotocélulas Zona 1.	85
Figura 96. Malha de iluminâncias zona 1.	85
Figura 97. Paralelepípedo virtual de 80 x 80 x 60, cm para delimitação e instalação dos modelos arquitetônicos	86
Figura 98. Modelo arquitetônico instalado no céu artificial com orientação leste.	88
Figura 99. Posição das fotocélulas no chão do modelo arquitetônico seguindo o eixo da janela.	88
Figura 100 Percentual de DF em cada ponto, calculado por orientações.	88
Figura 101 Modelos arquitetônicos em escala 1:5, 1:75 e 1:10	89
Figura 102. Curvas de DF (%) medidos nos modelos arquitetônicos	90
Figura 103. Modelo arquitetônico 1:5 com acabamento branco.	91
Figura 104. Modelo arquitetônico 1:5 com acabamento preto.	91
Figura 105. Avaliação ponto a ponto dos DF obtidos no estudo de acabamentos de modelos arquitetônicos.	92
Figura 106 Fotografia do reflexo do modelo arquitetônico branca.	93
Figura 107 Fotografia do reflexo do modelo arquitetônico preta	93
Figura 108. Efeitos do acabamento branco de uma modelo arquitetônico no interior do céu artificial.	93
Figura 109. Efeitos do acabamento preto de uma modelo arquitetônico no interior do céu artificial.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Grandezas Fotométricas	8
Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos métodos de análise de iluminação natural	15
Tabela 3. Tipos de estudos de iluminação com modelos reduzidos	26
Tabela 4. Fatores de erro do método de avaliação quantitativa de maquetes.	30
Tabela 5. Classificação dos tipos do Céu definida pela C.I.E	34
Tabela 6. Avaliação do PDL do céu, por alturas da linha do horizonte.	78
Tabela 7. Dados de Iluminância em lux do Céu Artificial.	81
Tabela 8. Iluminâncias a 100 cm.	85
Tabela 9. Iluminâncias a 125 cm.	85
Tabela 10. Iluminâncias a 140 cm.	85
Tabela 11. Avaliação de iluminâncias por Orientações.	88
Tabela 12. Dados de iluminância obtidos nos modelos arquitetônicos em escala.	90
Tabela 13. Dados de iluminância e DF dos modelos arquitetônicos com acabado Branco e Preto.	92

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema.

A iluminação natural na arquitetura pode e deve ser analisada dentro do processo de desenvolvimento do projeto, usando técnicas adequadas para tal. A luz natural aplicada em edificações para efeitos estéticos ou funcionais, deve fazer parte da idéia e da materialização da edificação. A iluminação deve ser uma condicionante do projeto, não uma consequência dele.

O uso da iluminação natural na arquitetura apresenta aspectos relacionados com o entendimento e o aproveitamento deste fenômeno, que muitas vezes não são considerados pelos arquitetos no desenvolvimento de seus projetos. A quantidade, a distribuição, a variabilidade e a qualidade da luz natural, na maioria das vezes não fazem ainda, dos estudos de iluminação para um projeto arquitetônico. Atualmente são construídas edificações que não exploram o recurso da iluminação natural, em todas as suas possibilidades estéticas, de conforto visual, e especialmente em seu potencial de eficiência energética.

Para a análise da iluminação natural em projetos de arquitetura, os métodos gráficos são simples demais ou apresentam abstrações do fenômeno, que não facilitam seu entendimento, e reduzem a precisão dos resultados. Por outro lado, os métodos analíticos, fundamentados em equações matemáticas, apresentam uma boa precisão na avaliação do fenômeno da luz, mas em determinadas situações são complexos para serem usados como ferramenta de projeto. Os métodos computacionais, desenvolvidos a partir de algoritmos, facilitam os numerosos cálculos dos métodos analíticos, mas precisam de equipamentos com capacidade para o processamento dos dados, além do estudo de programação ou desenho digital, por serem ferramentas especializadas.

Como um método experimental, os estudos de iluminação usando modelos físicos em escala reduzida permitem a compreensão e a avaliação da luz natural, com a representação tridimensional do fenômeno, em um ambiente interior. Estes modelos permitem fazer avaliações qualitativas mediante a observação direta do interior do espaço ou mediante a fotografia digital. Também é possível fazer

avaliações quantitativas usando sensores fotométricos para o levantamento das condições de iluminação.

O uso de modelos físicos em escala reduzida é uma técnica de representação intimamente ligada à linguagem e ao processo de desenho da arquitetura. Os estudos de iluminação com maquetes permitem avaliar o desempenho da luz em um espaço interior, identificar zonas com deficiências de iluminação e zonas de elevado contraste, visando a construção de espaços com conforto visual e eficiência energética.

Os estudos de iluminação com modelos físicos em escala reduzida, requerem um ambiente de exposição para o desenvolvimento dos seus testes. Esse ambiente de exposição pode ser o próprio lugar onde será construído o projeto, exposto ao céu real. Estas avaliações sob céu real estarão submetidas às variações da distribuição e a intensidade da luz exterior, geradas pelas condições climáticas do lugar, como por exemplo, a formação e o movimento das nuvens. Os testes de iluminação sob céu real são recomendados para avaliações qualitativas, onde o fenômeno da luz no interior do projeto, apresenta as condições naturais de variabilidade da luz ligadas ao clima e à hora do dia. Desta maneira, esta avaliação pode ser complementada com o uso de simuladores de insolação, que permitam estudar simultaneamente o comportamento do projeto diante do fenômeno da luz solar direta.

Mas para o desenvolvimento de estudos quantitativos e avaliações paramétricas, recomenda-se usar ambientes de exposição de iluminação controlados, conhecidos como “céus artificiais”. Um céu artificial deve gerar um ambiente de exposição com luminâncias e iluminâncias conhecidas e estáveis. Estes céus devem ser previamente avaliados e calibrados, para se determinar aspectos como o tamanho, a escala adequada, a instalação e os procedimentos de avaliação dos modelos físicos em escala reduzida. A qualidade de um céu artificial determina as condições para os estudos de iluminação, relacionados com o estudo e a confiabilidade dos resultados.

O estudo da iluminação com modelos físicos em escala reduzida sob céus artificiais não é um método novo na pesquisa da iluminação natural na arquitetura. A

consideração da complexidade do fenômeno da luz e as vantagens da construção e avaliação dos modelos físicos em escala reduzida, têm gerado um método efetivo, preciso e competitivo frente a outros procedimentos de análise de iluminação.

O método tem ampla aplicação acadêmica nos cursos de arquitetura, visando o fortalecimento conceitual dos alunos da graduação na integração consciente da iluminação no projeto arquitetônico. Um céu artificial avaliado e calibrado permite também o desenvolvimento de pesquisas científicas por parte de alunos de pós-graduação e a ampliação do conhecimento do fenômeno da luz e seus efeitos no ambiente construído.

Além disso, o método de avaliação de iluminação com maquetes sob céu artificial pode ser oferecido ao meio profissional, para assessoramento de arquitetos ou escritórios, no desenvolvimento e construção de edificações que apresentem um adequado aproveitamento do fenômeno natural da luz.

1.2 Justificativa

A construção do céu artificial do Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon-Arq-UFSC) no ano 2005, para o estudo da iluminação natural na arquitetura, gerou a necessidade de avaliação e calibração deste ambiente.

Este trabalho desenvolve-se nesta perspectiva, ou seja, visa estabelecer as características, a qualidade e as possibilidades que oferece esta ferramenta de avaliação de projetos. Para isso, são realizados estudos técnicos, experimentais e avaliações, que permitam garantir a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos na avaliação de modelos físicos em escala reduzida.

Estes estudos são desenvolvidos com equipamentos de fotometria especializados, tais como, câmaras digitais, luminancímetros, luxímetros, fotocélulas, data loggers, computadores e softwares. Todos eles disponíveis dentro do acervo instrumental do LabCon-Arq-UFSC.

1.3 Objetivo Geral

Estabelecer parâmetros e procedimentos para avaliação, calibração e funcionamento de céus artificiais, para estudos de iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida.

1.4 Objetivos Específicos

1. Definir os principais procedimentos para a avaliação e a calibração de um céu artificial do tipo “caixa de espelhos”.
2. Avaliar a distribuição de luminâncias no interior do céu artificial do tipo “caixa de espelhos” do LabCon-Arq-USFC, em relação ao modelo para céu encoberto, conhecido como *Standard Overcast Sky*, da *Commission Internationale de L’Eclairage* (C.I.E).
3. Avaliar a distribuição e intensidade das iluminâncias produzidas pelo céu artificial do tipo “caixa de espelhos” no plano de base (colocação dos modelos).
4. Determinar a magnitude dos erros gerados no estudo de iluminação com maquetes produzidos por variáveis, tais como: tamanho, escala, modelagem e tratamento de superfícies.
5. Desenvolver procedimentos para aquisição de dados de iluminação com fotocélulas, para a determinação de Fatores de Luz Natural (DF), em modelos em escala reduzida sob céus artificiais.

1.5 Estrutura do Trabalho

Capítulo 1. Introdução. Apresenta o problema, a justificativa, os objetivos da pesquisa e a estrutura da organização da dissertação.

Capítulo 2. Fundamentação teórica. Neste capítulo apresentam-se definições gerais de iluminação, uso da luz natural na arquitetura e métodos de avaliação de iluminação para projetos. Também se apresentam a simulação com maquetes em escala reduzida com seus princípios físicos, estudos qualitativos e quantitativos, erros possíveis do método e os ambientes de exposição para análise de maquetes. No item dos céus naturais se amplia a informação dos ambientes de exposição, com as definições teóricas dos tipos de céus para avaliações de iluminação na

arquitetura, seguindo os modelos padronizados pela *Commission Internationale de L'Eclairage* (C.I.E). Apresentam-se também, os tipos de céus artificiais desenvolvidos para avaliação de iluminação em arquitetura, especialmente os céus do tipo “caixa de espelhos”, onde se expõe seu princípio de desenho, suas características, princípios de calibração, uso e sua relação com o modelo teórico de céu real encoberto, principal determinante da calibração deste equipamento.

Capítulo 3. Procedimentos metodológicos e equipamentos. Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos e as atividades experimentais, desenvolvidas para a avaliação de desempenho e a calibração do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC, tais como as medidas de luminâncias e iluminâncias, bem como os equipamentos usados.

Capítulo 4. Avaliação e calibração do céu artificial. São apresentados os resultados das intervenções no espaço físico do céu, seu desempenho na distribuição das luminâncias seguindo o modelo analítico da C.I.E. e o mapeamento das iluminâncias determinando a uniformidade do céu. Neste capítulo se define o espaço de trabalho no interior do céu para a instalação e medição dos modelos físicos, assim como outras determinantes para avaliação tais como tamanho, escala, orientação e tratamento das superfícies dos modelos. Este capítulo termina com sugestões para o uso e manutenção do céu artificial.

Capítulo 5. Conclusões. Neste capítulo se apresenta as conclusões gerais do processo de avaliação e calibração do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC.

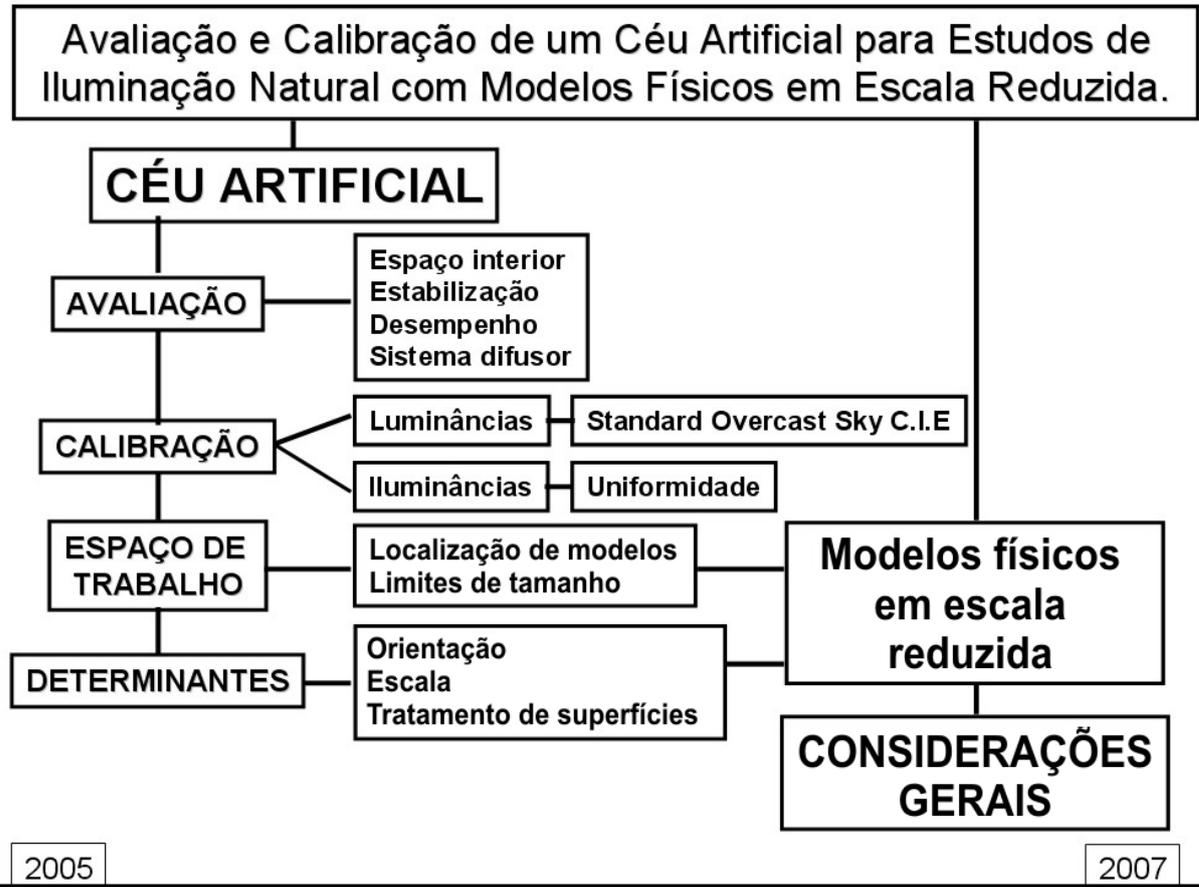
Anexo I. Recomendações gerais para avaliação de iluminação natural com modelos em escala reduzida sob céu artificial.

Anexo II. Análise da residência Haus H.

Anexo III. Análise da Capela da luz do Arq. Tadao Ando

No esquema que segue, apresenta-se um resumo conceitual da estrutura da dissertação, onde se definem as atividades relacionadas à avaliação e calibração

do Céu Artificial. Assim, o mapa apresenta as determinantes do funcionamento do céu, relacionadas com o método de estudo de iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida, concluindo com as recomendações gerais.



2005

2007

Esquema 1. Resumo conceitual da dissertação.

Capítulo 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O Fenômeno da luz

A luz é uma forma particular de energia semelhante ao calor, às ondas de rádio, ou aos raios “X”, se desloca por meio de radiações que podem ser percebidas pelo olho humano e apresenta um comprimento de onda situado na faixa entre 380nm e 780nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$) (HOPKINSON, 1963). O comprimento da onda determina a cor, e quando um raio de luz apresenta todos os comprimentos de onda, percebe-se como luz branca. A discriminação dos comprimentos da onda da luz pode ser gerada por um prisma (Figuras 1 - 2).

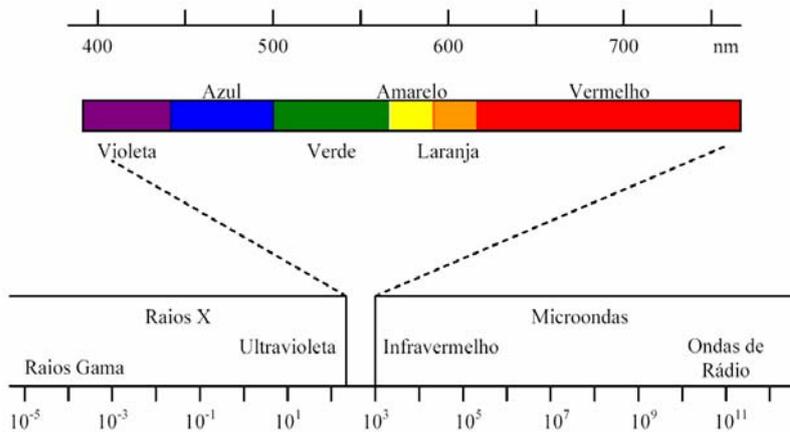


Figura 1. Comprimentos de onda do Espectro Eletromagnético, (Adaptada de MOORE, 1984)

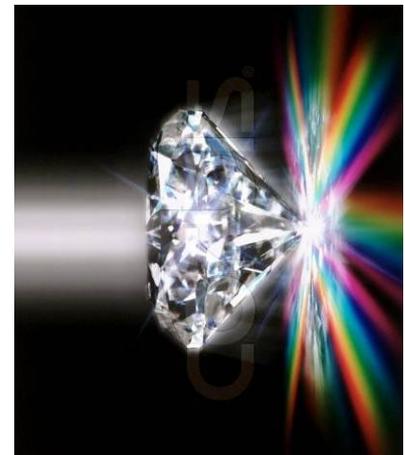


Figura 2. Prisma. (Fonte: <http://www.corbis.com>)

2.1.1. Fotometria

A fotometria é definida como a parte da física que trata da medição da luz, e visa o estudo dos balanços de energia nos processos de emissão, propagação e absorção da radiação. A fotometria abrange as grandezas fotométricas, as leis fundamentais da iluminação e as propriedades óticas dos materiais.

As grandezas fotométricas são classificadas de acordo com a composição espectral e a distribuição espacial da radiação. Pela sua composição espectral, a luz pode ser medida em amplitude (brilho), frequência (cor) e polaridade (ângulo de vibração). Entretanto, as grandezas fotométricas relacionadas com a distribuição

espacial da iluminação são: fluxo luminoso, eficiência luminosa, intensidade luminosa, iluminância e luminância (MOORE, 1984).

Na tabela 1, são apresentadas as definições destas grandezas fotométricas, suas unidades e a forma como podem ser medidas. Na Figura 3 são representadas graficamente as grandezas fotométricas mais importantes.

Tabela 1. Grandezas Fotométricas (Fonte: PEREIRA, 2005).

GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS				
Grandeza			Como Medir	
Nome - Símbolo	Significado		Unidade	
Fluxo Luminoso Φ	Componente do fluxo radiante que gera uma resposta visual.		lm	Esfera de Ulbricht: A fonte luminosa é colocada dentro de uma grande esfera, cujo interior é pintado de branco perfeitamente difusor. Mede-se a iluminância produzida pela luz difusa através de uma pequena abertura, protegendo os raios que saem diretamente da fonte, esta iluminância é proporcional ao fluxo luminoso emitido pela fonte.
Eficiência Luminosa η	É a razão entre o fluxo luminoso " Φ " produzido por uma fonte e a potência "P" consumida.	$\eta = \Phi/P$	lm/W	A eficiência luminosa é deduzida juntamente com a medição do fluxo luminoso com a Esfera de Ulbricht, medindo-se a potência consumida pela fonte luminosa e seus equipamentos auxiliares, através de um wattímetro.
Intensidade Luminosa I	É o fluxo luminoso " Φ " emitido por uma fonte numa certa direção, dividido pelo ângulo sólido " ω ", no qual está contido.	$I = \Phi/\omega$	cd	Banco Fotométrico: A fonte luminosa em exame é comparada com uma fonte de intensidade conhecida. No caso de aparelhos de iluminação, a medição é feita por meio de um fotogoniômetro: uma célula fotovoltaica gira em volta do aparelho e mede a intensidade luminosa em todas as direções.
Iluminância E	É o fluxo luminoso incidente " Φ " numa dada superfície, dividida pela área "A" da mesma	$E = \Phi/A$	lux	Luxímetro: Aparelho conformado por uma fotocélula que transforma a energia luminosa em energia elétrica, a escala marcada em lux é indicada por um galvanômetro.
Luminância L	É a intensidade luminosa "I" (de uma fonte ou de uma superfície iluminada) por unidade de área aparente "A" numa direção.	$L = I/A'$	cd/m ²	Luminâncímetro: aparelho que reproduz a imagem da superfície projetada e cuja a luminância deve ser medida. A energia elétrica produzida pelo fotosensor é ampliada e medida por um galvanômetro calibrado em candelas por m ² .

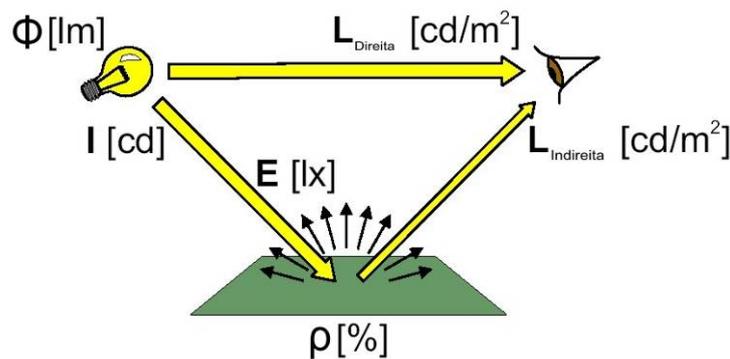


Figura 3. Apresentação gráfica das grandezas fotométricas (Fonte: JACOBS et al, 2004).

As grandezas fotométricas podem ser determinadas a partir da intensidade luminosa, medida em candelas (SI), ao multiplicar ou dividir por quantidades geométricas medidas em áreas (m²) ou ângulos sólidos (sr). Na figura 4 são apresentadas as formulas matemáticas para o cálculo das grandezas fotométricas e a as relações entre essas grandezas (JACOBS et al, 2004).



Figura 4. Relações entre as grandezas fotométricas (Fonte: Syntlight Fundamentals, 2004).

No estudo da iluminação apresentam-se 3 leis fundamentais: a lei do inverso quadrado, a lei do cosseno e a lei da aditividade, o domínio destas leis permite entender melhor o comportamento da iluminação no ambiente construído. Assim mesmo, as propriedades óticas dos materiais expostos à luz também devem ser considerados para o estudo da iluminação. Estas propriedades são: a refletância (ρ), a transmitância (τ) e a absorção (α), e suas unidades são determinadas em percentagem (%), sendo que a soma total da refletância, da transmitância e da absorção para cada material sempre é 100% (MOORE, 1984).

2.1.2. Luz natural e arquitetura

A iluminação natural tem sido usada na arquitetura com finalidades místicas ou pragmáticas, em todas as classes de edificações, desde a antiguidade até a época atual. O professor G.Z. Brown (2003), co-diretor de *Better Bricks Daylighting Labs* em Estados Unidos, ressalta: "*Daylighting is as old as architecture itself,*" (A iluminação natural é tão antiga quanto a própria arquitetura).

A luz natural é um dos elementos que contribui como principal medida para a expressividade arquitetônica, por suas características de variabilidade no dia e nas diferentes estações do ano, introduzindo na arquitetura um componente temporal. Para a maior parte dos seres humanos, a relação com o mundo exterior depende da percepção dos espaços, e está intimamente ligada à experiência da iluminação (Figura 5).



Figura 5. Palácio da Cultura. Medellín Colômbia.

A importância dos benefícios qualitativos e quantitativos da luz natural, e o desenvolvimento tecnológico da arquitetura nas últimas 3 décadas, têm favorecido a importância da iluminação natural como um dos principais determinantes do projeto. O estudo da iluminação natural na arquitetura tem sido documentado e avaliado por muitos autores (ROBBINS, 1986; SCHILER, 1987; MOORE, 1991; TREGUENZA, 1993; BAKER et al, 1993; CABUS, 1997; MAJOROS, 1998; FONTOYNONT, 1999; MARDALJEVIC, 2002; LOVELAND, 2003; THANACHAREONKIT et al, 2005) gerando uma ampla variedade de referências para o aproveitamento da luz natural, na geração de conforto visual e eficiência energética no ambiente construído.

A luz natural precisa ser valorizada durante o desenvolvimento do projeto arquitetônico, considerando o atual momento histórico após mais de cem anos de existência da iluminação elétrica. A tendência atual é o desenho integrado de iluminação natural com luz artificial (GHISI et al, 2003; CARLO et al, 2004), gerando edificações que aproveitem passivamente a luz proveniente do céu, sendo somente reforçados pela iluminação elétrica quando as condições do exterior e do projeto não permitam obter níveis de iluminação e distribuição adequados para sua ocupação.

A estratégia da iluminação natural na arquitetura também pode ser definida como “*o uso consciente da luz natural para reduzir a necessidade de luz elétrica*”, permitindo a conservação de energia, ressaltada desde o começo de 1990 nas prioridades e recomendações da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc* (ASHRAE 90.1);

Devido ao constante aumento do custo da energia, tem sido incrementado o esforço para diminuir o consumo das instalações de iluminação artificial (IEA-TASK 31, 2005). Este esforço tem evoluído em três direções principais:

1. O desenvolvimento de sistemas de iluminação de alta tecnologia na eficiência e consumo da energia.
2. O melhoramento das práticas de projeto arquitetônico integrando iluminação natural nas edificações.
3. A integração de sistemas que controlam a iluminação como a automatização da iluminação artificial em função da luz natural.

A iluminação no ambiente construído representa a segunda maior fonte de consumo de energia elétrica, sendo superada somente pelos sistemas de condicionamento de ar. A taxa de consumo de energia elétrica em prédios de escritórios ou escolas pode ser de 25% a 35% do consumo global destas edificações (SZOKOLAY, 1998).

Em 2004, um estudo de eficiência energética com o uso de iluminação natural em prédios de escritórios, aplicado a um código de obras na cidade de Recife, Brasil (CARLO et al, 2004), apresentou nos seus resultados um potencial de redução de consumo de energia elétrica que variou de 9% a 21%.

No começo do século XXI, a consciência ambiental e os custos da energia têm reclamado da arquitetura um compromisso de oferecer melhores edificações. Poupar energia é de grande importância, mas tem outros benefícios associados ao projeto de iluminação das edificações que devem ser considerados, tais como produtividade, saúde e qualidade do uso da luz natural, embora a influência destes benefícios seja difícil de quantificar (TSANGRASSOULIS e SYNNEFA, 2004).

2.1.3. Determinantes da iluminação natural

A qualidade da iluminação interior de um projeto é determinada durante as primeiras etapas do seu planejamento. Um bom projeto de iluminação gera uma correta relação entre a iluminação disponível no exterior e as necessidades requeridas no interior, de acordo com as necessidades visuais e a função de cada ambiente. A definição dos níveis adequados de iluminância para desenvolvimento de

tarefas visuais é apresentado por institutos especializados como o *National Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH, 2007) ou por normas técnicas como a NBR-5413 (ABNT, 1992).

A iluminação natural admitida nas edificações é fornecida diretamente pelo sol, pela luz difusa proveniente da abóbada celeste e pela luz refletida no entorno. A intensidade e distribuição da iluminação em um ambiente interior dependem das seguintes variáveis:

1. Disponibilidade da luz de acordo com as condições atmosféricas locais.
2. Obstruções externas.
3. Características das aberturas como tamanho, orientação, posição e detalhes.
4. Características óticas dos fechamentos envidraçados.
5. Tamanho e geometria do ambiente interior.
6. Refletividades das superfícies internas.

Considerando estas variáveis, para avaliações de iluminação natural em arquitetura, determina-se que a iluminação que alcança um ponto no interior de uma sala pode ser caracterizado como o resultado da divisão do fluxo luminoso proveniente do exterior em três componentes da iluminação (NBR 15215 -1, 2005):

- 1. Componente do Céu (CC):** iluminação produzida num ponto de referência interno devido à luz proveniente diretamente do céu.
- 2. Componente Refletida Externamente (CRE):** iluminação produzida num ponto de referência interno devido à luz natural refletida em superfícies externas.
- 3. Componente Refletida Internamente (CRI):** iluminação produzida num ponto de referência interno devido à luz refletida nas superfícies internas do ambiente.

A soma destes três componentes, corrigida pelos fatores relativos de diversos efeitos redutores tais como: F_M (fator de manutenção de superfícies internas), K_T (transmissividade do vidro), K_M (fator de manutenção dos vidros) e K_C (Fator de caixilho), representam o nível de iluminação natural em um ponto interior (NBR 15215-3, 2005) (Figura 6).

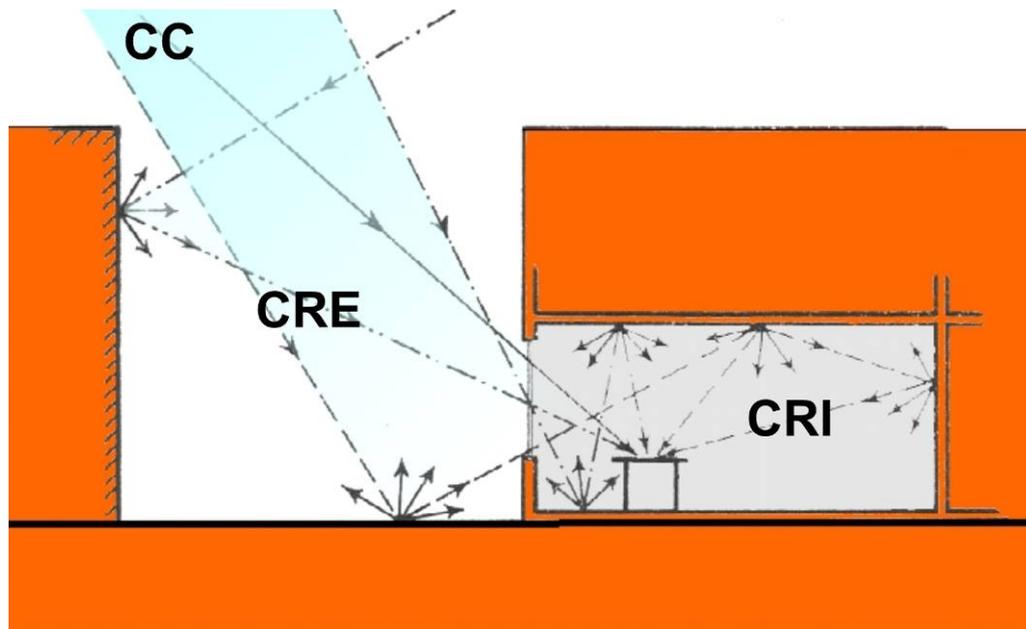


Figura 6. Componentes da Iluminação no ambiente interior (Fonte: MAJOROS, 1998)

2.1.4. Daylight Factor (DF)

Para calcular e avaliar a iluminação natural em um ambiente interior a *Commission Internationale de l'Eclairage* (C.I.E.) recomenda o “Daylight Factor – DF”, definido como “a razão entre a iluminância E_P num ponto localizado num plano horizontal interno, devido à luz que recebe direta ou indiretamente da abóbada celeste, com uma distribuição de luminâncias conhecida ou assumida; e a iluminância simultânea E_E num plano externo horizontal devida a uma abóbada celeste desobstruída”. Este fator é calculado em unidade percentual:

$$DF = E_P / E_E * 100\%$$

No cálculo do DF não é considerada a contribuição direta da luz do sol, devido à suas características direcionais, condição gerada só sob céus encobertos (NBR 15215-1, 2005). O DF é assumido como uma constante para cada ponto do interior de um ambiente, independente da iluminância horizontal externa. Utiliza-se este fator como critério de comparação do funcionamento de diferentes sistemas de iluminação natural, que é convertido facilmente em iluminância interna, multiplicando-se o DF por uma iluminância externa apropriada. Assim, é possível fazer estudos paramétricos de algumas variáveis do sistema de iluminação, durante o desenvolvimento dos projetos.

2.2. Métodos de cálculo e avaliação

Os aspectos quantitativos da iluminação natural na arquitetura vêm sendo abordados há mais de 50 anos, mediante o desenvolvimento e a aplicação de vários métodos de cálculo e análise. Os modelos gráficos, matemáticos, experimentais e computacionais têm-se constituído em ferramentas de desenho e avaliação da iluminação no interior do ambiente construído. Estas ferramentas trabalham com as seguintes variáveis:

1. A luminância da seção do céu vista através da janela ou abertura (Figura 7).
2. O ângulo sólido associado a esta seção.
3. A capacidade da abertura de transmitir luz para o interior.
4. A área e a geometria das superfícies internas
5. As refletâncias das superfícies internas

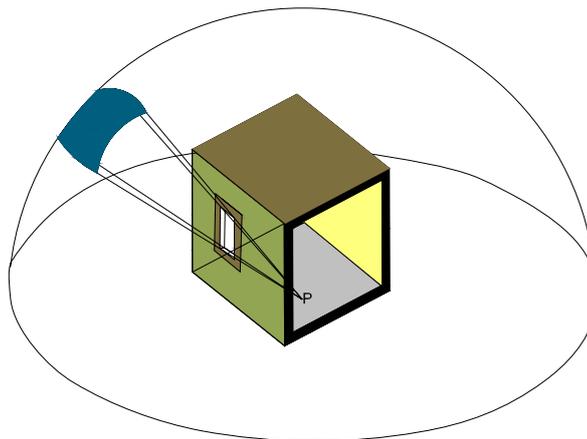


Figura 7. Luminância da seção do céu vista através da janela por um ponto P no interior do ambiente.

Atualmente, na literatura especializada de iluminação na arquitetura (IEA-TASK 31, 2005), são referenciadas três metodologias para avaliação quantitativa da luz natural:

- I. Métodos Gráficos simplificados.
- II. Simulações computacionais.
- III. Métodos experimentais com modelos físicos em escala reduzida.

Estes métodos buscam determinar os níveis de intensidade e distribuição da iluminação, partindo das relações que se estabelecem entre o exterior e o interior dos edifícios através de aberturas e janelas. Na tabela 2 são apresentadas as vantagens e desvantagens destas metodologias para análise de iluminação natural no ambiente construído (PEREIRA, 1995).

Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos métodos de análise de iluminação natural
(Adaptado de PEREIRA, 1995).

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ILUMINAÇÃO NATURAL		
Metodologias	Vantagens	Desvantagens
Métodos Gráficos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fácil aplicação. 2. Rápida análise do efeito relativo de diversos parâmetros de projeto. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análise para um ponto da cada vez. 2. Limitado por suposições teóricas inerentes a processos gráficos simplificados. 3. Limitados com relação a estudos paramétricos.
Modelagem Matemática por Computador	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rápida e flexível permitindo extensas avaliações paramétricas. 2. Pode desenvolver simultaneamente avaliações térmicas. 3. Pode ser conectada diretamente com programas de modelagem de consumo de energia. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limitada pelas suposições teóricas usualmente assumidas em algoritmos de problemas complexos. 2. Necessita de equipamento computacional adequado.
Procedimentos Experimentais com Modelos em Escala	<ol style="list-style-type: none"> 1. Muito efetiva para determinação dos níveis de iluminação internos. 2. Adequada para investigação de sistemas de aberturas complexos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pode demandar bastante tempo. 2. Limitada com respeito a estudos paramétricos. 3. Necessita de boa instrumentação fotométrica.

2.2.1. Métodos gráficos

Estes métodos trabalham com gráficos e ábacos simplificados que permitem o cálculo de DF ou de níveis de iluminação natural, para um ponto no ambiente interior. Geralmente são de fácil aplicação e permitem análises rápidas, embora a maioria deles só possa ser usadas na avaliação de salas e aberturas de geometria regular. O embasamento teórico de alguns destes métodos gráficos é a divisão do fluxo luminoso, em seus três componentes: Componente Celeste (CC); Componente Refletida Interna (CRI) e Componente Refletida Externa (CRE). Os principais métodos gráficos são: Diagramas DCRL (ABNT, 2005). Diagramas da Building Research Station – BRS (Figura 8); Ábacos (SZOKOLAY, 1980), Diagramas de Waldram, Nomogramas da C.I.E. e Diagramas de pontos (MOORE, 1986) (Figura 9).

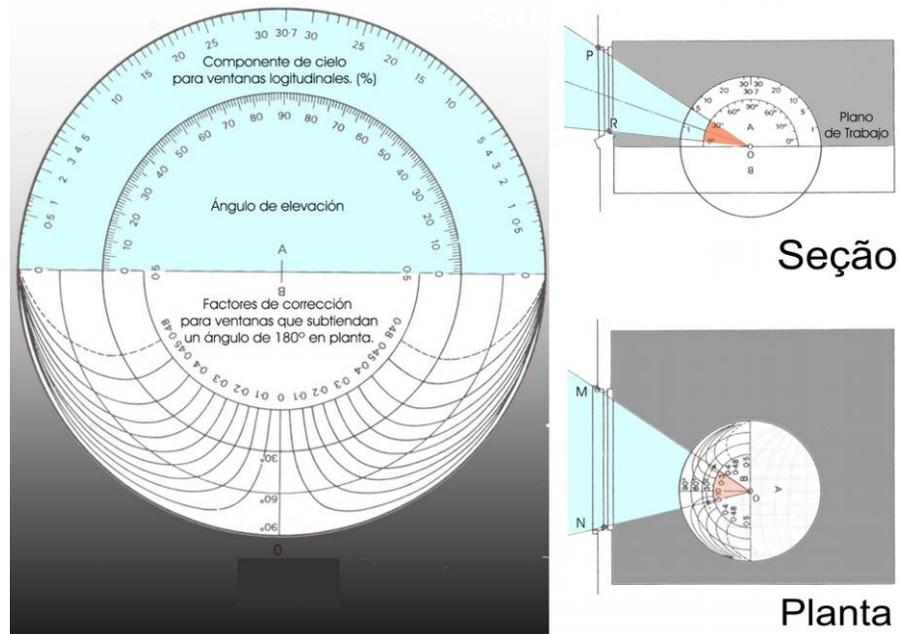


Figura 8. Aplicação dos ábacos BRS (Fonte: MAJOROS, 1998).

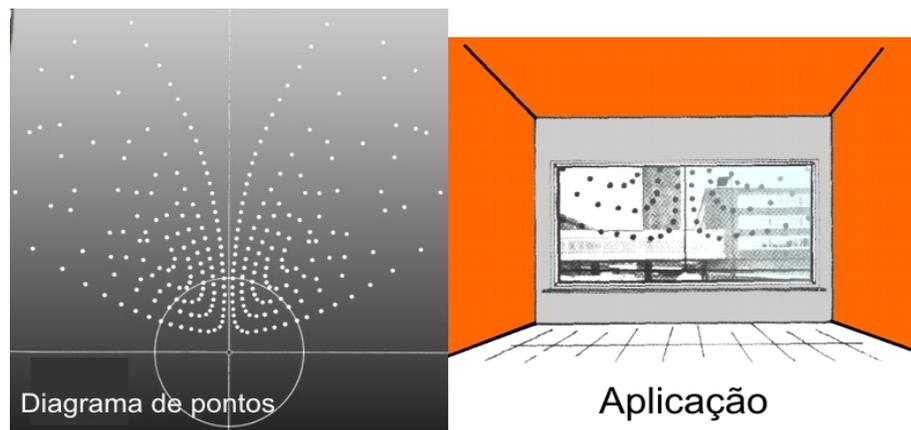


Figura 9. Aplicação do diagrama de pontos (Fonte: MAJOROS, 1998)

Entretanto, os métodos gráficos apresentam algumas limitações, como a simplicidade de sua aplicação e a metodologia de avaliação ponto a ponto para o desenvolvimento de estudos paramétricos.

A norma NBR15215-3 (ABNT 2005) apresenta um método gráfico de cálculo de iluminação, aplicando os Diagramas de Contribuição Relativa de Luz (DCRL). São diagramas que representam a projeção estereográfica da abóbada celeste, com uma subdivisão em 244 zonas (Figura 10), considerando o princípio do ângulo sólido projetado (Figura 11).

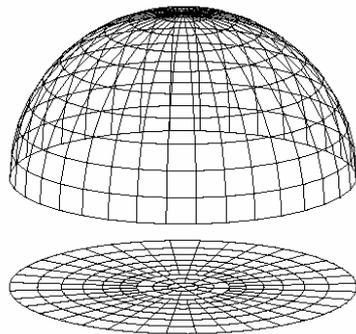


Figura 10. Hemisfera de raio unitário projetada no plano horizontal (Fonte: NBR15215-3, 2005)

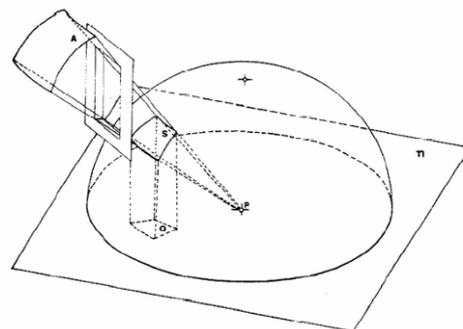


Figura 11. Princípio do ângulo sólido projetado (Fonte: SOTERAS, 1985)

Cada zona apresenta numericamente sua contribuição relativa da luminância no plano horizontal sem obstrução, em função da altitude do sol. A norma apresenta em seu anexo alguns diagramas: diagramas de fatores de forma, com subdivisões do hemisfério celeste de 10 em 10 graus; diagramas de distribuição de luminâncias para céu claro e céu encoberto, para as altitudes solares de 15 a 90 graus; e diagramas para análise de obstrução e geometria de insolação para altitudes solares a cada 10 graus.

O desenvolvimento do procedimento apresentado na norma NBR15215-3 (ABNT, 2005) possibilita o cálculo das condições de iluminação geradas por diferentes tipos de céus. Neste cálculo também é integrada a posição do sol e sua relação com a iluminação em cada ponto interior analisado, partindo dos DCRL, calculados com as latitudes das cidades brasileiras. A figura 12 apresenta o uso destes diagramas da norma NBR15215-3 (ABNT, 2005).

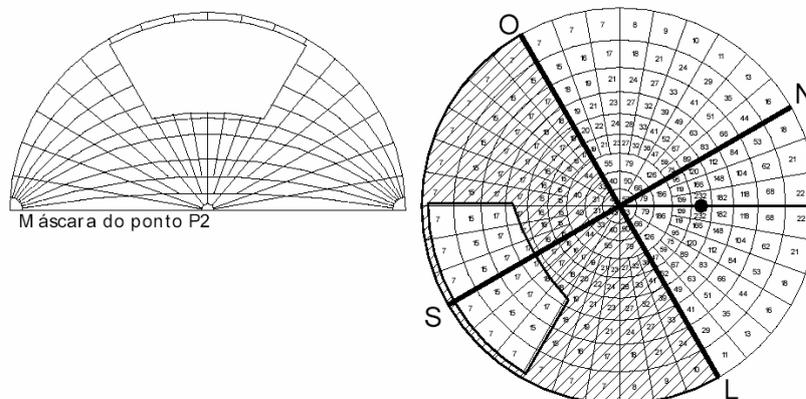


Figura 12. Superposição da máscara de obstrução sobre o DCRL (abertura para Sul).

A desvantagem deste procedimento são os cálculos desenvolvidos para um ponto de cada vez, no interior dos projetos, limitando o desenvolvimento de estudos paramétricos. Por isso os arquitetos devem considerar a avaliação de pontos estratégicos e representativos dos projetos, de acordo com o desempenho da iluminação natural.

2.2.2. Métodos analíticos

Os métodos matemáticos ou analíticos surgiram a partir da consideração teórica do comportamento do fluxo luminoso. Estes métodos geram dados de iluminação com equações analíticas ponto por ponto, no interior de um espaço, partindo de determinadas características do céu. Alguns métodos analíticos são: Daylight Coefficients (TREGENZA, 1983), Fatores de Configuração Luminosa (CABEZA, 1992) Método Lumem, Método Total Flux (MAJOROS, 1998).

Nestes métodos a iluminação da seção visível do céu é calculada indiretamente como uma porção da iluminância difusa horizontal, geralmente de um céu encoberto. O ângulo sólido é traduzido como uma relação entre a área e a distância da abertura até o ponto considerado (SOUZA, 2004). A consideração das áreas e geometria das superfícies internas é determinada pelas suas relações dimensionais com o ponto analisado. Estes métodos apresentam fatores de correção como a transmissividade de vidros e a refletividade média das superfícies interiores (SOUZA, 2004).

2.2.3. Modelagem por computador

A modelagem por computador foi a evolução dos métodos matemáticos. Este método converte o fluxo luminoso em algoritmos computacionais que otimizam o processo de cálculo dos numerosos dados considerados nos métodos analíticos (TREGENZA, 1993; MAJOROS, 1998; SZOKOLAY, 2004; ROY, 2000; IEA-TASK 31, 2005).

O desenvolvimento da tecnologia da informática, nos últimos 25 anos, tem permitido uma geração rápida de programas de cálculo e modelagem da iluminação para seu uso no projeto arquitetônico. Estes programas permitem as simulações de iluminação no ambiente construído através da realização de inúmeras trocas da

radiação visível entre as superfícies do modelo com cada tipo de céu. Os programas computacionais apresentam precisão relativa, velocidade de processamento de dados, e a possibilidade de modelar as geometrias mais complexas da arquitetura.

Os programas computacionais se apóiam no método da radiosidade para os intercâmbios de luz difusa. Também existe o método de traçado de raios denominado “*Ray Tracing*”, que é usado para a visualização final do projeto simulado, sem influenciar os cálculos quantitativos da luz. Na atualidade existem programas como o *Lightscape*, *Rinos*, *3D Max Studio*, *Ecotec*, *Archi CAD*, *Superlite*, *TropLux* (CABUS, 1999) e o *APOLUX* (Figuras 13 e 14), desenvolvido no LabCon-Arq-UFSC (CLARO, 1999).

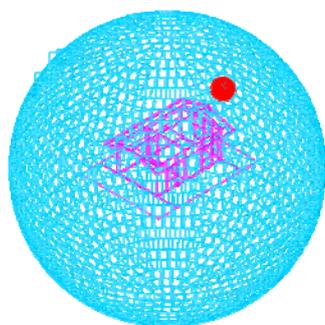


Figura 13. Globo com partições da abóbada.
(Fonte:CLARO,1999)

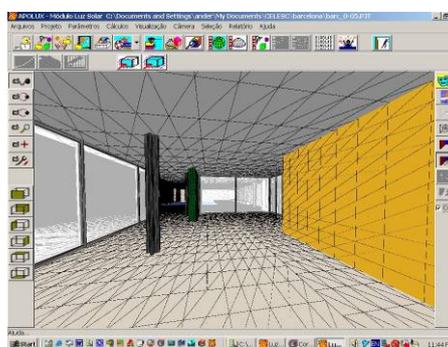


Figura 14. Partições do modelo digital para cálculos de iluminação por radiosidade (Fonte: CLARO, 1999)

2.3. Estudos de iluminação natural com modelos físicos

O Prof. Christian Bartenbach, fundador do laboratório *Bartenbach LichtLabor* em Munique, Alemanha, ressalta: “*O ambiente interior simulado com modelos em escala reduzida, permite visualizar tridimensionalmente a iluminação sob qualquer condição de luz, brilho e características reais das superfícies. Este método é muito superior que qualquer simulação digital disponível hoje*” (BARTENBACH, 2006).

2.3.1. Considerações iniciais

A construção de modelos físicos, em escalas reduzidas, embora tentada anteriormente por Arquimedes, Leonardo Da Vinci e outros estudiosos só foi possível após da Teoria da Semelhança Mecânica formulada por Isaac Newton e do Teorema de Bridgman (CARNEIRO, 1996).

Este cenário existente até a década de 70 inicia seu processo de evolução com o desenvolvimento de modernas ferramentas de medição e o uso de calculadoras portáteis para agilizar os dados coletados nos ensaios em modelos físicos (HOSSDORF, 1972). A partir daí, pode-se falar de três ferramentas distintas, usadas para a análise e a simulação em problemas de engenharia:

1. A análise clássica com régua de cálculo e calculadora de mesa.
2. O computador eletrônico de programa dirigido.
3. A técnica experimental com modelos físicos.

Um dos principais obstáculos encontrados na simulação com modelos físicos, durante décadas, foi o ceticismo de alguns profissionais, que fizeram desta opção um território órfão. Enquanto os cálculos analíticos são exatos, os ensaios utilizando modelos apresentam constantemente resultados de medições não muito seguras, sendo afetados pela dispersão dos dados. Os argumentos para a inutilidade dos modelos físicos são (HOSSDORF, 1972):

1. A precisão dos resultados das medições obtidas nos ensaios com modelos, em muitos casos, não cumpre com as expectativas dos pesquisadores.
2. A construção dos modelos, a realização dos ensaios e obtenção dos resultados, exige, em alguns casos, muito tempo.
3. O fator econômico para a execução dos ensaios.

Os campos de aplicação de cada um destes métodos são apresentados na figura 15, onde se delimitam os fatores como o custo relativo, as limitações de trabalho, o nível de dificuldade e a frequência de projetos para o estudo de uma forma quantitativa, de problemas de engenharia (HOSSDORF, 1972).

Neste diagrama são apresentados, nas linhas das ordenadas, os trabalhos referidos à importância das obras em função do grau de complexidade do projeto. Nas linhas abscissas apresentam-se qualitativamente dois pontos limites: o primeiro é determinado pela limitação do conhecimento teórico sobre os diferentes problemas de engenharia (possibilidade analítica), e o segundo, o limite absoluto, é representado pela possibilidade física. A partir deste limite é possível ainda imaginar soluções, embora não seja possível a sua construção.

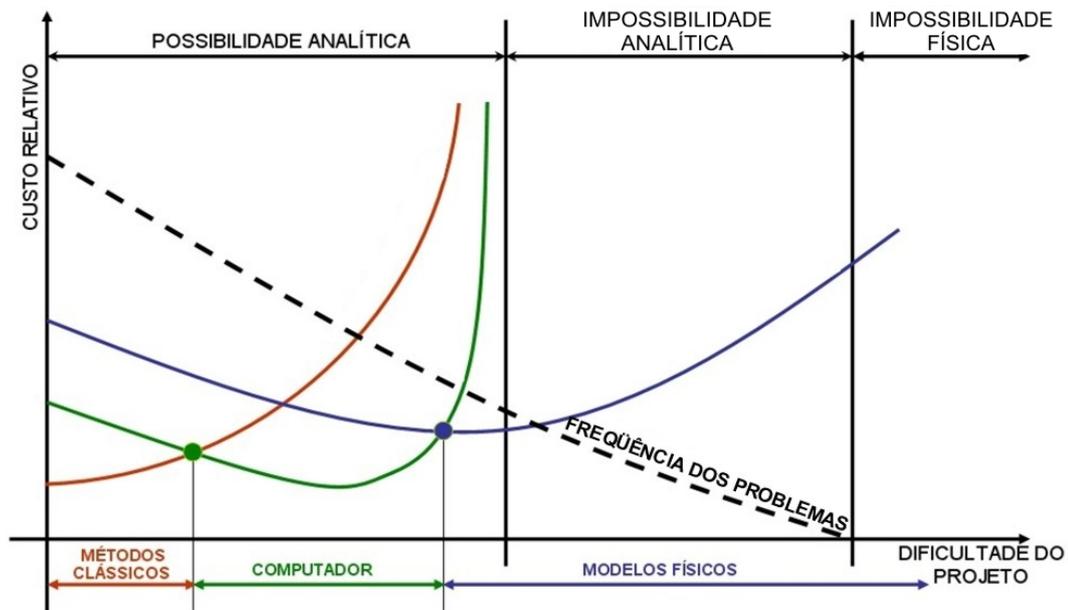


Figura 15. Esquema de operação dos três métodos de análises propostos para a solução de problemas de engenharia, na década de 70 (Fonte: modificado de HOSSDORF, 1972).

Com a régua de cálculo e a calculadora de mesa, se solucionaram durante muitos anos, de forma fácil, problemas simples. Mas o trabalho aumenta constantemente com o grau de complexidade dos problemas, superando o limite do conveniente e ascendendo até a proximidade da linha que limita o campo das possíveis soluções analíticas (CARNEIRO, 1996).

Para os problemas de média complexidade, que se repetem constantemente, os programas computacionais fornecem os resultados em uma forma mais cômoda e racional que os métodos clássicos. A solução de problemas de relativa complexidade foi possível também mediante a utilização de grandes computadores, mas obviamente com um maior investimento econômico.

Como é apresentado na figura 15, o ensaio com modelos físicos corta a curva dos computadores, onde o uso deles começa a aumentar, e ultrapassa sem perturbações o limite do campo analítico, permitindo pesquisar quantitativamente o amplo campo do “fisicamente possível”. O ensaio com modelos permite transmitir uma imagem fiel da realidade sobre o comportamento dos nossos projetos, em grande parte dos fenômenos da natureza.

Hoje os métodos analíticos são pouco usados diante do crescimento dos métodos computacionais, difundidos em diversas áreas do conhecimento, e não só

no campo da engenharia. Na arquitetura, a simulação e a representação têm sido invadidas pelas ferramentas do tipo CAD, além de uma grande quantidade programas computacionais para a avaliação de diversos tipos de projetos. Este crescimento na área da informática tem gerado adicionalmente um ambiente apto para a simulação em modelos físicos em escala, com o desenvolvimento equipamentos de medição, ferramentas de pesquisa, monitoramento de dados e a quantificação dos resultados, que permitem ensaios mais confiáveis (GONZÁLEZ e ROLDAN, 2001).

Em contraste com a figura 15, a figura 16 apresenta a tendência atual da situação das ferramentas descritas anteriormente. É possível afirmar que os cálculos por softwares propiciam um crescimento das possibilidades analíticas dentro de seu próprio limite, com redução gradual de custo e, além disso, com maior abrangência aos métodos clássicos. A régua de cálculo tornou-se uma relíquia para nossa geração, e as calculadoras de mesa continuaram seu desenvolvimento, até converterem-se em computadores portáteis ao alcance da maioria dos profissionais.

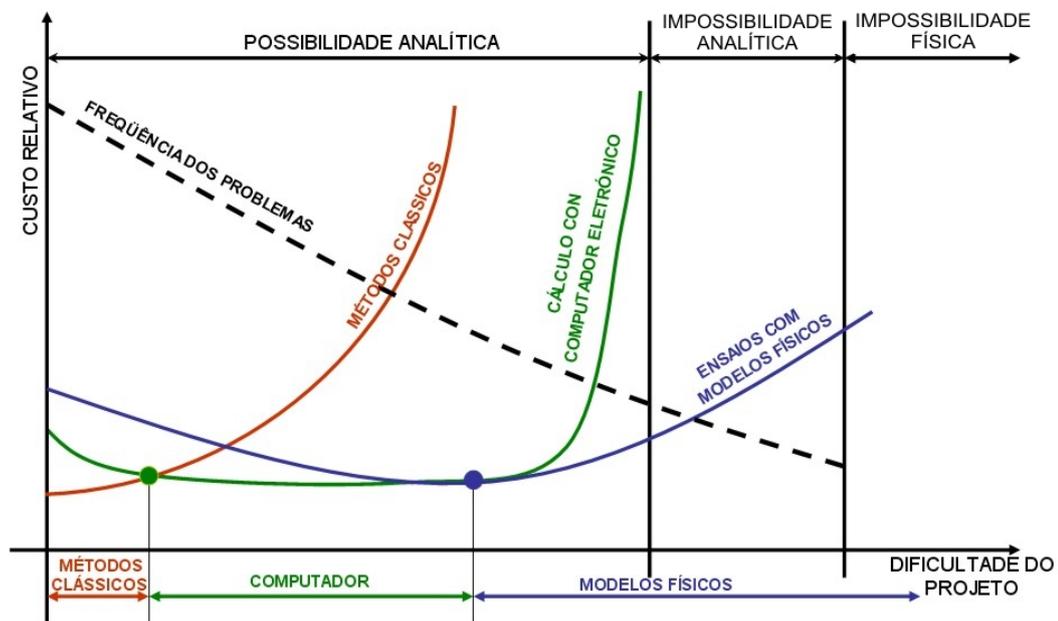


Figura 16. Esquema de operação dos métodos de avaliação quantitativa em problemas de engenharia na época atual (Fonte: GONZALEZ e ROLDAN, 2001).

A figura 16 descreve como os custos de cálculo por métodos clássicos em projetos de média complexidade são elevados frente aos métodos computacionais, e especialmente, frente aos custos dos ensaios com modelos físicos. A sustentação

teórica dos ensaios com modelos físicos em escala, tem sido amplamente aceita por parte dos engenheiros e dos físicos, nos últimos 30 anos, como complemento dos modelos analíticos, na medição de fenômenos naturais impossíveis de modelar analiticamente, como por exemplo, os movimentos sísmicos e as suas conseqüências nas estruturas das edificações (Figura 17).



Figura 17. Prova sísmica de segurança num modelo de escala de uma casa de adobe (Fonte: www.corbis.com/Rogger Resmeyer. Stanford University, Palo Alto, Califórnia. USA)

Quanto aos ensaios com modelos físicos em escala, é possível notar um crescimento favorável como área de experimentação. Seu predomínio no campo da impossibilidade de análise teórico os têm reafirmado como uma excelente e necessária ferramenta de avaliação qualitativa e quantitativa (GONZÁLEZ e ROLDAN, 2001). Os modelos físicos em escala apresentam a possibilidade da integração com os métodos computacionais, favorecendo o estudo dos fenômenos impossíveis de qualificar e quantificar analiticamente. Um dos objetivos deste projeto é o estudo do fenômeno da iluminação natural na arquitetura, utilizando modelos físicos em escala reduzida (Figura 18).



Figura 18. Maquete de uma Igreja em escala 1:20 (P.V.G. Arquitectos, 2004)

2.3.2. O modelo arquitetônico: Maquete

A maquete é um dos mais conhecidos modelos de representação utilizados durante o desenvolvimento de um projeto e da obra arquitetônica. Ela faz parte do processo de criação e entendimento do espaço físico, superando a bidimensionalidade das plantas. Representa as três dimensões do espaço, e com uma correta proporção, o produto de uma idéia que tem que ser transmitida para outros profissionais e especialmente para os clientes do projeto, aqueles que em muitos casos não tem conhecimento da linguagem dos códigos e símbolos que compõem as plantas e desenhos apresentados em papel (GONZALEZ et all, 2005).

Como meio de expressão das idéias nas artes e na arquitetura, o conceito de maquete evoluiu com a cultura desde o começo da civilização (Figura 19), sendo um instrumento prático que pode ser desenvolvido e compreendido sem necessidade de formação técnica (Figura 20).



Figura 19. Maquete de uma Pagoda Chinês, data de criação. 618-907 a.c.(Fonte: © Asian Art & Archaeology, Inc/CORBIS, 2007)



Figura 20. Maquete de um Tepee, no Parque Nacional do Glacier, Montana, USA, 1950 (Fonte: © Hulton-Deutsch Collection/CORBIS, 2007)

A construção de maquetes é parte importante do processo de formação dos arquitetos nas faculdades, também é uma prática comum em escritórios de projeto, onde o estudo do espaço pode ser feito de forma ágil, com baixo custo e com bom rendimento no tempo de desenvolvimento dos projetos. O uso das maquetes na arquitetura está relacionado ao entendimento dos processos construtivos, de projetos simples e de alta complexidade.

As maquetes também contribuem para o desenvolvimento dos projetos, para quantificação de peças e elementos de fabricação ou industrialização. Os grandes mestres da arquitetura moderna, como por exemplo Louis I Kahn, Alvar Aalto, Lê Corbusier e Frank Lloyd Wright, construíram e usaram maquetes no desenvolvimento de seus projetos para estudo e apresentação final para colegas e clientes (Figuras 21 e 22).



Figura 21. Lê Corbusier. 1965 (Fonte: www.corbis.com, 2007)

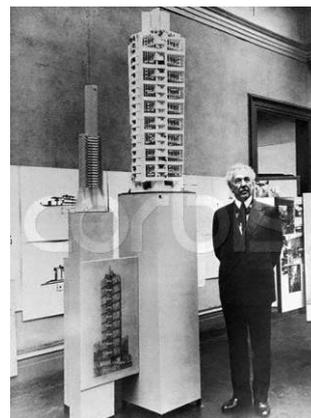


Figura 22. Frank Lloyd Wright. 9/26/1930 (Fonte: www.corbis.com, 2007)

A prática das maquetes não se limita à representação de uma imagem do projeto. As maquetes podem ser ferramentas de simulação de fenômenos físicos avaliados qualitativa e quantitativamente tais como ventilação, geometria solar, comportamento estrutural e especialmente o fenômeno da iluminação.

2.3.3. Avaliação de iluminação com maquetes.

A principal razão para construir modelos para avaliação de iluminação natural é a possibilidade de se obter respostas para questões positivas a diversos aspectos do projeto arquitetônico, relacionadas com o sistema de iluminação natural projetado. Devido ao pequeno comprimento da onda da luz em comparação às dimensões de uma edificação, seu comportamento não é afetado em consequência da escala, o que não ocorre com as ondas sonoras ou o calor, onde os fenômenos envolvidos são afetados sensivelmente pelas mudanças de dimensão. Assim, uma maquete que represente perfeitamente uma edificação real, avaliada sob idênticas condições de iluminação exterior, vai apresentar padrões de iluminação interna idênticos aos do ambiente simulado (KIM et al, 1985) (Figuras 23-24).



Figura 23. Maquete em escala 1:20 da Sala de Leitura Biblioteca EPM, Medellín.



Figura 24. Sala de Leitura da Biblioteca EPM, Medellín, fase de construção em março de 2005.

Na tabela 3 são apresentados os tipos de estudos de iluminação que podem ser desenvolvidos com modelos, os objetivos, as faixas de escalas recomendadas e os detalhes que os arquitetos devem atender, no uso desta metodologia como ferramenta de projeto.

Tabela 3. Tipos de estudos de iluminação com modelos reduzidos (Adaptado de PEREIRA, 1995)

ESTUDOS DE ILUMINAÇÃO COM MAQUETES EM ESCALA			
ESTUDO	ESCALA	OBJETIVO	DETALHES
MODELAGEM DO ENTORNO	1:500 - 1:100	Formular a resposta das edificações ao seu entorno: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelar as condições locais de acesso a luz natural e distribuição dos edifícios. ▪ Modelar condições de céu claro, encoberto e luz solar. ▪ Modelar diferentes configurações volumétricas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geometria da edificação e entorno. ▪ Refletâncias das Superfícies do entorno e edificações adequadas. ▪ Aberturas desenhadas nas fachadas.
FORMATO DE ABERTURAS	1:50 - 1:30	Desenvolver o envoltório para analisar exigências internas diante das condições externas: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelar formas e tamanhos das aberturas para avaliar seu desempenho luminoso. ▪ Modelar outros sistemas (estrutural, ar-condicionado) para avaliar sua integração com diferentes aberturas. ▪ Modelar formas de superfícies interiores e avaliar sua habilidade em distribuir luz natural. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisão na geometria dos componentes do edifício e divisórias internas. ▪ Precisão na geometria dos sistemas de aberturas. ▪ Refletâncias Precisas.
TRATAMENTO DO ENVÓLTORIO	1:25 - 1:15	Modificar o projeto de iluminação natural através de detalhes de envoltório: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelar elementos acessórios das aberturas para avaliar seu efeito na admissão de luz natural. ▪ Modelar envidraçados. ▪ Modelar efeito de cortinas, persianas, etc. ▪ Modelar sistemas de iluminação artificial. ▪ Determinar níveis de iluminação para adequação de sistemas de controle de iluminação artificial. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detalhes precisos dos elementos das aberturas e fontes de luz. ▪ Todo o interior deve ser modelado com o maior detalhe possível. ▪ Esquadrias devem mostrar os detalhes construtivos ▪ Mobiliário importante deve ser adequadamente modelado.
AMBIENTE INTERNO	1:10 ou maior	Modelar a réplica exata dos detalhes do interior e características espaciais.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelar o mais precisamente possível os detalhes

2.3.3.1. Estudos qualitativos

A obtenção de informação qualitativa do funcionamento da iluminação com uma maquete permite definir estratégias de conforto visual, além de obter uma percepção clara das características espaciais do ambiente interno (BAKER, 1993).

O estudo qualitativo parte da definição espacial de um projeto e da construção em escala reduzida de um modelo, que reproduza com o maior grau de precisão possível o espaço interior. A maquete em escala reproduz de maneira simultânea todas as contribuições e características da iluminação natural no interior de um espaço arquitetônico, não só pela admissão da luz direta através das aberturas do edifício, mas também pela reflexão nas superfícies internas e externas adjacentes do mesmo. Devem ser consideradas a geometria e as características das aberturas luminosas, as cores e as texturas dos acabamentos em paredes, tetos e pisos do projeto (Figura 25).



Figura 25. Maquete em escala 1:20 da sala de leitura da Biblioteca Pública de EPM, Medellín. 2004

Quando se fazem avaliações e simulações de iluminação com maquetes em escala, a realidade é modelada instantaneamente, no momento em que a maquete é exposta a um céu natural ou artificial. O funcionamento do sistema de iluminação no interior da maquete é possível de ser visualizado e avaliado, de uma forma efetiva e ágil dentro do processo do projeto, que evolui com as mudanças e acabamentos de detalhes. Avaliações qualitativas podem ser feitas diretamente com a observação direta e/ou levantamento de imagens com fotografia (ROBBINS, 1986).

Como ferramenta de projeto, qualitativamente é possível avaliar as características da iluminação no interior das maquetes, identificando zonas de contraste, zonas com excesso ou deficiência de luz e desempenho das aberturas, além de simular também fechamentos translúcidos e demais componentes do sistema de iluminação, como pode ser observado, na figura 26 o interior da maquete de uma igreja (Figura 26).



Figura 26. Estudo de luz e sombra no interior de uma maquete 1:20 de uma igreja.

O estudo da iluminação com maquetes permite trocas de peças de mobiliário, superfícies interiores e alterações nas características das aberturas luminosas, permitindo a avaliação do projeto de forma imediata (Figuras 27 e 28).



Figuras 27-28. Estudo qualitativo de iluminação no projeto de uma cozinha. Escala da maquete 1:15

2.3.3.2. Estudos quantitativos

A fotometria em modelos em escala é uma técnica estabelecida e usada no projeto de iluminação natural há muito tempo. Dados quantitativos medidos em maquetes permitem avaliar a eficiência da iluminação natural, para atender exigências visuais e fazer projeções sobre as necessidades de reforço com iluminação artificial (BAKER, 1993).

Sua aplicação como ferramenta de avaliação quantitativa de iluminação natural, só pode ser considerada a partir do desenvolvimento de equipamentos de monitoramento e levantamento de dados de luminância e iluminância que possam ser integrados às maquetes. As maquetes permitem avaliar diversas geometrias de aberturas e espaços complexos, de maneira bastante confiável (Figuras 29 - 30).

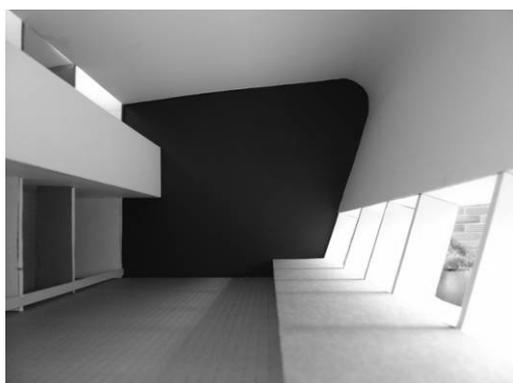


Figura 29. Iluminação natural numa maquete em escala 1:20. Biblioteca de EPM, Medellín.



Figura 30. Processo de construção da Biblioteca EPM, Medellín, Março de 2005.

Entretanto, deve-se considerar que para o desenvolvimento de avaliações quantitativas precisas, é necessário contar com instrumentação fotométrica adequada, aspecto que pode limitar este exercício só a laboratórios especializados e grandes escritórios profissionais, pelo custo dos equipamentos. Este método também requer tempo elevado para o desenvolvimento das avaliações (MOORE, 1984; SCHILER, 1987).

2.3.4. Precisão e erros do método

Muitos autores fornecem sugestões sobre a construção de maquetes em escala, para avaliações quantitativas de iluminação natural, tanto para modelos simples como para projetos de elevada complexidade. Além dos aspectos

apresentados na tabela 4, Littlefair (1989) fornece uma lista de considerações importantes do processo de construção e medição destes modelos:

1. Todas as superfícies do projeto devem estar presentes, modelos seccionados não são adequados;
2. O acesso ao interior das maquetes deve ser facilitado;
3. As refletividades das superfícies devem ser adequadas;
4. O modelo não pode apresentar vazamentos de luz;
5. As obstruções externas devem ser modeladas com tamanhos e refletividades corretas;
6. Os detalhes das aberturas devem ser construídos adequadamente;
7. A escala deve ser adequada (não menor do que 1:50);
8. As posições das medições devem ser planejadas com antecedência;

Tabela 4. Fatores de erro do método de avaliação quantitativa de maquetes.

(Fonte: THANACHAREONKIT et al, 2005)

FATORES DE ERRO DO MÉTODO EXPERIMENTAL COM MAQUETES EM ESCALA		
Autores	Fatores Físicos	Divergência Relativa da Maquete Vs Edificação
Schiler (1987)	Detalhes da maquete. Refletâncias das superfícies. Vazamentos de iluminação.	
Love - Navvab (1991)	Calibração dos luxímetros Refletâncias das superfícies Reprodução da maquete Detalhes das aberturas Tamanho dos sensores Faixas de medição dos sensores Posicionamento dos sensores	Entre + 30% a + 50%
Cannon - Brookes (1997)	Exatidão dimensional Propriedades fotométricas Refletâncias das superfícies Transmitâncias das janelas Manutenção e limpeza	Entre + 10% a + 25%
Mardaljvic (2002)	Exposição a céus naturais Tamanho dos sensores Posicionamento dos sensores Calibração dos sensores	+ de 50 sob Céus Encobertos
	Faixas de iluminação elevadas Sensibilidade a deslocamentos Precisão e tempo de resposta dos equipamentos	Entre + 100% e + 250% Sob Céus claros

Atualmente muitos pesquisadores, segundo THANACHAREONKIT et al (2005) consideram que os erros da imprecisão na construção de maquetes possam ser elevados, mas estes são mais freqüentes quando as maquetes são expostas a condições de céus reais. Sob céus artificiais os erros são menores, fazendo com que este método seja competitivo em sua qualidade, frente a outros métodos de avaliação quantitativa de iluminação natural.

Os erros de avaliações com maquetes sob céu real encoberto podem ser superiores a 50%. Para céus claros são estimados erros entre 100% e 250% entre a maquete e o edifício construído. Sob céus reais ocorre uma maior dependência dos fenômenos ambientais, com variabilidade maior nos níveis de iluminação (MARDALJEVIC, 2002). Na tabela 4 são apresentados os principais fatores do erro para avaliação quantitativa de iluminação com maquetes em escala.

Ainda que os fatores expostos na tabela 4 possam induzir o erro nas avaliações feitas sob um céu artificial, estes ambientes controlados têm como objetivo fornecer faixas de iluminação apropriadas para as fotocélulas usadas nos testes, e manter os níveis de iluminação constantes.

2.3.5. Ambientes de exposição

Os testes de iluminação com maquetes em escala podem ser desenvolvidos sob céu real ou sob céu artificial. Para avaliações qualitativas, os testes sob céu real são recomendados pela distribuição das suas luminâncias, reprodução das cores e a qualidade que apresenta a luz dia, proveniente da abóbada celeste.

Os testes qualitativos de iluminação sob céus reais permitem fazer avaliações conjuntas da incidência solar nos projetos, usando-se um relógio solar construído para a latitude do local do projeto. Assim, é possível verificar de forma simples o trabalho conjunto e a efetividade dos sistemas de iluminação e controle da radiação solar direta.

Para avaliações quantitativas de iluminação, as condições de variabilidade do céu podem afetar consideravelmente o levantamento de dados de iluminação no interior das maquetes. A variabilidade das luminâncias medidas da abóbada celeste pode ser de até 15%, mesmo em dias aparentemente idênticos (MOORE, 1984).

Esta condição introduz nos estudos de iluminação a dependência do fenômeno climático, sendo pouco efetivas essas análises em função do tempo necessário para o seu desenvolvimento.

Como resposta a esta situação são propostos céus artificiais, ambientes que simulam a distribuição das luminâncias de forma similar a um céu real, em geral para as condições de céu claro e/ou encoberto (EVANS, 1997).

Os céus artificiais complementam o desenvolvimento de avaliações quantitativas de iluminação natural, por serem ambientes com iluminação controlada. Estes equipamentos têm sido desenvolvidos em centros de pesquisa e escolas de arquitetura para aplicações acadêmicas e profissionais. Existem diversos modelos de céus artificiais, e quanto a sua forma podem ser classificados em dois tipos: Hemisféricos e Retangulares (NAVAAB, 1981; MOORE, 1984; COOKSY et al, 1989; BODART, 2004).

2.4. Classificação do céu para estudos de iluminação natural

Para o estudo de iluminação natural existe uma série de definições padronizadas das classes de céus reais. O interesse desta definição é estabelecer modelos de céus caracterizados como principal fonte de origem da luz, para serem integrados em avaliações de iluminação gráficas ou analíticas (SOUZA, 2004).

O programa IDMP, *International Daylight Measurement Programme* (Programa Internacional de Medição de Iluminação Natural), foi criado no ano 1985 pelo comitê técnico 3.07 da *Commission Internationale de L'Eclairage* (C.I.E.), para a instalação de estações de medição de luz natural. Este esforço foi assumido por diversos países e institutos de pesquisa para a obtenção das grandezas necessárias para a caracterização do fenômeno da iluminação natural externa. Hoje, o comitê técnico 3.25 da C.I.E. tem a responsabilidade de manter as informações relativas da rede IDMP, composta por 48 estações oficiais em todo mundo, disponíveis na página <http://idmp.entpe.fr> (IDMP, 2001).

Os dados medidos pelas estações IDMP permitiram o desenvolvimento de modelos matemáticos, segundo a disponibilidade de luz natural, para descrever o

fenômeno da iluminação natural externa. Aplicando modelos de eficácia luminosa e a descrição das distribuições de luminâncias, em função do tipo de céu e altura solar, os dados medidos são utilizados para outras localidades onde não são medidas as quantidades luminosas (SOUZA,2004). A definição e classificação dos tipos de céus é desenvolvida pela C.I.E, considerando as seguintes definições:

1. A luz difusa, ou luz do dia, se classifica como a iluminação de um céu encoberto por nuvens, e refletida pela atmosfera.
2. A luz solar é a iluminação de um raio direto de sol, não obstruído pelas nuvens.

2.4.1. Modelos analíticos de iluminação da C.I.E¹.

Segundo a norma da C.I.E. “*SPATIAL DISTRIBUTION OF DAYLIGHT - CIE STANDARD GENERAL*”, a distribuição da luminância do céu depende do horário e do clima, mudando durante o dia com relação à posição do sol. A C.I.E. apresenta uma lista de 15 tipos de céus classificados segundo a distribuição das luminâncias, que modelam o céu sob uma grande variedade de condições, desde um céu encoberto até um céu claro (C.I.E., 2003). A definição destes padrões tem dois propósitos:

1. Ser uma base universal para a classificação de distribuições de medidas de luminâncias do céu.
2. Fornecer um método para o cálculo da luminância de céu em procedimentos de projeto de iluminação natural.

As distribuições relativas de luminâncias são definidas como: “*A luminância do céu em qualquer ponto em função da luminância do zênite*”. O padrão incorpora o Padrão C.I.E. para Céu Claro e para Céu Encoberto, que são considerados como casos particulares de um céu geral.

As distribuições das luminâncias dadas apresentam as seguintes características:

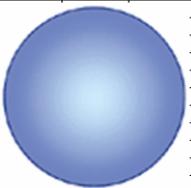
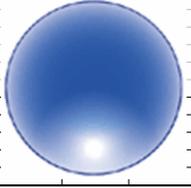
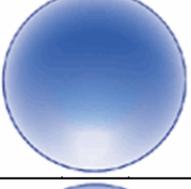
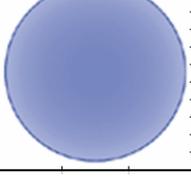
¹ ISO/FDIS – 15469 – CIE S 011/E Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky. INTERNATIONAL STANDARD, 2003-07-17

1. São simétricas próximas do meridiano solar, e são funções da distância angular entre o elemento do céu e o zênite (Z) e da distância angular entre o sol e zênite (Z_s) medidas ambas em radianos.
2. São definidas por funções contínuas simples. Estas distribuições são típicas de céus sem nuvens e daqueles que apresentam uma cobertura de nuvens homogêneas.
3. A luminância relativa em qualquer ponto no céu depende do ângulo, entre esse ponto do céu e o sol, e no ângulo Z , entre o elemento do céu e o zênite.

2.4.2. Classificação dos céus

Dos 15 tipos do céus definidos pela C.I.E., na tabela 5 são apresentados os 4 céus básicos: Encoberto, Claro, Intermediário, Uniforme.

Tabela 5. Classificação dos tipos do Céu definida pela C.I.E

Céu encoberto	A luminância de um céu encoberto é menor no horizonte do que no zênite. Este tipo de céu resulta de refração/reflexão da luz direta do sol (em todos os comprimentos de onda) em grandes partículas de água em suspensão na atmosfera.	
Céu claro	A luminância do céu claro padrão da C.I.E. tem variação sobre a altitude e o azimute. É mais brilhante perto do sol e mais débil no lado oposto frente a ele. O brilho do horizonte varia entre esses dois extremos	
Céu intermediário	O padrão do céu intermediário da C.I.E. é uma variante, algo nebulosa do Céu Claro. O sol não é brilhante como no céu claro e as mudanças de brilho não são drásticas	
Céu uniforme	A luminância de um céu uniforme padrão da C.I.E., apresenta uma distribuição espacial homogênea.	

2.4.3. Céu encoberto padrão da C.I.E.

O céu encoberto definido pela C.I.E como *Standard Overcast Sky* é aquele tipo de céu considerado como padrão para os estudos de iluminação e cálculo dos

fatores de luz natural DF. Também é considerado como o modelo ideal para a calibração dos céus artificiais. Para a definição de um céu encoberto padrão, segundo a C.I.E. são considerados alguns pontos:

1. O brilho do zênite em relação ao horizonte deve ter uma relação de 1 a 1/3, matematicamente representado pela seguinte equação:

$$L(\theta) = L_z * (1 + 2*\sin(\theta))/3$$

2. Este brilho deve apresentar-se em todas as direções do hemisfério.

Este modelo de céu representa a distribuição de luminâncias de um céu real, densamente encoberto por camadas de nuvens. Esta situação ocorre de maneira constante, independente do local, do clima, do dia e da hora (KITTLER, 1994), ainda que alguns aspectos sejam questionados por muitos pesquisadores, como a uniformidade azimutal, a exclusão absoluta da incidência solar, e a gradação estabelecida do padrão da C.I.E. para céu encoberto (SOUZA, 2004).

2.5. Céus artificiais

Um céu artificial deve simular a distribuição da luminância de um céu real, com o objetivo de possibilitar a realização de ensaios de iluminação utilizando modelos físicos em escala reduzida. Existem duas classes de céus artificiais definidos segundo a sua forma: os céus de cúpula hemisférica e os céus retangulares. A validação dos céus artificiais determina-se pela reprodução das distribuições das luminâncias dos céus padronizados pela C.I.E.

2.5.1. Céus hemisféricos

Os primeiros céus artificiais de cúpula hemisférica foram construídos na década de 70 nos Estados Unidos, pelas possibilidades de simular as condições de luminâncias de um céu real (NAVVAB, 1996). A qualidade destes tipos de céus superou a inquietude de sua construção, questionada pelos consumos energéticos, numa época com custos de energia elevados. Estes céus apresentavam duas formas de distribuição da iluminação; luz projetada abaixo do horizonte (Figura 31) e luz transmitida através de um difusor (Figura 32).

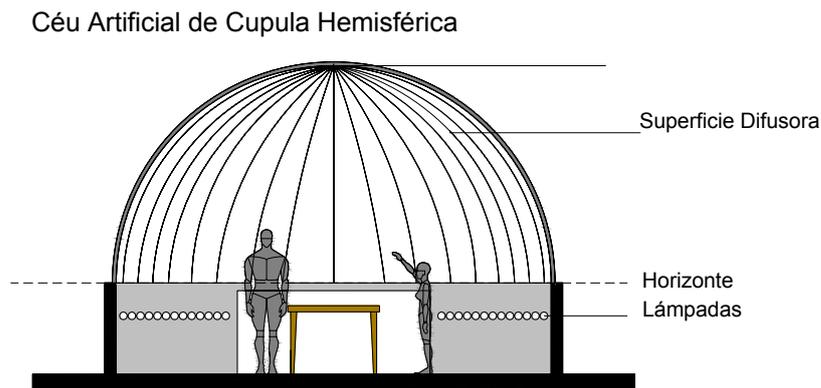


Figura 31. Céu hemisférico por Reflexão. A origem da iluminação está abaixo da linha do horizonte.

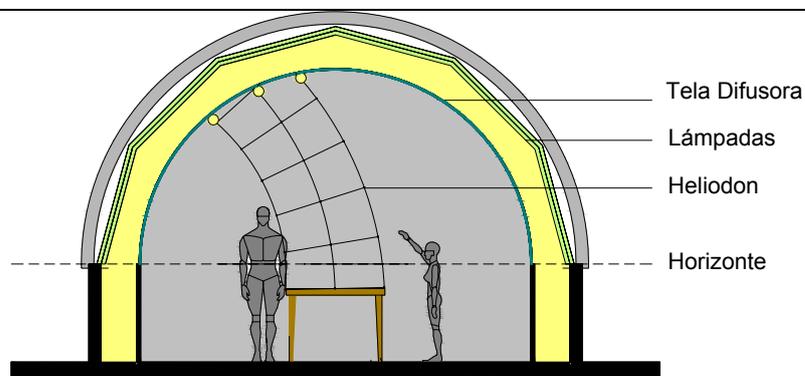


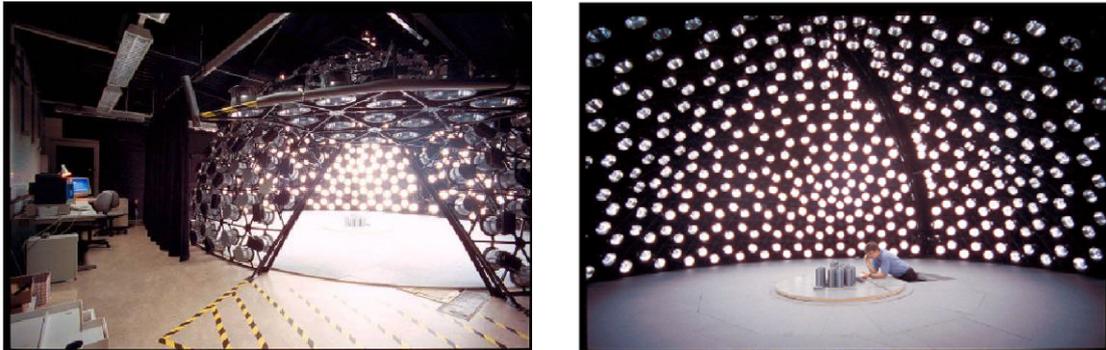
Figura 32. Céu Hemisférico por Transmissão. A origem da iluminação está atrás da tela difusora.

Os critérios de funcionamento e algumas características desta ferramenta são:

1. Simulação dos modelos de céu claro e encoberto padronizados da C.I.E.
2. Distribuição de luminâncias com erro mínimo no horizonte.
3. Simulador do sol, com possibilidade de representar todos os movimentos deste, com uma projeção uniforme dos raios (Figura 32).
4. Controle de sistema de iluminação por computador
5. Refletância variável do chão.
6. Fotometria e capacidade de registro dos dados em memória.
7. Sistema de vídeo para registro permanente das simulações.

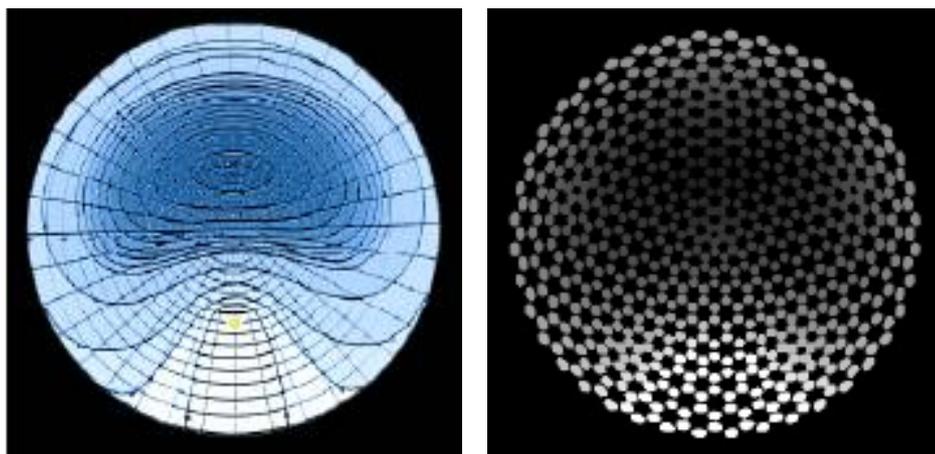
Atualmente tem sido utilizada a instalação de lâmpadas em uma estrutura geodésica, que iluminam diretamente os modelos em escala reduzida. Os benefícios

deste tipo de céu são reconhecidos por pesquisadores e faculdades de educação, pela qualidade de seu funcionamento e a possibilidade de integrar nos estudos de iluminação com maquetes, o fenômeno solar, sendo esta uma das principais características do céu artificial do *Welsh School of Architecture Centre for Research in the Built Environment. Architectural Science Research Group* da Universidade de Cardiff no Reino Unido (ALEXANDER, 2000) (Figuras 33-34).



Figuras 33 - 34. Céu Artificial do Welsh School of Architecture Centre for Research in the Built Environment Architectural Science Research Group. (Fonte:ALEXANDER. 2000).

Este céu artificial é composto por um domo geodésico de 8 metros de diâmetro, que simula as condições do céu claro, céu encoberto e as condições intermediárias. Isto se consegue com 640 lâmpadas (Philisp CL 4500 °K), com controle individual que permite condições de brilho variável de 3% a 100% (Figuras 35-36).



Figuras 35-36. Céu claro padrão da C.I.E, simulado com o céu artificial da Universidade de Cardiff no Reino Unido (Fonte: ALEXANDER, 2000).

O desenvolvimento de lâmpadas de maior eficiência energética e a possibilidade de integrar sistemas de controle automatizados por computador, têm gerado céus artificiais hemisféricos de excelente funcionamento e exatidão na simulação da iluminação. Assim podem ser simuladas todas as condições possíveis do céu, com o posicionamento do sol, as nuvens, as reflexões do chão e as edificações do entorno do projeto. Este céu artificial pode simular todas as condições de clima e horário para qualquer local na terra, sendo um dos poucos céus no mundo, com a possibilidade de simulação complexa e exata.

Outro modelo de céu hemisférico construído recentemente na Universidade Católica de Louvain, Bélgica, apresenta também a integração do fenômeno do sol na simulação da iluminação exterior, para avaliação de modelos em escala reduzida (BODART, 2004). Este céu artificial foi construído segundo o modelo de distribuição de Tregenza, de 145 parcelas da abóbada celeste (Figuras 37-38).

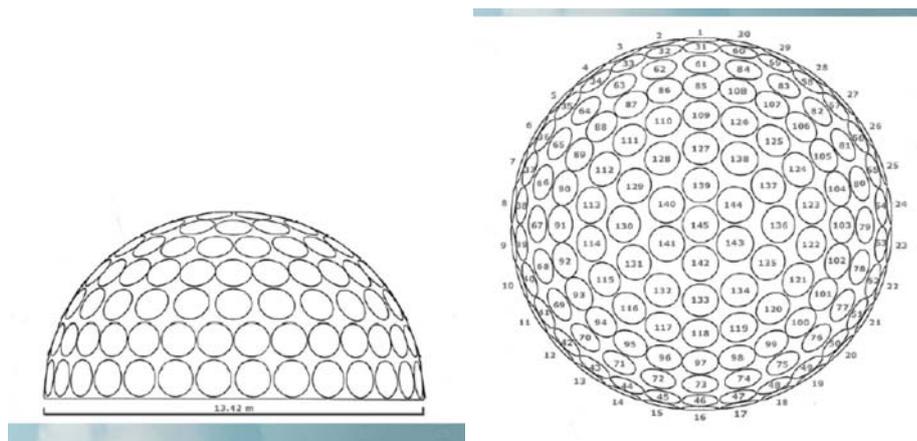


Figura 37. Modelo modificado da distribuição de parcelas no céu, proposto por P.R. Tregenza (Fonte: BODART, 2004)

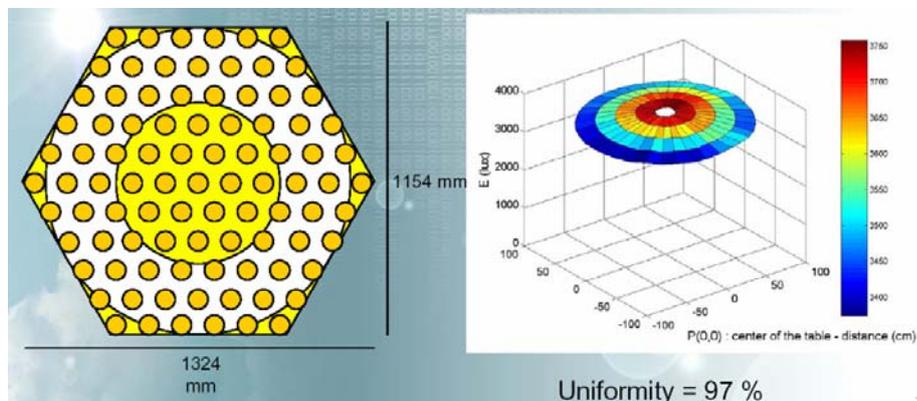


Figura 38. Disposição de lâmpadas e Uniformidade. Bélgica (Fonte: BODART, 2004)

O sistema de geração de luz deste céu é constituído por 91 lâmpadas halógenas de 12 V e 50 W, com uma abertura angular de 32°, apresentando uma uniformidade nas iluminâncias de 97 % (Figura 38). Este sistema apresenta baixo custo, redução do espaço para sua construção, fácil calibração e a possibilidade de modelar qualquer tipo de céu.

O uso de céus artificiais hemisféricos não se limita apenas a pesquisas acadêmicas desenvolvidas em centros universitários. A aplicação destes céus tem sido desenvolvida também por empresas privadas, que realizam estudos de iluminação natural utilizando modelos arquitetônicas em escala reduzida.

O céu artificial do laboratório de iluminação *Bartenbach LichtLabor* em Munique, Alemanha, construído em 2006, oferece serviços de assessoramento em iluminação eficiente, tecnologia de vidros, captação de luz natural, direcionamento de iluminação e elementos de controle solar, aplicados em projetos arquitetônicos (Figuras 39-40).



Figuras 39. Céu Artificial Bartenbach LichtLabor, em Munique, Alemanha. 2006. (Fonte: <http://www.bartenbach.com>)



Figuras 40. Modelo em escala do Palais Epstein, Viena, Áustria, Avaliado no Céu Artificial Bartenbach LichtLabor. (Fonte: <http://www.bartenbach.com>)

As principais características deste céu são:

1. Distribuição ajustável das luminâncias
2. Temperatura de cor ajustável
3. Simulação de todas as posições do sol
4. Diâmetro de hemisfério de 6 metros.

Estes céus acima exemplificados são apenas três das múltiplas referências de céus hemisféricos desenvolvidos atualmente para pesquisa de iluminação artificial e assessoramento de projetos. As diferenças entre eles são determinadas basicamente pelo tamanho da cúpula e pelo sistema de lâmpadas para geração de iluminação.

2.5.2. Céus retangulares ou “caixa de espelhos”

Os céus artificiais retangulares também são denominados de “caixa de espelhos”. Este tipo de céu artificial é um volume cúbico com um teto luminoso e paredes forradas de espelhos. Este tipo de céu se compõe geralmente de um sistema de lâmpadas acima de um forro translúcido e difuso. A distribuição das luminâncias simula um céu encoberto, brilhante no zênite e obscurecido no horizonte, pela absorção acumulativa dos reflexos repetidos da luz do teto, nas paredes forradas (Figura 41).

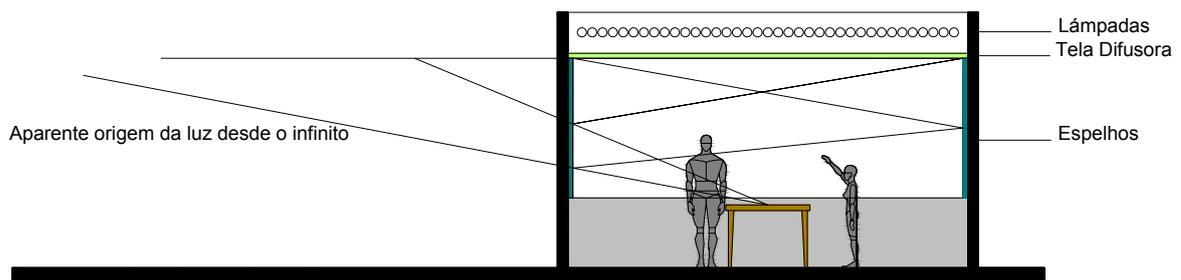


Figura 41. Princípio de funcionamento do céu artificial de caixa de espelhos.

O primeiro céu retilíneo de caixa de espelhos foi desenvolvido e construído na *Building Research Station* (HOPKINSON e KAY, 1961) e é uma alternativa de baixo custo, em comparação com os céus hemisféricos. Este céu não apresenta problemas de erro no brilho do horizonte, mas introduz outros problemas na distribuição da iluminação. Segundo Loveland (1987), as possíveis fontes de erro no funcionamento deste tipo de céus são:

1. Os reflexos gerados pelas maquetes no interior do céu durante as provas.
2. As reflexões geradas pelo fosso do céu abaixo do horizonte.
3. A distribuição da luz por parte da tela difusora.
4. A irregularidade dos espelhos nas paredes verticais.

A calibração de um céu artificial tipo “caixa de espelhos” é absolutamente necessária, para ser usado como ferramenta de avaliação quantitativa e qualitativa de iluminação com modelos em escala reduzida. Esta calibração baseia-se em dois aspectos principais:

1. Níveis adequados de iluminação que superem as faixas de atuação dos sensores fotométricos utilizados para a aquisição de dados. Assim garante-se que estes equipamentos funcionem dentro de sua capacidade exata para a maioria de dados registrados.
2. O Céu Artificial deve fornecer uma distribuição de luminâncias que simule o modelo padronizado pela C.I.E., o “*Standard Overcast Sky*”, que já foi exposto anteriormente.

2.6. Construção e calibração de céus artificiais de caixa de espelhos

Em uma sessão técnica de céus artificiais para simulação de iluminação natural, da *Passive Solar Conference* em 1989, foi determinada a necessidade de gerar padrões de projeto para a construção de céus artificiais retangulares ou de “caixa de espelhos”. Muitos céus artificiais deste tipo foram construídos nos Estados Unidos, baseados nas especificações de projeto do céu artificial da Universidade de Washington, construído em 1976. No desenvolvimento da calibração destes céus, segundo o padrão de céu encoberto da C.I.E. os resultados não foram positivos, nenhum dos novos céus atingiram a distribuição padronizada de luminâncias (COOKSY et all, 1989).

Após estes resultados e com a necessidade de construir um novo céu artificial de caixa de espelhos no Departamento de Arquitetura da Universidade de Washington, foi desenvolvida uma pesquisa para determinar novas especificações para a construção destes tipos de céus. O trabalho intitulado “*Limits of Sky*” desenvolvido por COOKSY et all (1989), avaliou a distribuição das luminâncias, as variáveis geométricas do espaço e as refletâncias das superfícies para isolar e eliminar as condições incômodas presentes nos céus artificiais de caixa de espelhos.

O trabalho apresenta uma avaliação de funcionamento de céus artificiais do tipo caixa de espelhos existentes nos Estados Unidos, considerando também as observações teóricas de pesquisadores com experiência no funcionamento e uso destes tipos de céus. Este estudo prévio gerou duas observações que encaminharam a pesquisa:

1. Muitos céus artificiais foram construídos sem avaliação previa do Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL) segundo o modelo de céu encoberto da C.I.E.; o processo estabelecido era a calibração do céu depois da sua construção, comparando os resultados da calibração com o PDL desejado, para ajustá-lo.
2. A existência de uma grande variedade de proporções entre a planta e a secção da caixa de espelhos, e de detalhes da sua construção que podem influenciar no PDL.

2.6.1. Método de avaliação do Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL)

O estudo considerou duas atividades principais para determinar a geração de um PDL análogo ao padrão do céu encoberto da C.I.E. Estas metodologias foram:

1. A construção e medição de luminâncias de um céu artificial de prova para testar materiais, formas e variáveis físicas do céu que influenciam no PDL.
2. A construção de modelos em escala reduzida, de uma edificação simples com abertura lateral e zenital, com 4 fotocélulas Li-Cor no seu interior e uma na cobertura, para a medição de iluminâncias simultâneas, que permitissem obter valores de DF.

Os valores da luminância foram testados em cada versão do céu de prova construído e igualmente foram avaliadas as iluminâncias nos modelos em escala. Os dados obtidos foram processados e analisados para determinar o PDL de cada céu avaliado, dividindo-se a luminância obtida em um ângulo de altura, pela luminância do zênite, estes valores foram expressos em percentuais. Em seguida, cada PDL obtido foi comparado com o modelo padrão da C.I.E do céu encoberto, avaliando assim seu funcionamento.

Os dados obtidos dos modelos físicos em escala, para avaliação das iluminâncias com DF(%) não foram representativos para determinar o funcionamento de cada modelo de céu com relação ao PDL desejado. Em alguns casos os resultados de uma variável de DF em relação com as luminâncias obtidas em cada céu de prova, foram contraditórios. Assim, os valores de DF foram desconsiderados para a definição de um padrão de desenho de céus artificiais de caixa de espelhos.

2.6.2. Efeitos das variáveis analisadas nos céus de prova.

As variáveis estudadas foram organizadas em grupos classificados por elementos comuns de variação do PDL:

1. Características da cavidade das lâmpadas e variações da secção definidas por diferenças na altura de chão, altura do horizonte e ângulos nas paredes (Figura 42).



Figura 42. Avaliações em seção com o céu de prova (Fonte: COOKSY et all, 1989).

2. Variações da geometria da planta: quadrada, octogonal e retangular (Figura 43).



Figura 43. Avaliações da geometria da planta do céu de prova (Fonte: COOKSY et all, 1989)

3. Variações na transmitância da tela difusora do zênite e nas refletâncias das superfícies interiores do céu, tais como a cor do chão, o tratamento do fosso, e superfícies das paredes (Figura 44).

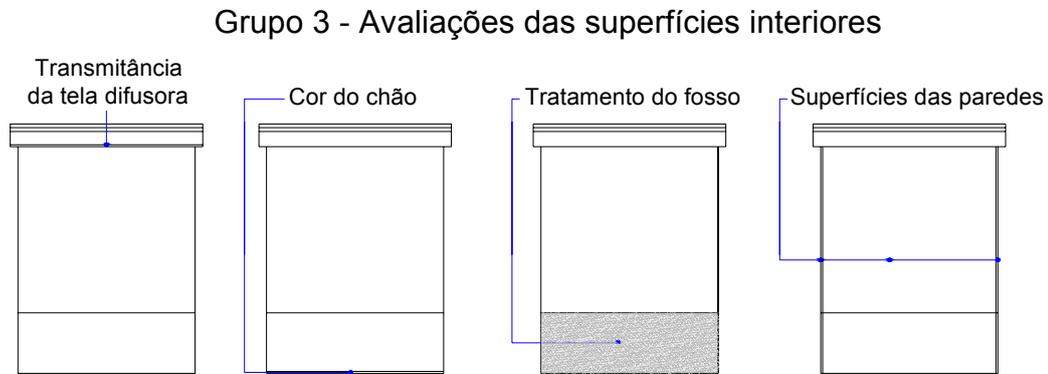


Figura 44. Avaliação das superfícies interiores no céu de prova (Fonte: COOKSY et all, 1989)

Os estudos paramétricos das variáveis avaliadas céu de prova, para determinar o funcionamento desejável do PDL, apresentaram as seguintes conclusões:

1. **Tratamento do fosso:** O tratamento do fosso anulou os efeitos da variação da cor do chão. A variação na refletância do fosso (cor branco) duplicou a luminância do horizonte do céu. Um fosso com espelhos apresentou o mesmo resultado de um acabamento cinzento. Se o fosso com cor branco fosse determinado acima da linha do horizonte (plano de avaliação baixo demais, como o chão, por exemplo) apresentaria um impacto importante na luminância do horizonte, onde as reflexões entre os espelhos são acumuladas e apresentam um brilho aparente maior até uma altura de 15 graus acima do horizonte. Um fosso acima da linha do horizonte faz perder a geração de um horizonte “infinito”, princípio básico de funcionamento do céu artificial de caixa de espelhos.
2. **Superfície das paredes:** Testes desenvolvidos com paredes brancas apresentaram uma alternativa fraca frente às paredes espelhadas. Os valores da luminância em altitudes baixas são muito pequenos, com valores muito elevados em altitudes superiores. Por isso, as paredes espelhadas são definitivamente a melhor opção para a construção dos céus retangulares.
3. **A cor do chão:** Os resultados com a cor do chão demonstraram que ela só teve importância quando o plano deste coincidiu com a linha do horizonte,

acrescentando a luminância nesta zona do céu. Esse aspecto não é desejável no padrão do céu encoberto da C.I.E., gerando um fator que pode interferir nos estudos com modelos em escala reduzida.

4. **Cavidade das lâmpadas:** Nesta pesquisa infelizmente foram testados poucas alternativas para o estudo da cavidade das lâmpadas. Uma alternativa foi construir uma cavidade de maior tamanho que a planta do céu artificial e deixar que as lâmpadas superem as paredes dos espelhos, assim é possível resolver o problema da obscuridade na união da tela difusora com a parede.
5. **Variação da seção do céu:** A variação da seção do céu foi determinada pela altura do horizonte (plano de trabalho). A altura dos espelhos é determinada pela distância entre o plano do horizonte e a tela difusora. Quando o plano de trabalho é elevado demais a luminância da tela difusora foi mais influente no PDL. Assim, com uma proporção de 1:2 entre altura e a largura da parede de espelho, a participação da tela difusora começa a ser grande demais na distribuição das luminâncias. Medições entre 60 e 90 graus de altitude estão acima de 100% do modelo padrão, enquanto que medições em 15, 30 e 45 graus apresentaram, em média, níveis bons de luminância. Uma proporção de 2:3 determinaram a altura de um plano de trabalho com um comportamento no PDL muito aproximado ao do modelo padrão da C.I.E. (Figura 45).

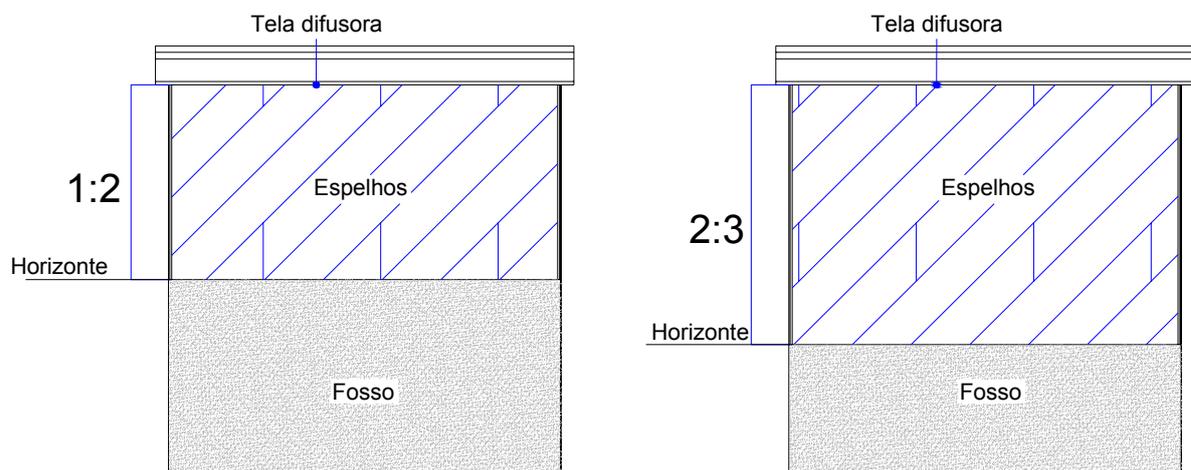


Figura 45. Altura dos espelhos e definição da linha do horizonte

6. **Transmitância da tela difusora:** Medições desenvolvidas no céu de prova com alternativas de telas difusoras com baixa, média e alta transmitância, permitiram determinar que as diferenças entre elas não estão relacionadas com o PDL de

cada céu avaliado, mas sim com o nível de intensidade da luz disponível para a medição.

- 7. Variações na planta do céu:** Os céus quadrados apresentaram um melhor PDL, frente às variações do azimute entre 0 e 90 graus. Medições desenvolvidas com céus retangulares apresentaram diferenças no azimute entre uma parede com orientação a 0 graus e uma parede com orientação 90 graus, sendo maior com o aumento do comprimento da parede (Figura 46).

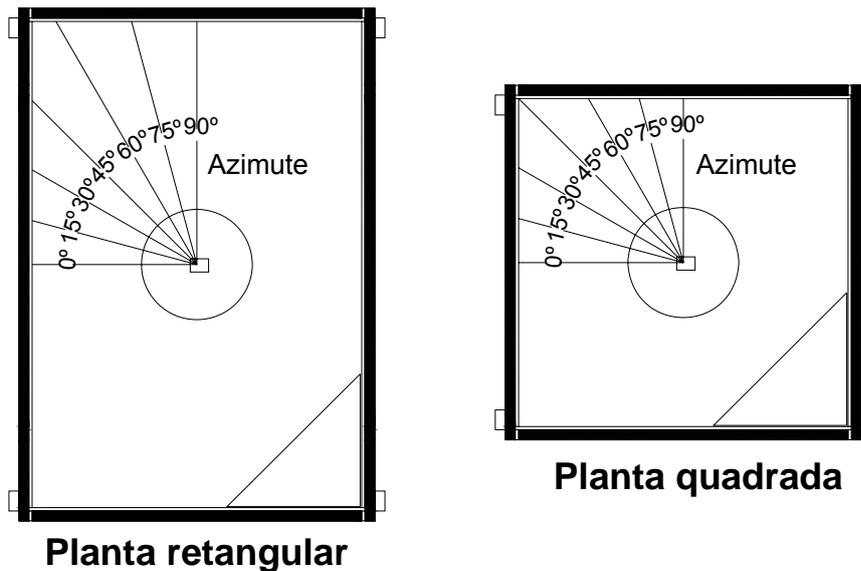


Figura 46. Avaliações de luminância em planta segundo o azimute.

Assim, as diferenças obtidas na luminância entre uma parede e outra equivale a ter duas alturas de plano de trabalho. A prova com céu de planta octogonal não foi desenvolvida com profundidade suficiente para determinar as suas características, acredita-se que possa apresentar um bom funcionamento no PDL, mas apresenta maiores complexidades técnicas na sua construção que um céu quadrado.

- 8. Medições:** As medições da luminância foram desenvolvidas com um luminômetro com registro de dados a cada 1 e 8 graus (altitude e azimute). Provas cada 1 grau são desenvolvidas para determinar irregularidades nas superfícies dos espelhos, mas isto requer muito tempo para ser desenvolvido. Já as provas a cada 8 graus, mesmo sendo mais fáceis de serem realizadas demonstraram serem suficientes para a determinação do PDL nos céus de prova avaliados.

2.6.3. Padrão de desenho e construção de um céu artificial retangular.

Todas as pesquisas e avaliações desenvolvidas no estudo “*Limits of Sky*” permitiram determinar padrões de desenho e construção para o céu artificial do laboratório *Seattle City Light*, além de estabelecer aspectos gerais para construção de outros céus artificiais. O embasamento para a definição do padrão de desenho do céu artificial foi determinado por três influências principais:

1. Análise dos dados do céu de prova;
2. As restrições do programa do Laboratório;
3. Requisitos e limitações de materiais e especificações.

Alguns elementos do projeto foram desconsiderados devido aos padrões pobres de distribuição da luminância, avaliados no céu de prova, tais como a parede branca, o chão muito elevado e as variações da base do céu. Os aspectos considerados no desenho do céu do SCL (Figuras 47-48) foram:

1. A extensão das lâmpadas na cavidade superior do céu;
2. Uma alta transmitância na tela difusora;
3. Base quadrada.



Figura 47. Exterior do Céu Artificial de Caixa de Espelhos do SCL. **Figura 48.** Avaliação de uma maquete
(Fonte: www.daylightinglab.com)

2.6.4. Calibração do céu artificial

A calibração deste céu artificial foi executada com o mesmo equipamento utilizado nas calibrações e avaliações do céu de prova. Um periscópio instalado no centro do céu artificial, na altura do horizonte (união entre o fosso e a parede de espelhos). Neste processo de calibração, a medição das luminâncias foi desenvolvida com medições a cada 15 graus alternando dados de altitude e azimute ao redor de um plano de 360 graus (Figura 49).

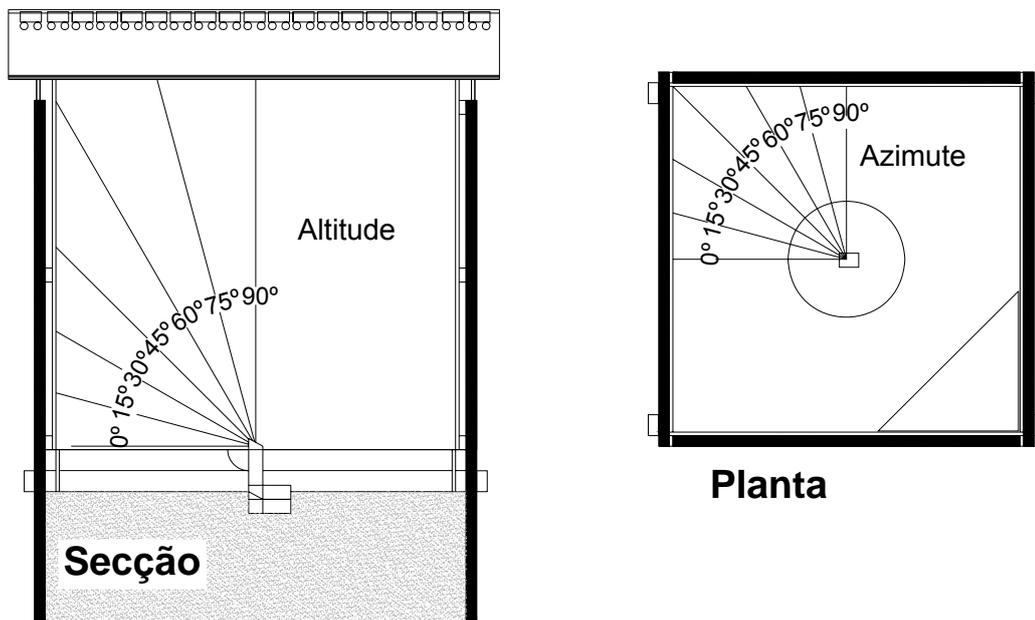


Figura 49. Medição das luminâncias para calibração do céu SCL (Fonte: COOKSY et al, 1989)

Para um melhor funcionamento do céu SCL foram acrescentadas algumas características, tais como:

1. O tratamento do fosso com materiais foscos e obscuros até 15 graus acima do horizonte, para melhorar o PDL nessa altitude, gerando melhores valores de DF com provas de modelos em escala.
2. Instalação de lâmpadas superiores para eliminar a faixa obscura da união entre a tela difusora e as paredes de espelhos.
3. Um painel branco de teto diretamente acima da instalação das lâmpadas para produzir uma qualidade luminosa melhor em todos os ângulos de azimute em elevadas altitudes.
4. Exaustão do ar quente pelo teto

2.6.5. Conclusões

Com este estudo foi possível identificar algumas recomendações para a construção e calibração de céus artificiais de caixa de espelhos:

1. Nem sempre se consegue atingir o modelo padrão do céu encoberto da C.I.E em céus de caixa de espelhos. Com a geometria deste tipo de ambientes é complicado obter um PDL exato com relação ao modelo de céu encoberto da C.I.E.
2. Uma condição de PDL aproximada ao ideal da C.I.E. pode ser atingido por este tipo de céu, e é suficientemente bom para predição de DF (%).
3. As principais características do céu para obter um PDL aproximado ao ideal da C.I.E. são: a altura da parede de espelhos com proporções entre 2:3 e 1:2 com relação a largura; plano quadrado, lâmpadas que superem a planta para diminuir as sombras da união do espelho com a tela difusora e alta transmitância na tela difusora.
4. Os vazamentos leves nos cantos e ao redor das aberturas podem ser desconsiderados.
5. A inclinação das paredes de espelhos com pequenos ângulos pode apresentar efeito no PDL, igualmente na definição do horizonte sobre um plano levemente inclinado.
6. Finalmente foi possível concluir com esse trabalho que o céu artificial de caixa de espelhos é uma boa ferramenta para o estudo da iluminação natural e sua relação com a arquitetura.

2.7. Referências de céus artificiais tipo “caixa de espelhos”

Os céus de caixa de espelhos são construídos na atualidade com maior frequência que os céus hemisféricos, devido a sua eficácia, baixos custos e o espaço que ocupam dentro dos centros de pesquisa. O sistema básico de caixa de espelhos apresenta algumas variações em seu tamanho, que limitam ou permitem o ingresso de pessoas no interior destes, para a instalação das maquetes e o levantamento fotográfico. Uma alternativa de menor custo e espaço é a construção de um céu de caixa de espelhos pequeno onde só se possa ingressar a maquete com instrumentação fotométrica.

Os céus artificiais de caixa de espelhos são disponibilizados em centros de pesquisa para assessoramento profissional a escritórios de arquitetura, além de apoiar os centros educativos que tem cursos de formação em arquitetura. Alguns dos modelos de céus mais recentes e que ofertam seus serviços de pesquisa e assessoramento são:

1. Universidade da Carolina do Norte, Charlotte. Estados Unidos (Figura 50).



Figura 50. Laboratório de Luz Natural e Tecnologia da Energia. (Fonte: [www.coa.uncc.edu.daylightin](http://www.coa.uncc.edu/daylightin), 2006)

2. Universidade Metropolitana de Londres, Inglaterra (Figura 51).



Figura 51. Interior do Céu Artificial da Unidade de Pesquisa de Arquitetura de Baixa Energia. LEARN. (Fonte: www.londonmet.ac.uk, 2007)

3. Universidade de Buenos Aires, Argentina (Figura 52).



Figura 52. Centro de Pesquisa Habitat e Energia, da Faculdade de Arquitetura Desenho e Urbanismo.

4. Universidade Nacional da Plata, Ciudad de La Plata, Argentina (Figura 53).



Figura 53. Instituto de Estudos Do Habitat, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

5. Céu Artificial de Caixa de Espelhos do LabCon-Arq-UFSC (Figura 54).

Este céu artificial está localizado no prédio do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, no Anexo 1 do Laboratório de Conforto Ambiental – LabCon. Foi construído em 2005 com o patrocínio do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) no "Projeto de Revitalização/Capacitação do LabCon-UFSC".

A construção deste céu foi feita entre março e setembro de 2005. A partir desta data, o trabalho de adequação e calibração do céu, deu início ao desenvolvimento deste trabalho de dissertação. A descrição deste céu será apresentada no capítulo 4.



Figura 54. Céu Artificial de Caixa de Espelhos do LabCon-Arq-UFSC.

Capítulo 3. METODOLOGIA

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos, as atividades experimentais e os equipamentos para o ajuste, a calibração e a avaliação de um céu tipo “caixa de espelhos”.

A partir da revisão bibliográfica do fenômeno da iluminação, da fotometria, das avaliações de iluminação com modelos em escala reduzida e de céus artificiais, foi construído o embasamento dos trabalhos experimentais que foram desenvolvidos no céu artificial, após o término da sua construção em setembro de 2005. Também foram realizadas visitas e consultas em dois centros de pesquisa com céus artificiais de caixa de espelhos localizados na Argentina: O Centro de Pesquisa Habitat e Energia CIHE-FADU-UBA, em Buenos Aires (fevereiro de 2006) (Figura 52, pág. 50), e o Instituto de Estudos do Habitat, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Nacional da Plata, em Cidade da Plata, (Outubro de 2006) (Figura 53, pág.51).

Nestas visitas foram levantados e analisados os aspectos da calibração, os erros e o funcionamento destes céus, obtidos pela experiência de sua utilização em pesquisa e ensino da iluminação na arquitetura. A valiosa colaboração dos professores John Martin Evans e Gustavo San Juan, permitiu a troca de idéias dos procedimentos de ajuste, calibração e consideração dos aspectos de funcionamento destes céus artificiais.

A partir destas informações foram caracterizados os principais requisitos de funcionamento de céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC:

1. Apresentar um Padrão de Distribuição de Luminâncias do céu artificial aproximado ao modelo analítico da C.I.E. para céu encoberto.
2. Apresentar uma distribuição das iluminâncias no plano de análise com uma adequada uniformidade, que garanta dados confiáveis para o cálculo dos Fatores de Luz Natural (*Daylight Factor - DF*).

3. Apresentar níveis de iluminação que possam ser registrados pelos equipamentos de fotometria.
4. Apresentar mínima influencia de luz proveniente do fosso sobre a reflexão gerada pelos espelhos, na altura do horizonte entre 0 e 15 graus.
5. A relação dimensional entre o céu artificial e os modelos físicos em escala reduzida deve considerar aspectos tais como o tamanho, o posicionamento e o tratamento das superfícies exteriores, para evitar possíveis fatores de erro na avaliação da iluminação.
6. Considerar aspectos da manutenção e utilização do céu que possam afetar o desenvolvimento de avaliações de iluminação, com os modelos em escala reduzida.

Considerando a necessidade de atendimento desses requisitos, foram definidas as seguintes atividades:

1. Medir as luminâncias e as iluminâncias no céu artificial de caixa de espelhos.
2. Avaliar comparativamente o PDL obtido no céu artificial, com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E.
3. Avaliar a uniformidade e os níveis de trabalho das iluminâncias fornecidas pelo céu artificial.
4. Construir uma série de modelos físicos em escala reduzida, para avaliar o tamanho, a escala, o posicionamento e o tratamento de superfícies exteriores com relação ao céu artificial.

3.2. Equipamentos de fotometria

Para o desenvolvimento das medições de luminancia e iluminancia no céu artificial de caixa de espelhos, foram utilizados os seguintes equipamentos de fotometria disponíveis no LabCon-Arq-USFC:

1. Sistema de análise fotométrico de imagem digital – IQCam e o programa RT-32 da empresa Lumetrix, para a avaliação de luminâncias.
 2. Sistema de medição de iluminâncias Li-Cor, composto por 11 fotocélulas Li-Cor 210SA, 2 *data logger* LI-1000, 1 luxímetro digital LI-250 e 1 calibrador LI-1800-02.
-

3. Outros equipamentos foram utilizados no processo de avaliação e calibração do céu artificial tais como: Luminômetro Minolta LS110, termômetros digitais HOBO-Temp, câmera fotográfica digital Nikon com lente “olho de peixe” de 180 graus, tripés, níveis de bolha e trena digital Dus 20 plus da Bosch.

Além dos equipamentos também foram usados programas computacionais tais como o software MatLab, o Excel e programas de imagem digital como Acad e Corel.

3.2.1. Sistema fotométrico digital Lumetrix.

As medições e avaliações das luminâncias do céu artificial foram desenvolvidas usando o Sistema de Análise Fotométrico de Imagem Digital – IQCam e o programa RT-32 da empresa Lumetrix², Canadá. Este sistema registra dados de luminância em uma imagem digital e apresenta seus valores em unidades de cd/m^2 , obtidos diretamente dos *bits* gráficos que compõem a imagem. O modelo utilizado tem uma lente “olho de peixe” com uma abertura angular de 185° (Figura 55).

As imagens obtidas pela câmera são analisadas no programa RT-32, para o desenvolvimento de diversas avaliações, tais como seleção de intervalos de dados, faixas de avaliação e seções transversais obtidas das fotografias. Os dados podem ser exportados para planilhas de cálculo eletrônico como o Excel ou MatLab, para seu posterior processamento.



Figura 55. IQCam – Lumetrix – (Fonte: LabCon-Arq-UFSC)

² Lumetrix, 2006 disponível em <http://www.iqcam.com>

3.2.2. Sistema fotométrico LI-Cor

O sistema fotométrico da LI-Cor³ foi utilizado para a medição e avaliação das iluminâncias no céu artificial. Este sistema permite a medição simultânea de 11 pontos, mediante a conexão das fotocélulas *LI-Cor210SA* (Figura 56) ao data logger LI-1000 (Figura 57), que registra as unidades de iluminância em lux.



Figura 56. Fotocélula LI-210SA da LICOR.
(Fonte: www.licor.com)



Figura 57. Data Logger LI-1000 da LI-COR
(Fonte: www.labcon.ufsc.br)

As fotocélulas utilizam um fotodiodo filtrado de silício com uma resposta espectral aproximada à curva da sensibilidade do olho humano da C.I.E. dentro de $\pm 5\%$. Apresentam um bom desempenho na medição de condições de iluminação ainda com fontes de baixa intensidade. Sua estrutura compreende uma cabeça de alumínio anodizado com um filtro plano, que garante a correção do efeito co-seno, para uma resposta adequada à radiação em diferentes ângulos de incidência.

Estas fotocélulas são recomendadas para controle automático de iluminação, medição de níveis de iluminação sob céu real, medição de níveis de iluminação em modelos físicos em escala reduzida, e em projetos de iluminação.

3.2.3. Calibração dos equipamentos

A calibração do sistema de medição de luminâncias foi garantido pela empresa Lumetrix, fabricante da câmera IQCam. Essa calibração de fábrica foi realizada entre os meses de novembro de 2005 e abril de 2006. A câmera apresenta um fator de erro de $\pm 3\%$. Entretanto, no procedimento de avaliação das luminâncias

³ LI-COR Bioscience. www.licor.com

em cada sessão de fotografia a câmera faz uma calibração do leitor ótico com uma fotografia com fundo preto.

A calibração das fotocélulas é recomendada no mínimo uma vez ao ano, por apresentar um desvio aproximado de 2% (LI-COR, 1991). Essa calibração geralmente é realizada por exposição a uma lâmpada padrão, em uma bancada fotométrica. Os erros de calibração são aproximadamente de 3%, onde a metade deste erro é devido às incertezas na calibração da própria lâmpada, pelo que esse dado deve ser conhecido.

A calibração das fotocélulas foi realizada com um sistema portátil de calibração de sensores, denominado LI-1800-02 da LI-COR. Para o desenvolvimento deste trabalho foram necessárias três calibrações, feitas em setembro de 2005, outubro de 2006 e fevereiro de 2007, considerando as seguintes condições (CIE, 1994):

- iluminância com iluminante Padrão A;
- Iluminância com luz não polarizada;
- Iluminação homogênea da área de recepção;
- Incidência normal da luz;
- Temperatura ambiente de 25° C.

O calibrador LI-1800-02 da LI-COR contém uma lâmpada de 200 Watts de quartzo halôgeno. Este sistema permite que a luminância conhecida da lâmpada, com uma distância de 20,3 cm entre esta e a fotocélula, uma orientação precisa e a redução de perda de luz pelo tratamento de sua estrutura, garantem a calibração ágil e efetiva das fotocélulas LI-COR.

3.2.4. Processamento de dados

Os dados de luminância foram processados nos programas RT-32 da Lumetrix, MatLab e o Excel. Os dados de iluminância obtidos do sistema LI-Cor foram processados analisados em Excel, os gráficos de distribuição de iluminâncias foram produzidas nos programas *Photo Paint 12*, *Corel Capture 12* e *AutoCad 2004*.

3.3. Ajustes do céu artificial

Os ajustes do espaço físico do céu artificial foram realizados antes das avaliações de luminância e iluminância. Estas atividades desenvolvidas a partir de setembro de 2005 permitiram complementar e adequar o espaço do céu, para um adequado funcionamento no estudo da iluminação, com modelos físicos em escala reduzida. Aspectos como a ventilação da cavidade das lâmpadas, o tratamento do chão, o tratamento do fosso, o manejo de cabos e a instalação dos equipamentos de fotometria, foram considerados como importantes no funcionamento geral do céu, na geração de um ambiente de iluminação controlada, com os padrões de distribuição de luminâncias e iluminâncias desejados.

Após as primeiras avaliações de luminância e iluminância foram necessários novos ajustes no céu artificial, relacionados especificamente com o sistema de lâmpadas e com o sistema difusor.

3.4. Análise de luminâncias

A distribuição de luminâncias é o principal determinante da qualidade e funcionamento de um céu artificial. Por isto as atividades de medição e análise das luminâncias foram desenvolvidas para determinar a proximidade do PDL do céu artificial do LabCon, com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E.

A metodologia para obter o PDL considera a medição de luminâncias a partir do zênite até a linha de horizonte, relacionando cada dado com a altura angular (COOKSY et al, 1989). Essa medição deve ser desenvolvida variando-se o azimute do céu, para determinar se o PDL corresponde a todas as direções deste espaço.

Como foi apresentando no estudo de caso do céu artificial da SCL, por extenso, medições a cada 15 graus de altura e azimute são suficientes para calcular o PDL de um céu de caixa de espelhos, considerando que as reflexões dos espelhos são uniformes na geração do padrão. Assim, as medições de 0 a 90 graus do azimute permitiram determinar a validade do padrão de distribuição em céus de plantas quadradas.

Neste trabalho a medição de luminâncias foi desenvolvida com o sistema de análise fotométrico de imagem digital da *Lumetrix*. Para tal, a câmera IQCam foi instalada em um tripé posicionado no centro geométrico da planta do céu artificial, em uma altura determinada pela proporção de 2:3 e 1:2 dos espelhos com relação à tela difusora, segundo as indicações da pesquisa com céus artificiais apresentados no artigo “*Limits of Sky*” (COOKSY et Al, 1989) (Figura 58).



Figura 58. Instalação da câmera no Céu Artificial

Para a obtenção de imagens no interior do Céu Artificial, os parâmetros de configuração da câmera foram ajustados para uma escala de luminâncias estabelecida entre 50 e 10.000 cd/m².

Após da instalação da câmera, foram realizadas imagens de ensaio, para determinar com exatidão o seu posicionamento e a escala de registro dos dados (Figuras 59-60).

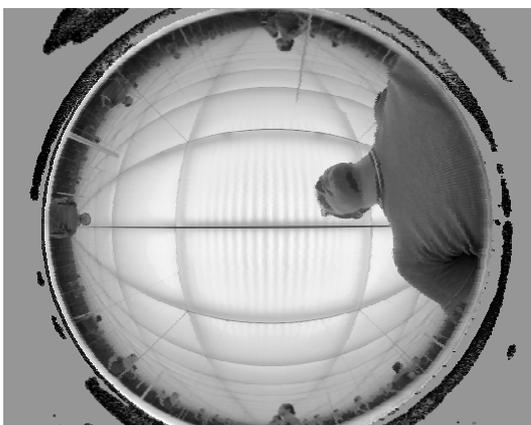


Figura 59. Registro visual da câmera IQCam para verificar seu posicionamento no interior do céu.

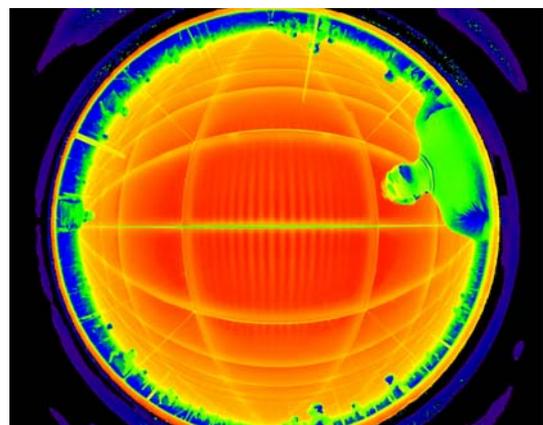


Figura 60. Registro fotométrico da câmera IQCam para verificação de escala do registro. Gráfico de cor falsa.

Para este estudo o sistema de medição permitiu obter dados de luminâncias no céu artificial a cada 0,09 graus de variação na altitude e no azimute. Esta medição realiza-se simultaneamente com uma fotografia digital que registra 1.310.270 dados de luminância, em uma imagem composta por uma malha de 1280 x 1024 pontos, representando em detalhe a distribuição das luminâncias no céu artificial de caixa de espelhos (Figura 61).

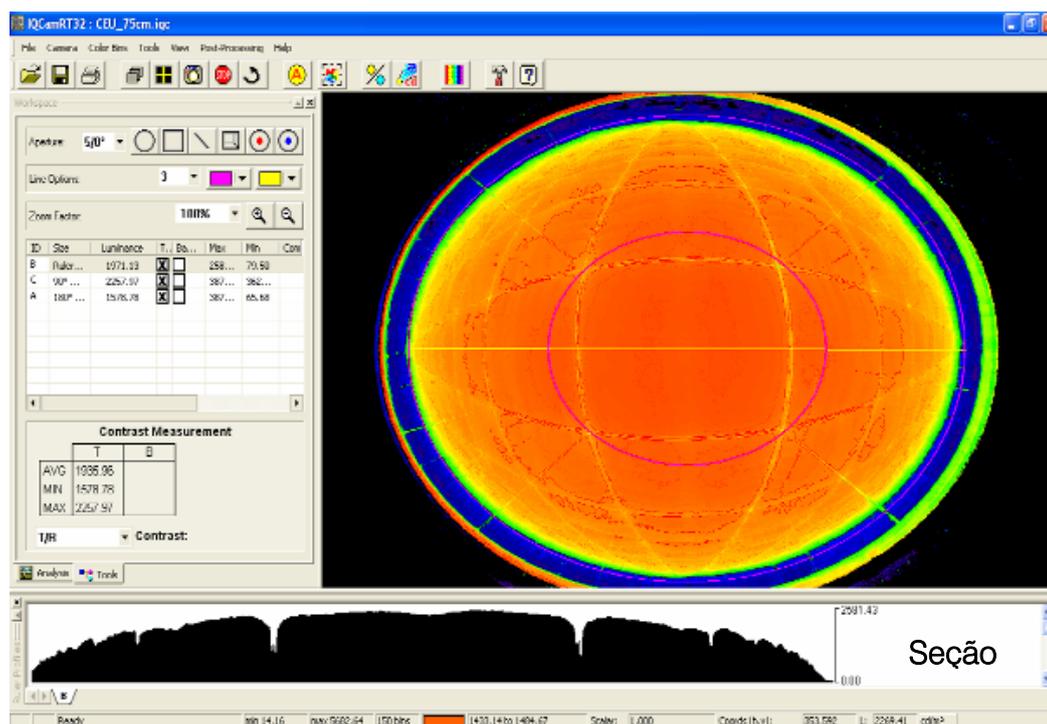


Figura 61. Avaliação de luminâncias no sistema fotométrico Lumetrix.

O programa RT-32 permite a seleção de dados de luminância de uma secção transversal do céu artificial, que representa seu PDL. Estes dados são exportados ao programa Excel para o desenvolvimento de avaliações comparativas com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E.

3.5. Análise de iluminâncias

O mapeamento da distribuição de iluminâncias foi realizada com planos de isolux do céu artificial começou com a definição de orientações no interior da sala de espelhos. Por convenção, determinou-se cada uma das paredes com as orientações cardinais. A parede do céu onde está localizada a porta foi identificada como Oeste, e seguindo a ordem nomeou-se as paredes Norte, Leste e Sul.

Considerando o número de fotocélulas disponível para este estudo, foi definida uma malha de 11 x 11 pontos, com um ponto a cada 22 cm de distância. Esta malha de pontos foi estabelecida adequadamente pelas fotocélulas em cada uma das medidas realizadas, como mostra o esquema apresentado na figura 62.

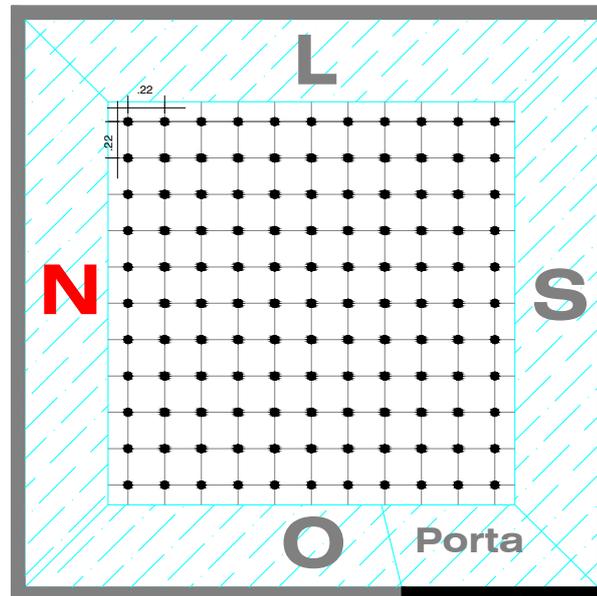


Figura 62. Vista aérea em planta do céu artificial com as orientações das paredes e a malha de pontos para mapeamento das iluminâncias.

Para a obtenção dos dados foi construída uma estrutura de alumínio sustentada por um tripé com apoios nas extremidades, garantindo a horizontalidade desta, durante a tomada de dados de iluminância. Este suporte foi disposto a uma altura de 75 cm do chão, com bases de madeira para a instalação das fotocélulas, que foram niveladas uma a uma antes de cada medição (Figuras 63- 64).



Figura 63. Estrutura de suporte para mapeamento de iluminâncias.



Figura 64. Nivelção das fotocélulas.

A metodologia de medição das iluminâncias para a construção da malha consistiu em deslocar a estrutura de suporte a cada 22 cm. Assim, o suporte das fotocélulas que foi localizado no sentido norte-sul do céu, foi deslocado sucessivamente a cada 22 cm em direção leste-oeste, cobrindo os 11 pontos que formam a malha. A malha de dados obtida foi processada em uma planilha de cálculo eletrônico, para análises e construção de gráficos com curvas isolux, e assim, foram identificadas a uniformidade e a distribuição de iluminâncias no céu artificial de caixa de espelhos.

3.6. Avaliação de modelos físicos em escala reduzida

Além das avaliações de distribuição de luminâncias e iluminâncias, este trabalho foi complementado com a avaliação do funcionamento do céu artificial utilizando modelos em escala reduzida. Para esta avaliação foram construídas três modelos de uma sala com abertura lateral, em escala 1:5, 1:7.5 e 1:10. No piso de cada modelo foram instaladas 3 fotocélulas LI-Cor 210SA, e uma fotocélula na cobertura de cada modelo para medir a iluminância exterior horizontal. Assim, com medições simultâneas no interior e exterior de cada modelo foram calculados os DF em cada ponto, para avaliações comparativas.

Esta avaliação visou determinar as características dos modelos físicos no interior do céu artificial, tais como o tamanho, a escala, o posicionamento, e o tratamento das suas superfícies externas. Com isso buscou-se determinar:

1. Se a orientação dos modelos no céu artificial apresenta diferenças entre as 4 paredes.
2. Se o fator de escala e o tamanho dos modelos instalados no céu artificial influência nos valores de DF.
3. Se o tratamento das superfícies exteriores apresenta erro na obtenção dos valores de DF.

As medições desenvolvidas permitiram realizar análises comparativas dos resultados para quantificar as características avaliadas.

Capítulo 4. AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO

Neste capítulo apresentam-se o céu artificial de “caixa de espelhos” do LabCon-Arq-UFSC e as atividades desenvolvidas para sua avaliação, os ajustes, sua calibração e as determinantes de seu funcionamento, tais como a sua estabilização, a localização e o posicionamento dos modelos para a medição de dados. Estas atividades foram desenvolvidas em diversas etapas entre setembro de 2005 e fevereiro de 2007. Algumas destas atividades, como as medições e as avaliações, foram pré-requisitos de outras atividades, como por exemplo, os ajustes no forro difusor do céu artificial para determinar seu Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL).

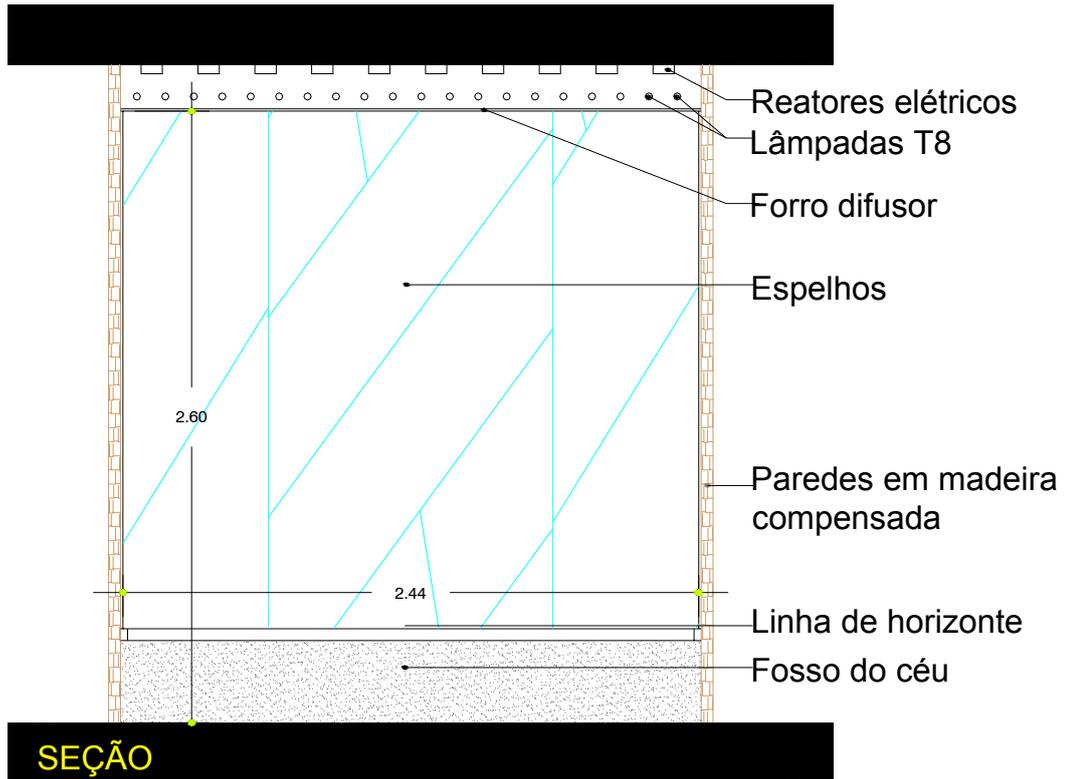
As medições e avaliações desenvolvidas para determinar a distribuição das iluminâncias no plano de trabalho do céu artificial, foram desenvolvidas após a calibração de seu PDL, conforme o modelo analítico *Standard Overcast Sky* da C.I.E. A partir das informações obtidas do estudo das luminâncias e iluminâncias do céu artificial, foram definidas as características dos modelos em escala reduzida para avaliação de iluminação calculando valores de DF.

Os estudos desenvolvidos em uma série de modelos em escala permitiram complementar a informação sobre o funcionamento do céu e sua relação com os modelos arquitetônicos em escala reduzida.

Este capítulo termina com uma série de recomendações gerais, para garantir o funcionamento adequado do céu artificial, relacionadas com sua utilização e manutenção.

4.1. Céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC.

O céu artificial do LabCon-Arq-USFC consiste em um ambiente com 2,44 m de largura, 2,44 m de comprimento e 2,60 m de altura, com um sistema de iluminação artificial superior coberto por um forro difusor. Apresenta-se revestido em suas quatro paredes com placas de espelhos (Figura 65). Este céu foi construído com o apoio financeiro do projeto: “Revitalização/Capacitação do LabCon-Arq”, programa PROCEL Edifica, da Eletrobrás – MME.



Figuras 65. Seção do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq- UFSC.

4.1.1. Construção

O céu artificial foi construído em uma estrutura de madeira, fechado com placas de compensados forradas no interior com espelhos verticais de 4 mm de espessura. O sistema de geração de iluminação consiste de 40 lâmpadas fluorescentes T8 de 4500 °Kelvin (Luz Branca), dispostas em dois circuitos independentes. O teto e as paredes da cavidade das lâmpadas foram pintados com tinta branca para melhorar a eficiência do sistema de iluminação (Figura 66).



Figura 66. Cavidade das lâmpadas com acabamento branco e dois circuitos de lâmpadas T8.

Como tela difusora do céu, foram instaladas inicialmente duas placas de acrílico translúcidas. O piso do céu conservou o acabamento cerâmico do prédio de arquitetura e o fosso, que corresponde às paredes localizadas abaixo da linha do horizonte, foi pintado com tinta branca (Figura 67).



Figura 67. Céu artificial do LabCon-Arq-USFC em setembro de 2005.

A construção do céu foi complementada com a instalação de dois exaustores para extrair o ar quente gerado pelos reatores elétricos da cavidade das lâmpadas, localizados na parede lateral onde está a porta de entrada do céu.

4.1.2. Ajustes do céu artificial.

Uma série de ajustes realizados no céu artificial foram identificados antes do início das avaliações de distribuição de luminâncias e iluminâncias. Estes ajustes foram:

1. Melhorar a ventilação da cavidade das lâmpadas
2. Realizar um tratamento no acabamento do fosso do céu artificial
3. Viabilizar a saída dos cabos de conexão dos equipamentos de fotometria
4. Determinar o período de estabilização do fluxo luminoso das lâmpadas para o desenvolvimento das medições fotométricas.

4.1.2.1. Ventilação

As primeiras experiências de trabalho no interior do céu mostraram que o sistema de extração de ar quente necessitava de um reforço, devido ao aquecimento elevado, observado no interior do céu, em especial na cavidade das lâmpadas. Assim, foram realizadas aberturas em uma parede do céu, para melhorar o funcionamento dos exaustores e melhorar a troca de ar na cavidade das lâmpadas (Figura 68). Esta atividade foi acompanhada com medidas de temperatura na cavidade das lâmpadas e no interior do céu, antes e depois da realização das aberturas para a verificação do efeito gerado por esta intervenção (Figura 69).



Figura 68. Aberturas para ventilação na parede lateral do Céu Artificial.

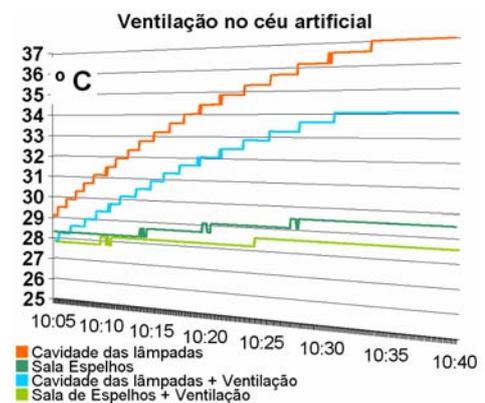


Figura 69. Temperaturas registradas no céu artificial antes e depois das aberturas de ventilação.

A figura 69 apresenta os dados de temperatura registrados com termômetros HOBO-Temp H08 no céu artificial nos dias 7 e 24 de março de 2007, antes e depois das aberturas de ventilação. Ambas as medidas foram realizadas entre as 10:00 AM e as 10:40 AM. Este período de medição registrou a evolução da temperatura do ar do céu artificial, desde o momento de ligamento das lâmpadas até sua estabilização após 30 minutos.

Considerando que a temperatura exterior nestes dois dias não apresentou diferença superior a 1°C, o sistema de ventilação com as aberturas proporcionou uma redução de aproximadamente 3 graus de temperatura na cavidade das lâmpadas.

4.1.2.2. Tratamento do fosso do céu

A instalação dos espelhos nas paredes do céu gerou uma zona de 40 cm de altura entre o piso e a base dos espelhos, denominada fosso do céu. Na figura 70 pode-se observar como o acabamento inicial branco do piso e das paredes abaixo dos espelhos, geravam múltiplas reflexões até convergir no horizonte, perturbando o efeito desejado neste tipo de céu, ou seja, de diminuir a luminância do horizonte em relação ao zênite numa proporção de 1:3.

O tratamento realizado para controlar esta situação consistiu na instalação de um carpete preto no piso e uma camada de pintura preta e fosca nas superfícies das paredes abaixo dos espelhos, reduzindo desta forma a reflexão de luz da cavidade do fosso. A figura 71 apresenta visualmente a influência do tratamento do fosso na distribuição de iluminação no céu, resultando no efeito desejado.



Figura 70. Céu artificial sem tratamento no fosso.



Figura 71. Céu artificial com tratamento no fosso.

4.1.2.3. Saída de cabos dos equipamentos

As primeiras medições fotométricas desenvolvidas no interior do céu artificial permitiram verificar que a presença de pessoas no céu gerava alterações na distribuição da iluminação, afetando a estabilidade do céu para avaliações paramétricas ou comparativas. Esta situação pode ser desconsiderada em avaliações qualitativas, mas para estudos quantitativos, todas as modificações que o sistema do céu apresenta, de uma medição a outra, geram distorções na quantificação do fenômeno da iluminação.

Por esta razão foram realizadas duas aberturas no foso do céu a nível do piso, para comunicar o interior com duas salas adjacentes, onde foram instalados os computadores, os *data loggers*, as fontes de energia de câmeras (Figura 72) e os fios das fotocélulas (figura 73). Assim, todas as avaliações quantitativas desenvolvidas no interior do céu podem ser feitas sem a presença de pessoas no seu interior.

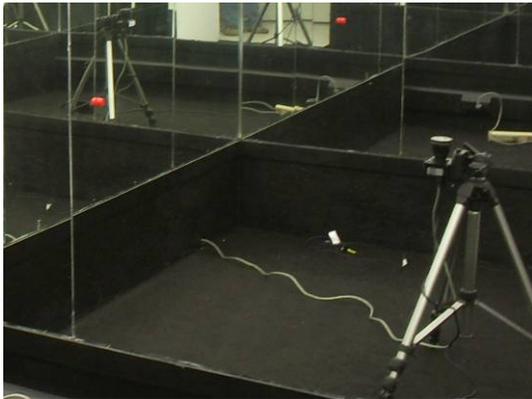


Figura 72. Câmera IQCam instalada no interior do céu e ligada ao computador na sala contígua.



Figura 73. Fios das fotocélulas saindo do céu por um dos furos, para conexão com um *data logger*.

4.1.2.4. Estabilização do céu.

Medições de iluminância horizontal desenvolvidas no interior do céu, permitiram caracterizar a evolução no tempo e na intensidade de iluminação, para determinar sua estabilização, ou seja, até o momento em que não houvessem mais variações na iluminância registrada. A medição foi realizada com uma fotocélula localizada no centro geométrico do céu artificial a uma altura de 0,75m do piso, considerada no início das atividades como uma possível altura da linha do horizonte do céu, para avaliações com os modelos arquitetônicos.

Os dados de iluminância registrados a cada minuto com o luxímetro digital LI-250, permitiram a construção de uma curva de estabilização do céu. O fluxo luminoso das lâmpadas alcança um valor máximo de 7264 lux em 10 minutos após do ligamento dos circuitos, após esse tempo começa a diminuir sua intensidade até estabilizar-se aproximadamente em 30 minutos, com valores de 7220 lux (Figura 74). Essa condição pode ser verificada com a estabilização das temperaturas na cavidade das lâmpadas, como foi apresentado no estudo de ventilação.



Figura 74. Curva de estabilização do céu artificial obtida em novembro de 2006.

4.2. Distribuição de luminâncias no céu artificial

A avaliação da distribuição de luminâncias no céu artificial considerou medições com o sistema fotométrico IQCam da Lumetrix, primeiro do céu artificial com o forro difusor de acrílico e depois com as reformas do sistema de geração e difusão da iluminação, para aproximar o PDL obtido do céu com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E.

Segundo as considerações da calibração do céu apresentadas na revisão bibliográfica (ver *Variações na seção do céu*, na página 45 e figura 45), recomenda-se uma seção do céu contida entre 2:3 e 1:2, da altura dos espelhos com relação a sua largura para obter um PDL aproximado ao modelo analítico de céu encoberto da C.I.E. Assim, partindo das dimensões do céu artificial do LabCon-Arq-UFSC, com uma altura de 2,60m e uma largura de 2,44m, a instalação da câmera IQCam a uma altura de 1,00m do piso, gerou uma altura de espelhos desde esse horizonte até o forro difusor de 1,60m, sendo esta altura uma proporção aproximada de 2:3 da largura do céu.

4.2.1. Verificação da distribuição das luminâncias com o difusor acrílico

A avaliação inicial do céu artificial visou determinar o PDL com o difusor acrílico instalado segundo o projeto original. Esta avaliação revelou alguns aspectos do funcionamento do céu artificial, que foram analisados no programa RT-32. Os aspectos mais relevantes foram: as sombras geradas pelo sistema de suporte das placas de acrílico no centro e nos extremos do céu, as suas múltiplas imagens nos

reflexos dos espelhos e a necessidade de um reforço de lâmpadas entre os dois circuitos originais do sistema.

Estes aspectos podem ser observados na imagem da figura 75, onde se apresenta a tela de análise de dados de luminância do programa RT-32, em uma avaliação que corresponde a uma altura do 1,00m do piso para obter uma seção de céu de 2:3 (Figura 75).

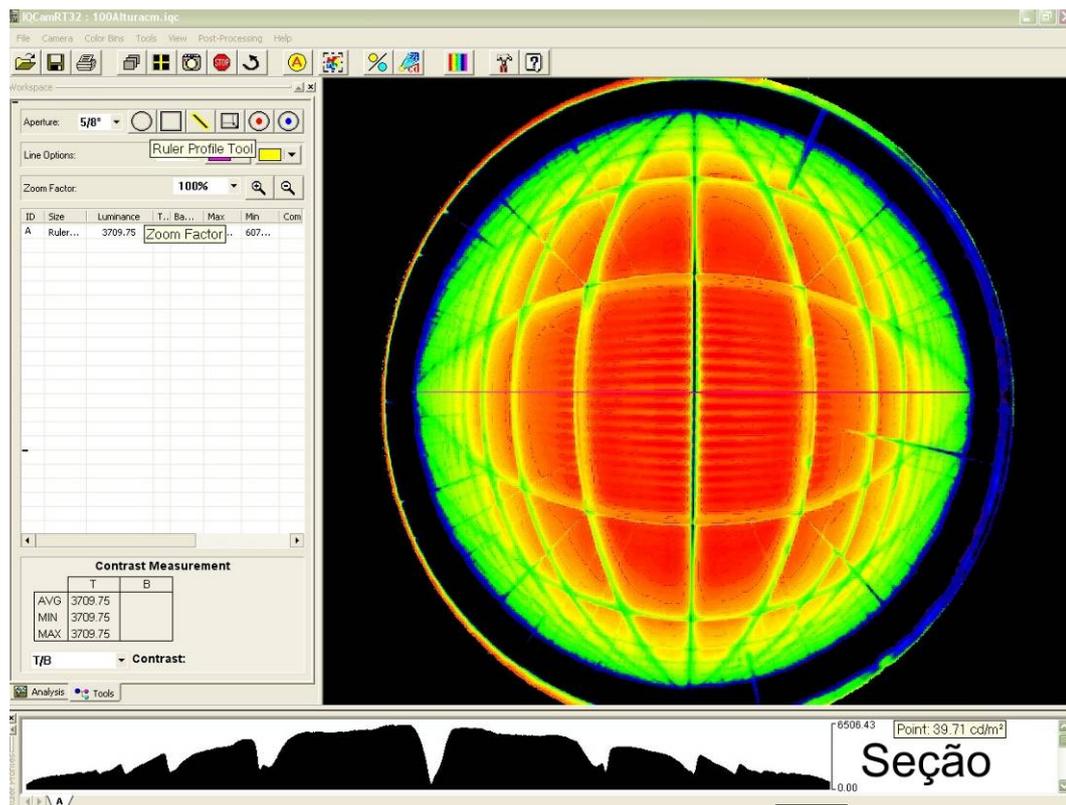


Figura 75. Tela de análise dos dados da luminância do programa RT-32

Os dados da seção do céu apresentados na imagem inferior da figura 75, correspondem com o PDL do céu artificial. Essa imagem demonstra a maneira como os suportes das placas de acrílico perturbaram a distribuição das luminâncias, especialmente no zênite, na união entre a tela difusora e nas múltiplas reflexões dos espelhos.

O PDL obtido foi comparado com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E, aplicando a equação: $L(\theta) = L_z * (1 + 2 * \sin(\theta)) / 3$, onde $L_z = 6784 \text{ cd/m}^2$, valor máximo registrado no zênite do céu (Figura 76).

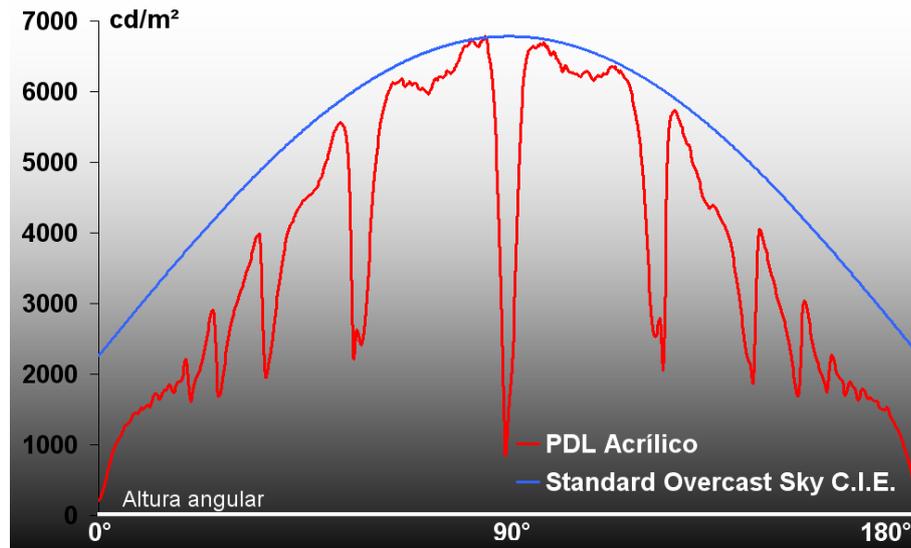


Figura 76. Curva do PDL do céu com dados da primeira avaliação.

A partir da análise destes resultados verificou-se que o sistema difusor de placas de acrílico proporcionava uma distribuição de luminâncias diferente da que se pretendia obter. Para estabelecer as variações do PDL do céu artificial com difusor de tela acrílica, com relação ao modelo analítico do céu encoberto da C.I.E. foi calculado o *Erro Médio Percentual Absoluto* (MAPE) (LJUNG e GLAD, 1994), aplicando a seguinte equação:

$$\text{MAPE} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{\hat{y}_{\max} - \hat{y}_{\min}}$$

Onde:

- n = é o número de dados (940 dados)
- \hat{y}_i = é o i-ésimo dado experimental (P.D.L.)
- y_i = é o i-ésimo dado do modelo (C.I.E.)
- \hat{y}_{\max} = é o maior valor dos dados experimentais
- \hat{y}_{\min} = é o menor valor dos dados experimentais

Os dados obtidos da seção da imagem digital, que representam o PDL do céu artificial, foram 940 registros de luminância em cd/m^2 , correspondentes a alturas angulares entre 0 e 180 graus. Estes mesmos dados foram calculados com o

modelo analítico do céu encoberto da C.I.E. para as comparações dos dados ponto a ponto.

O MAPE obtido da avaliação do PDL do céu com difusor de tela de acrílico foi de 19,74%, considerando a totalidade dos dados, mas ao desconsiderar aqueles dados do PDL, obscurecidos pelos suportes das placas de acrílico (Figura 77), o MAPE obtido foi de 16,33%, erro ainda elevado para um PDL desejável.

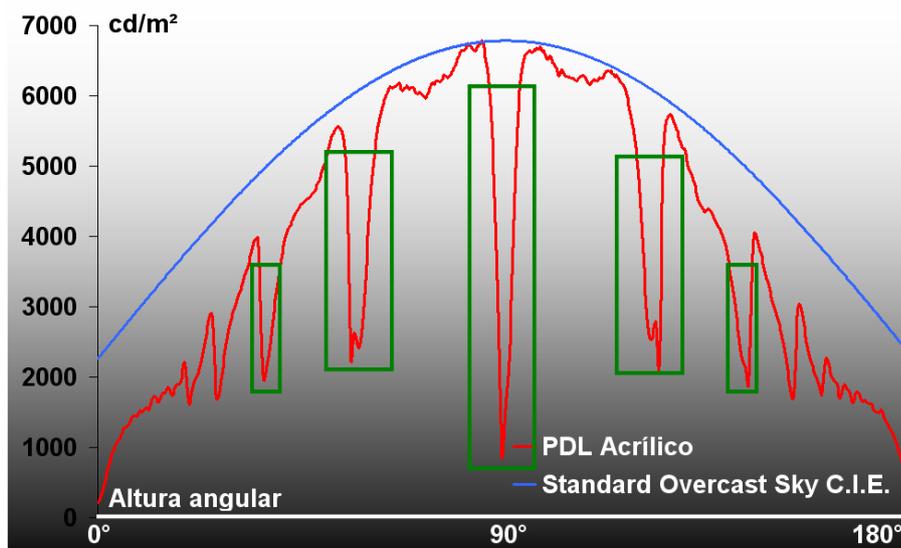


Figura 77. Os quadrados verdes apresentam os dados de erro que foram desconsiderados da avaliação do MAPE entre o PDL acrílico e o modelo analítico do céu encoberto da C.I.E.

Com esta avaliação, foi determinado que o PDL do céu artificial com difusor de acrílico não é adequado para avaliações com modelos em escala. Sendo assim, foram consideradas novas reformas no sistema difusor e na geração de iluminação na cavidade das lâmpadas.

4.2.1.1. Modificações realizadas no sistema difusor

A partir da análise do PDL do céu com placas de acrílico, foram realizadas algumas modificações no sistema de geração e difusão da iluminação do céu artificial de caixa de espelhos:

1. O sistema difusor de acrílico com os seus suportes de alumínio foi substituído por um tecido de cetim branco (Figura 78).
2. O sistema de geração de iluminação foi reforçado com duas lâmpadas no centro do céu, com um circuito de ligação independente (Figura 79).



Figura 78. Instalação do tecido de cetim branco como nova tela difusora.



Figura 79. Lâmpadas de reforço ao sistema de geração de iluminação do céu artificial.

4.2.2. Verificação da distribuição das luminâncias com o difusor de tecido

A análise das luminâncias com o tecido foi realizada conforme os parâmetros aplicados ao difusor de acrílico. Foram feitas fotografias digitais nas mesmas alturas e com iguais padrões da configuração da IQCam (Figura 80).

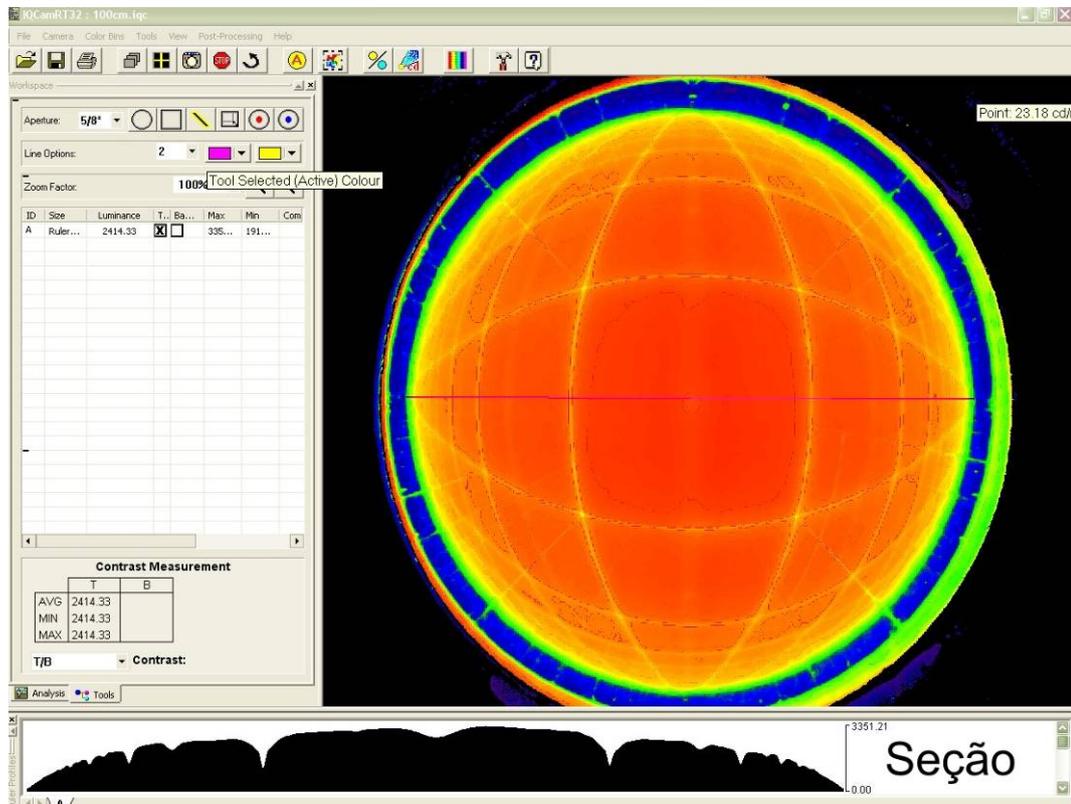


Figura 80. Tela de análise dos dados da luminâncias do programa RT-32

Foi realizada também a mesma análise de dados na nova seção do céu (Figura 80, imagem inferior), determinando seu PDL, e fazer, assim, sua comparação com o modelo analítico do céu encoberto da C.I.E. aplicando o cálculo do MAPE.

Os dados mostram uma melhora significativa no PDL do céu, pelo bom funcionamento do tecido de cetim como tela difusora. Sumiram as sombras geradas pelos suportes das placas de acrílico e o reforço de luminárias no centro da cavidade das lâmpadas gerou um zênite mais uniforme.

O tecido, entretanto, mostrou-se menos translúcido que as placas de acrílico, uma vez que as intensidades das luminâncias diminuíram em 50% aproximadamente, dos valores registrados com o difusor de acrílico. Apesar disso, o PDL do céu artificial melhorou notavelmente em relação ao projeto original construído (Figura 81).

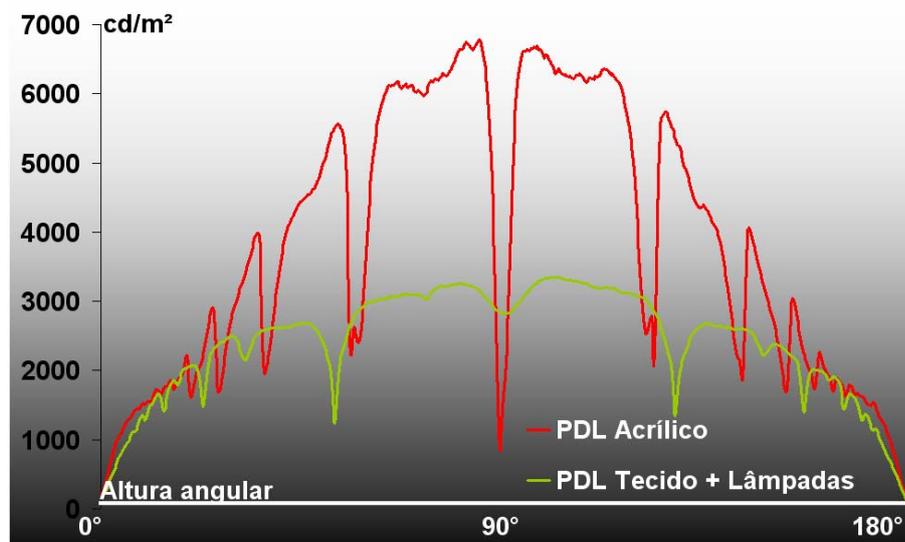


Figura 81. Comparação das luminâncias da tela acrílica em relação com as luminâncias do tecido.

Aplicando o mesmo procedimento de avaliação de uma seção do céu, com a imagem obtida pela câmara a 1,00m do piso, os dados foram exportados para uma planilha eletrônica, onde foram processados para a avaliação do PDL frente ao modelo analítico de céu encoberto da C.I.E., partindo do valor máximo de luminância obtido no zênite de 3353 cd/m^2 .

O MAPE obtido da avaliação comparativa, entre o PDL do céu com tecido de cetim branco e o modelo analítico da C.I.E., foi 6,79%, considerando a totalidade dos 940 dados de luminância de uma seção do céu, no sentido leste–oeste (Figura 82).

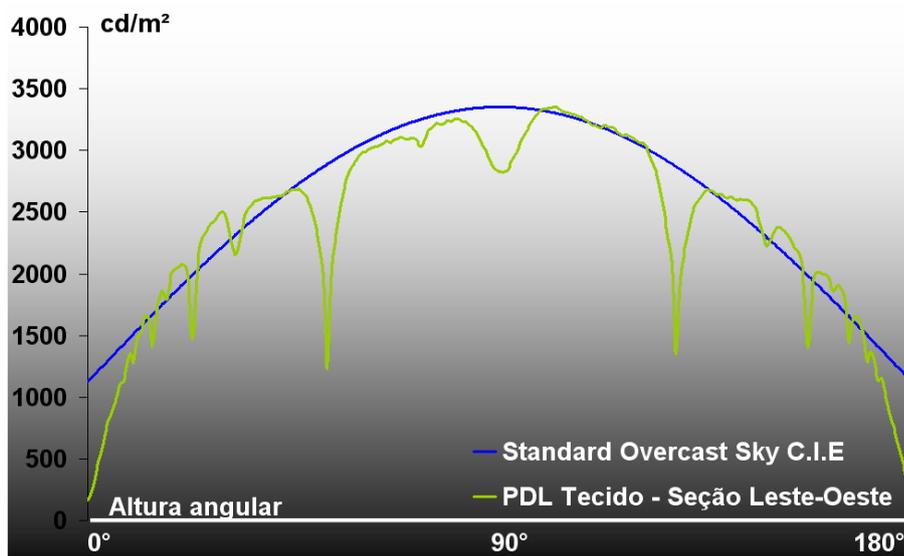


Figura 82. PDL do céu com tecido de cetim e curva do modelo analítico C.I.E, no sentido Leste–Oeste.

A avaliação do PDL foi complementada com a análise da seção norte–sul do céu, para verificar o seu funcionamento com relação ao azimute, assim o MAPE obtido foi de 6.86%, obtido a partir da mesma base de dados com que foi desenvolvida a análise da seção leste-oeste (Figura 83).

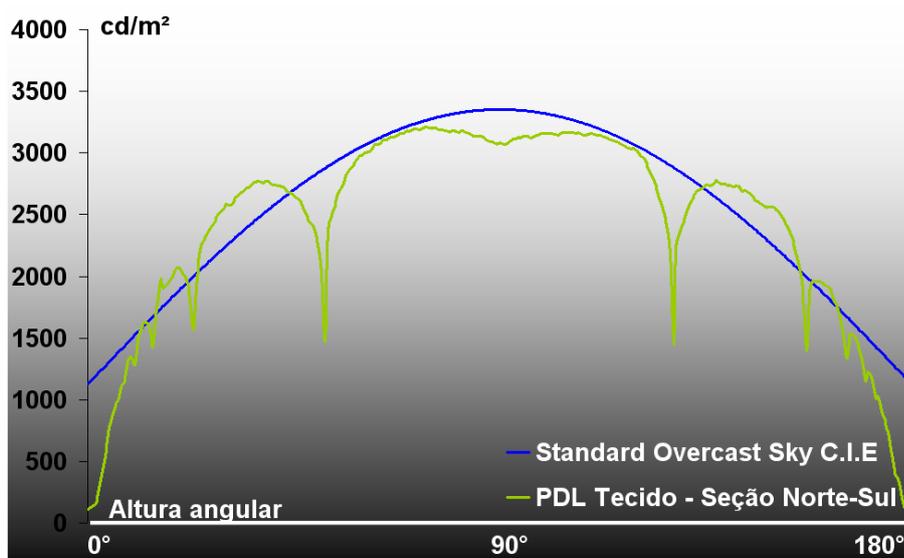


Figura 83. PDL do céu com tecido de cetim e curva do modelo analítico C.I.E, no sentido norte–sul.

Os erros de 6,79% na seção leste–oeste, e de 6,86% na seção norte–sul, apresentam uma boa aproximação do PDL do céu artificial do LabCon-Arq-UFSC, com relação ao modelo analítico da C.I.E., para avaliações de iluminação com modelos em escala reduzida, considerando que a modelagem na engenharia trabalha com um erro aceitável de 10% (AGUIRRE, 2004; THANACHAREONKIT, 2005), entre dados experimentais e modelos analíticos.

4.2.2.1. Aproximação do PDL do céu artificial com o modelo Standard Overcast Sky da C.I.E.

Considerando a quantidade de dados obtidos pelo sistema fotométrico digital Lumetrix, cada um dos dados foi relacionado com a sua altura angular e com o seu azimute no céu artificial de caixa de espelhos, para verificar aspectos de seu funcionamento, que são impossíveis de determinar com medições ponto a ponto, realizadas com um luxímetro convencional. O conhecimento destes aspectos visa determinar o nível de proximidade do PDL do céu de caixa de espelhos, com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E.

O PDL do céu em ambas seções, apresentou erros gerados pela faixa obscura da união entre o forro difusor e as paredes de espelhos. Isso é um comportamento normal para estes tipos de céu artificiais, e só pode ser melhorado com a ampliação da cavidade das lâmpadas, tal como foi indicado no estudo de caso apresentado na revisão bibliográfica.

Assim, com os dados avaliados, foram identificadas as alturas angulares destes dados errôneos para desconsiderá-los no cálculo do MAPE, e avaliar assim a possibilidade de aproximar o PDL do céu de caixa de espelhos com o modelo analítico de céu, nas suas seções leste-oeste e norte-sul.

Os dados desconsiderados foram 5 graus na porção do PDL afetada pela faixa da união entre o forro difusor e as paredes espelhadas, e 1 grau no primeiro reflexo desta nos espelhos (Figuras 84-85). O MAPE obtido com estas avaliações foi de 4,94% na seção leste-oeste e de 6,02% na seção norte-sul.

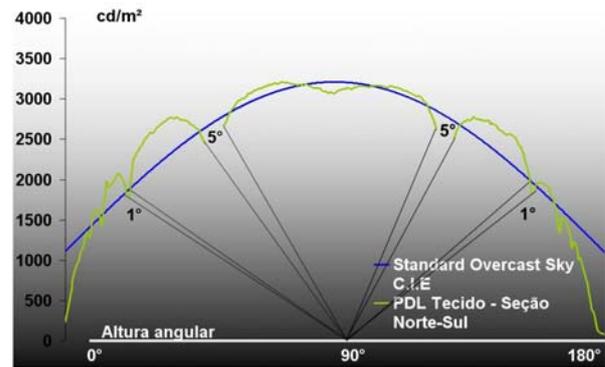
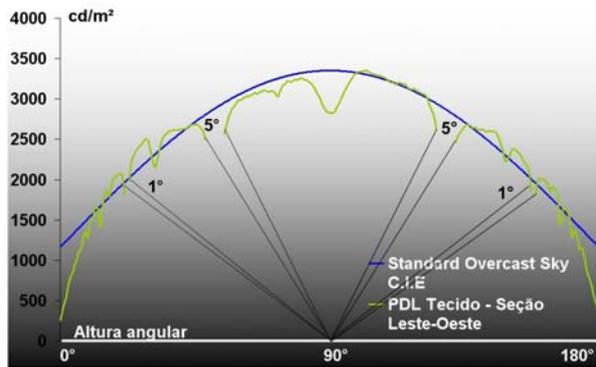


Figura 84. Erros desconsiderados na seção leste-oeste.

Figura 85. Erros desconsiderados na seção norte-sul.

A diminuição destes erros na seção leste-oeste foi de 1.38% e na seção norte-sul foi de 0,84%. Considerando que a faixa obscura está sempre presente nestes tipos de céus, uma reforma para melhorar o funcionamento do céu artificial, corrigindo esse erro, não iria melhorar o funcionamento do PDL com uma redução de erro maior de 1.5%, em relação ao modelo de céu encoberto da C.I.E., a partir do erro já calculado de 6.79% e 6.86%.

Outro aspecto observado foi a influência do zênite na distribuição das luminâncias de ambas as seções do céu artificial, sendo notável a redução de luminâncias causada pela união das lâmpadas na zona central do zênite. Este aspecto afeta em maior medida a seção leste-oeste, sendo isso uma das possíveis causas das diferenças obtidas nos PDL de ambas as seções, especialmente pela reprodução dessa sombra, na porção do PDL gerada pelos reflexos nos espelhos.

Funcionamento do PDL com variação da altura da linha do horizonte.

Uma vez realizada a análise das seções do céu para determinar a proximidade do PDL com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E., foram desenvolvidas avaliações da altura da linha do horizonte, segundo as recomendações do estudo de caso apresentado na revisão bibliográfica. O procedimento de análise foi o mesmo procedimento aplicado nas avaliações das seções leste-oeste e norte-sul, calculando para todas as variáveis de altura medidas, o Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE). As alturas das medições foram definidas seguindo a proporção da altura dos espelhos em relação à largura do céu, em um limite contido entre 1:2 e 2:3.

No céu artificial do LabCon-Arq-UFSC essa proporção foi definida com alturas de 1,00m, 1,25m e 1,40m do piso, mas para uma maior mostra da variabilidade do PDL com relação à linha do horizonte, foram avaliadas alturas adicionais de 0,50m e 0,75m do piso. As imagens e medições da câmera foram realizadas com um intervalo de 5 minutos entre elas, garantindo a estabilidade do céu no momento do registro das fotos.

As imagens digitais do céu artificial são visualizadas em cor falsa pelo programa RT-32. Essas imagens têm uma escala de luminâncias contida entre 50 cd/m² como limite inferior e 10.000 cd/m² como limite superior. Entretanto, a escala de cores representa com a cor vermelho os dados máximos de luminância e com a cor verde os dados de luminância inferior (Figuras 86 a 90).

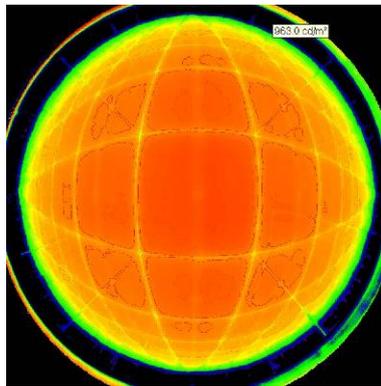


Figura 86. Fotografia a 50 cm

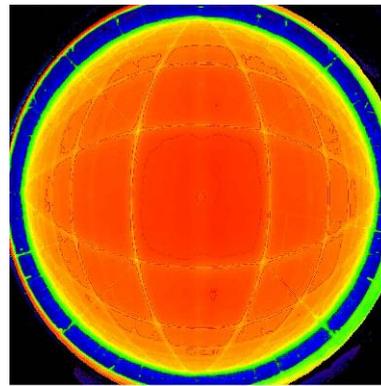


Figura 87. Fotografia a 75 cm

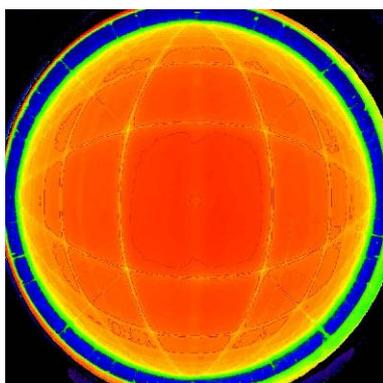


Figura 88. Fotografia a 100 cm.

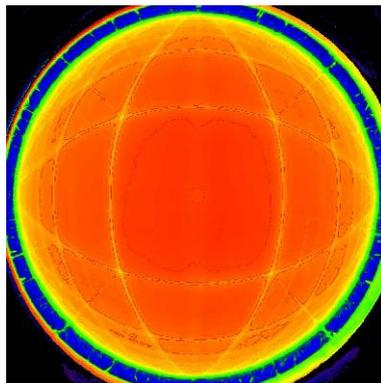


Figura 89. Fotografia a 125 cm.

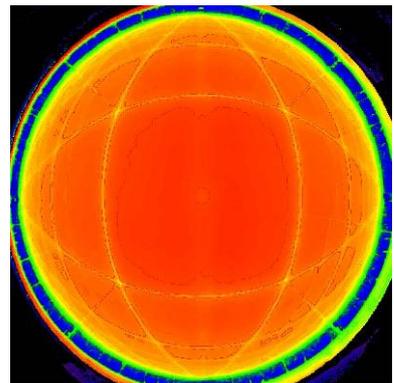
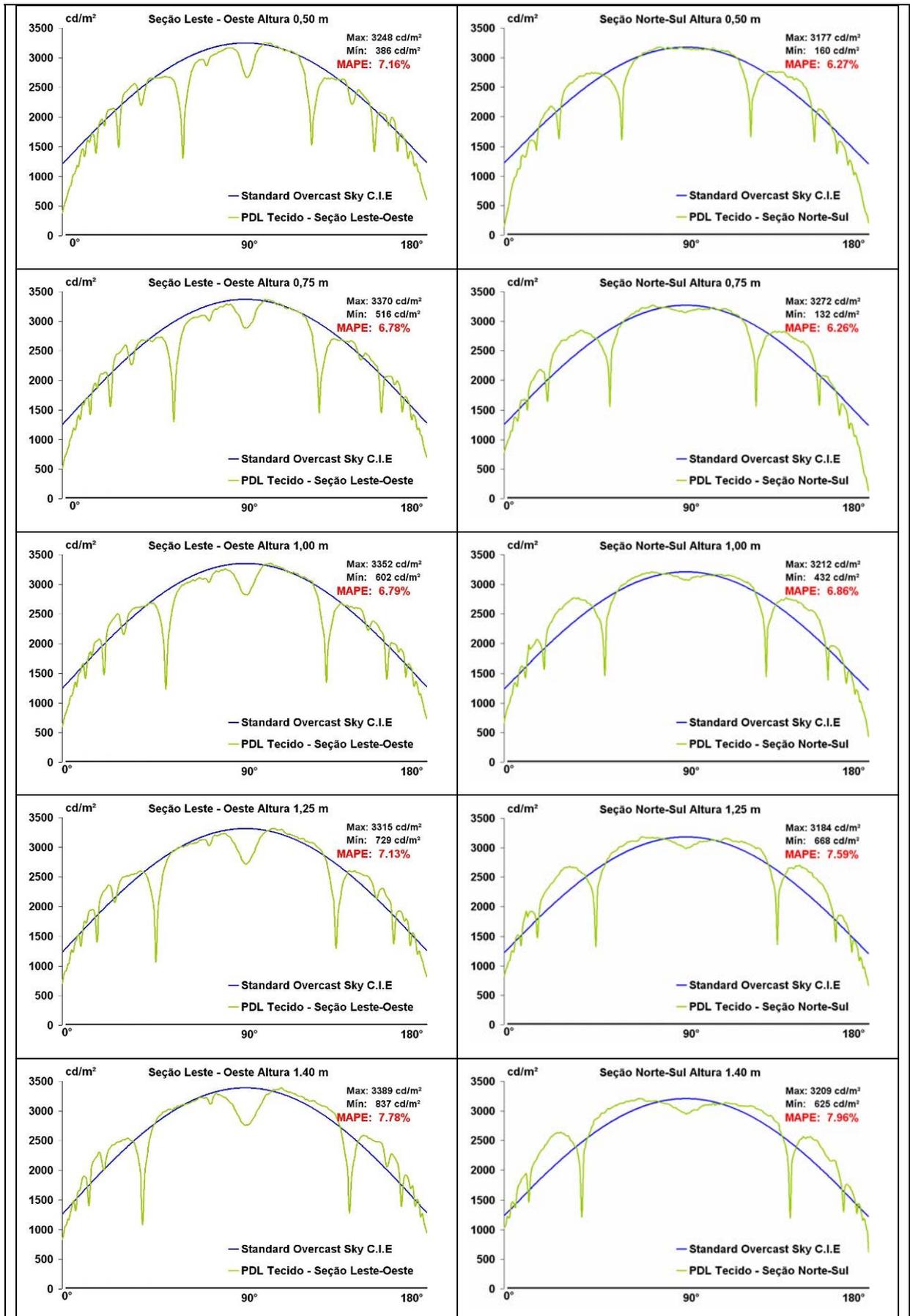


Figura 90. Fotografia a 140 cm.

De cada uma destas avaliações foram selecionadas as seções transversais leste-oeste e norte-sul, para determinar o MAPE da relação do PDL com o modelo analítico do céu encoberto da C.I.E., os resultados são apresentados na tabela 6.

Tabela 6. Avaliação do PDL do céu, por alturas da linha do horizonte.



Os resultados obtidos demonstram que a linha do horizonte com uma altura de 1,40m do piso, apresenta os maiores erros da série avaliada, sendo este um comportamento esperado e referenciado anteriormente no estudo do caso. Entretanto, o melhor funcionamento do PDL foi obtido com a linha do horizonte a 0,75m do piso, sendo esta uma posição que gera uma proporção maior que 2:3 entre a altura e o comprimento dos espelhos.

Destas avaliações pode-se concluir que é possível definir a linha do horizonte do céu artificial, a partir dos 0,50m do piso, apresentando um funcionamento adequado para a medição de modelos em escala reduzida. Entretanto é recomendável que a altura dos modelos não supere a altura de 1,40m do piso, devido ao aumento do erro em proximidade com o forro difusor, ainda que as diferenças obtidas entre os dados da linha do horizonte a 0,50 e a 1,40m não são superiores a 1,7%. Esta consideração insere uma variável determinante do céu com relação à construção e localização dos modelos em escala para a avaliação quantitativa de iluminação.

4.2.3. Configuração final da distribuição das luminâncias.

As medições de luminância desenvolvidas com o sistema fotométrico digital Lumetrix permitiram observar a configuração do PDL do céu artificial, além das seções já apresentadas. Cada uma das medições realizadas gerou uma base de dados de 980 x 980 dados de luminância em cd/m^2 , que foram processados no programa MatLab.

Os resultados desta avaliação permitiram concluir que o PDL do céu artificial apresenta um funcionamento próximo ao modelo analítico, com uma proximidade superior a 93% com relação ao modelo *Standard Overcast Sky* da C.I.E.. Esta distribuição de luminâncias entre o zênite e a linha do horizonte permanece uniforme nos 360 graus do azimute do céu, sendo que seu funcionamento é garantido em todas as direções do céu artificial.

A figura 91 apresenta os dados totais da luminância do céu artificial, gerados pelo programa MatLab. Nesta imagem a cor vermelha representa o maior

nível de luminâncias, superior a 3000 cd/m², até diminuir, para a cor azul, com dados de luminância entre 500 e 1000 cd/m² (Figura 91).

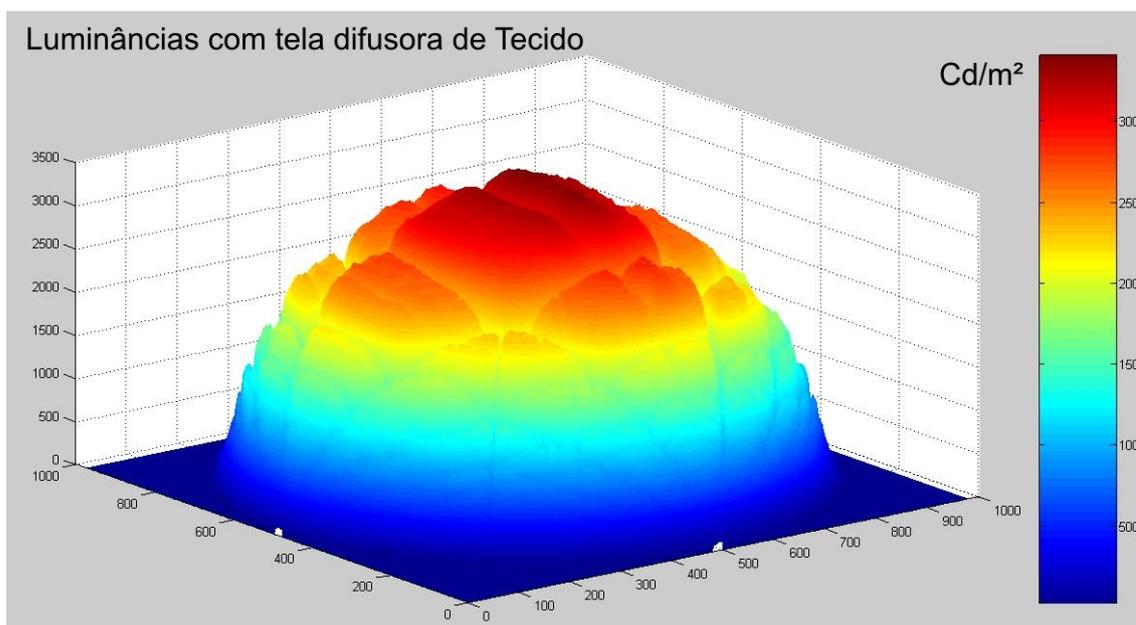


Figura 91. PDL geral do céu artificial avaliado e processado no programa MatLab.

4.3. Distribuição de iluminâncias no céu artificial

A medição das iluminâncias com o sistema fotométrico *LI-COR*, visou determinar a intensidade e a distribuição destas, na altura da linha do horizonte do céu artificial de caixa de espelhos. Para isso foram definidos e medidos 121 pontos de iluminância (lux) em uma malha de 11 x 11 pontos, a cada 22 cm e a uma altura de 0,75m do piso, cobrindo a área total da planta do céu artificial. A altura de 0,75 m do piso foi definida considerando que essa altura de horizonte, apresentou o melhor PDL nas seções leste-oeste e norte-sul, como foi concluído na avaliação das luminâncias.

A malha de dados obtida foi processada em uma planilha de cálculo eletrônico, para as análises e a construção de gráficos com curvas de isolux. Esta avaliação permitiu identificar a uniformidade na distribuição de iluminâncias no céu artificial. A tabela 7 apresenta os dados de iluminância em lux, registrados no céu artificial no dia 17 de novembro de 2006 (Tabela 7).

Tabela 7. Dados de Iluminância em lux do Céu Artificial.

Dados de Iluminância Céu Artificial Novembro 17													
	0	12	34	56	78	100	122	144	166	188	210	232	244
12	6648	6726	6764	6840	6900	6899	6905	6868	6765	6727	6683		232
34	6727	6765	6815	6867	6938	6930	6938	6908	6846	6782	6741		210
56	6766	6831	6874	6931	6983	6979	6987	6957	6905	6855	6791		188
78	6827	6872	6910	6986	7032	7033	7040	7006	6959	6908	6850		166
100	6863	6916	6951	7010	7063	7064	7072	7039	6983	6933	6880		144
122	6892	6947	6973	7041	7073	7086	7071	7042	6991	6938	6878		122
144	6879	6926	6952	7028	7060	7068	7069	7037	6984	6925	6861		100
166	6834	6879	6916	6986	6991	7035	7004	6974	6919	6892	6826		78
188	6775	6843	6862	6940	6938	6991	6947	6926	6883	6843	6775		56
210	6770	6805	6827	6900	6902	6936	6903	6867	6835	6785	6702		34
232	6715	6784	6830	6845	6873	6875	6878	6743	6825	6778	6713		12
	244	232	210	188	166	144	122	100	78	56	34	12	0

A letra **N** no lado esquerdo da tabela indica a localização da parede norte do céu, na borda de cor cinza da tabela são apresentadas as referências em centímetros dos pontos que formam a malha.

Para a avaliação das iluminâncias foi utilizado como critério a seleção de seções concêntricas no céu artificial, conservando a proporção quadrada da planta. Com esta definição foram determinadas 4 zonas de avaliação, sendo a primeira a totalidade da planta do céu com a malha de 11x11 pontos, em seguida uma zona de 9 x 9 pontos, uma de 7 x 7 pontos e finalmente uma de 5 x 5 pontos. Uma malha de 3 x 3 pontos seria a última opção de avaliação concêntrica do céu, mas o seu tamanho seria pequeno demais para um aproveitamento da área central do céu artificial.

A referência dos pontos determina o tamanho de cada zona de avaliação, e define a distância destas zonas às paredes de espelhos, segundo as coordenadas apresentadas na borda cinza da tabela 7.

Estes dados foram processados e representados na figura 92. As curvas isolux permitiram identificar qualitativamente a correspondência de cada uma das zonas concêntricas definidas, com a distribuição das iluminâncias, após superposição da malha sobre uma planta do céu artificial (Figura 92).

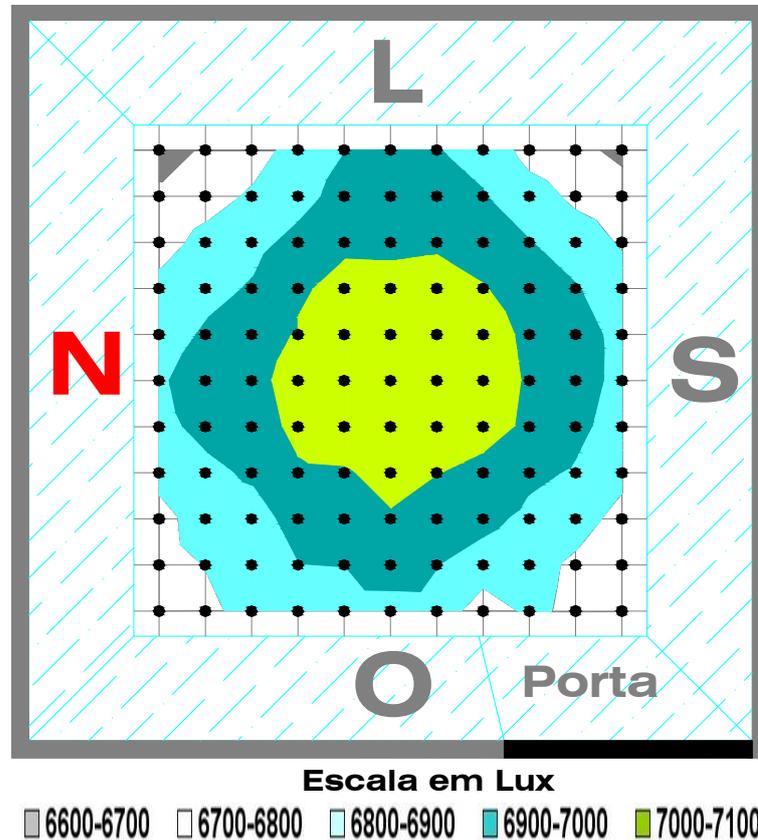


Figura 92. Curvas isolux do céu artificial superpostas na malha de pontos.

A análise geral das iluminâncias no interior do céu determinou um valor máximo de 7086 lux, um mínimo de 6648 lux e uma iluminância média de 6899 lux, considerando os 121 pontos da malha (Ver tabela 7). Com esses dados foi calculada a uniformidade geral do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-USFC, aplicando a fórmula:

$$U = E_{\min} / E_{\text{média}} \quad [\%]$$

Assim, a uniformidade das iluminâncias geral do céu obtida foi 96,36%. Esta uniformidade demonstra a qualidade do céu, considerando que outros céus artificiais como, por exemplo, os céus hemisféricos possuem uniformidades por volta de 97%, como o céu da Universidade Católica de Louvain, na Bélgica, apresentado na página 38.

O processo de avaliação das iluminâncias foi aplicado para cada uma das zonas concêntricas previamente definidas, calculando assim, a uniformidade de cada uma delas, com os seguintes resultados: na malha de 9 x 9 pontos 97,4%, na malha de 7 x 7 pontos 98,16%, e na malha de 5 x 5 pontos 99,11%.

Com estes resultados foi definida a malha de 5 x 5 pontos, como a zona 1 para a instalação e a avaliação dos modelos arquitetônicos no interior do céu artificial. As dimensões desta zona são 0,88m x 0,88m com uma área de 0,77m², que representa 13% da área total do céu artificial (Figura 93). Essa área determina um tamanho adequado para a construção dos modelos arquitetônicos, que possibilita obter uma boa proporção nas suas dimensões.

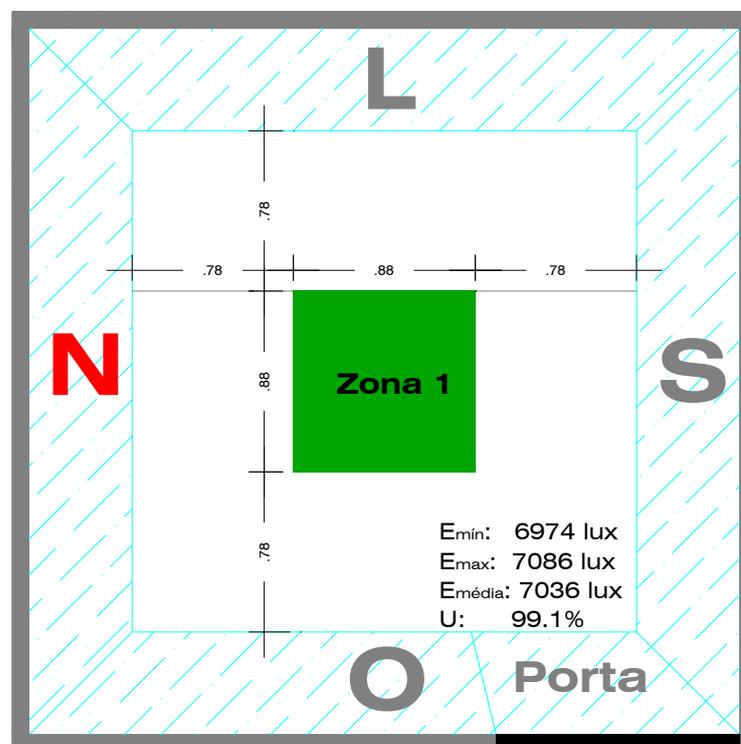


Figura 93. Zona 1 para localização de modelos arquitetônicos no céu artificial.

Entretanto, considerando que a malha de 7 x 7 pontos apresenta uma uniformidade na distribuição das iluminâncias de 98,16%, essa área foi definida como uma zona 2 adicional, com dimensões de 1,32m x 1,32m. Assim, possibilita-se a avaliação de modelos de maior tamanho, como por exemplo, modelos urbanos, ou modelos arquitetônicos que ocupem com seu volume a totalidade da zona 1, e que seja determinante no projeto, avaliar seu entorno construído, utilizando a zona 2 (Figura 94).

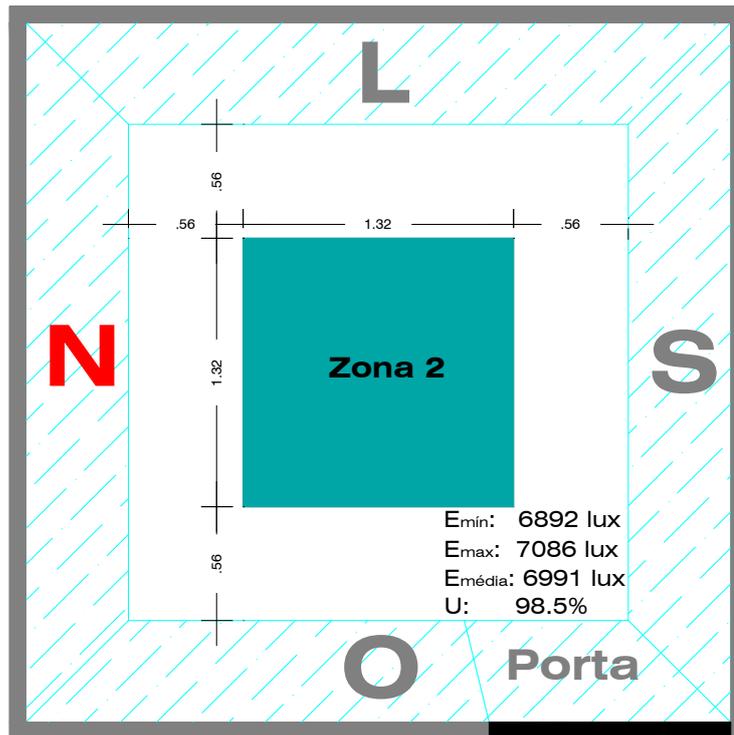


Figura 94. Zona 2 para avaliação do entorno dos projetos ou avaliações urbanas.

Outras avaliações de iluminação desenvolvidas no céu serão apresentadas a seguir, onde são expostas as determinantes do céu para a definição, construção e medição de modelos arquitetônicos em escala reduzida.

4.3.1. Distribuição das iluminâncias variando a altura da linha do horizonte.

Após da definição da zona 1 a 0,75m do piso, como determinante do tamanho e da localização dos modelos arquitetônicos no céu artificial, foi desenvolvida uma avaliação da distribuição das iluminâncias, nas alturas da linha do horizonte a 1,00m, 1,25m e 1,40m do piso.

Estes dados complementam os estudos de PDL desenvolvidos nestas mesmas alturas, apresentados no estudo da distribuição das luminâncias. As medições foram desenvolvidas usando o mesmo procedimento de avaliação das malhas de iluminâncias descrito previamente, mas utilizando um suporte para 4 fotocélulas LI-COR (Figuras 95-96).



Figura 95. Suporte para fotocélulas Zona 1.

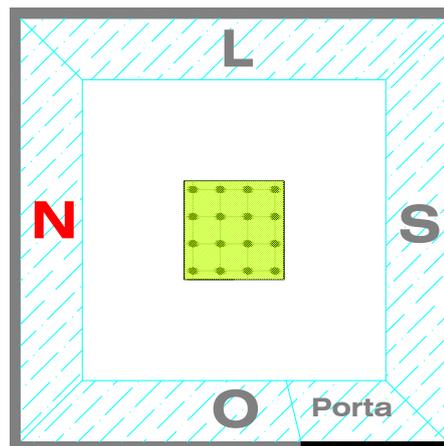


Figura 96. Malha de iluminâncias zona 1.

Os dados de iluminância obtidos nestas alturas, apresentaram uniformidades superiores a 99%, conservando a uniformidade obtida na zona 1 com base a altura de 0,75m do piso. As intensidades das iluminâncias medidas, apresentaram um aumento aproximado de 2%, conforme o aumento da altura da linha do horizonte (Tabelas 8-9-10).

Tabela 8. Iluminâncias a 100 cm. Tabela 9. Iluminâncias a 125 cm. Tabela 10. Iluminâncias a 140 cm.

Iluminâncias Zona 1 - H: 100cm					Iluminâncias Zona 1 - H: 125cm					Iluminâncias Zona 1 - H: 140cm				
N	7277	7309	7310	7288	N	7392	7445	7458	7440	N	7527	7577	7586	7568
	7270	7311	7311	7299		7400	7453	7477	7440		7532	7577	7596	7564
	7248	7300	7296	7274		7375	7444	7445	7420		7500	7550	7582	7532
	7220	7258	7252	7226		7345	7385	7384	7358		7463	7500	7509	7472
Lux	E_{max}:	E_{min}:	E_{média}:	U:	Lux	E_{max}:	E_{min}:	E_{média}:	U:	Lux	E_{max}:	E_{min}:	E_{média}:	U:
	7311	7220	7278	99,2%		7477	7345	7416	99,0%		7596	7463	7540	99,0%

As intensidades das iluminâncias registradas em todas as alturas avaliadas, apresentaram dados superiores a 7000 lux, níveis de iluminância adequados para as faixas de registro das fotocélulas Li-COR, e para o cálculo de fatores de iluminação natural (DF) com modelos arquitetônicos, considerando que é uma intensidade de iluminação estável e controlada, gerada por um sistema de iluminação artificial.

Com esta avaliação do funcionamento das iluminâncias, terminaram as atividades de medição fotométrica desenvolvidas para a calibração do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-USFC. Os resultados obtidos da distribuição de luminâncias e iluminâncias permitiram concluir que o céu artificial está calibrado e pronto para sua utilização, na avaliação de iluminação com modelos arquitetônicos em escala reduzida.

4.4. Espaço de trabalho no céu artificial

Após dos ajustes e da calibração do céu artificial, foi realizada a definição de um espaço de trabalho para a instalação e avaliação dos modelos arquitetônicos. A definição deste espaço de trabalho permite especificar as dimensões dos modelos, além de determinar a sua localização no interior do céu artificial.

A definição do espaço de trabalho foi determinada considerando um volume tridimensional, contido na zona 1 da distribuição de iluminâncias, e nas alturas do PDL avaliadas. Assim, foi definido um paralelepípedo de 0,80m de largura x 0,80m de comprimento e x 0,60m de altura, gerando um volume cúbico que ocupa 2,48% do volume total do céu artificial.

A base do paralelepípedo deve estar localizada entre 0,60m e 0,70m do piso, para que sua altura nunca supere o limite da linha de horizonte a 1,40m do piso, devido ao aumento do erro no PDL desta altura, com a proximidade ao forro difusor (Figura 97).

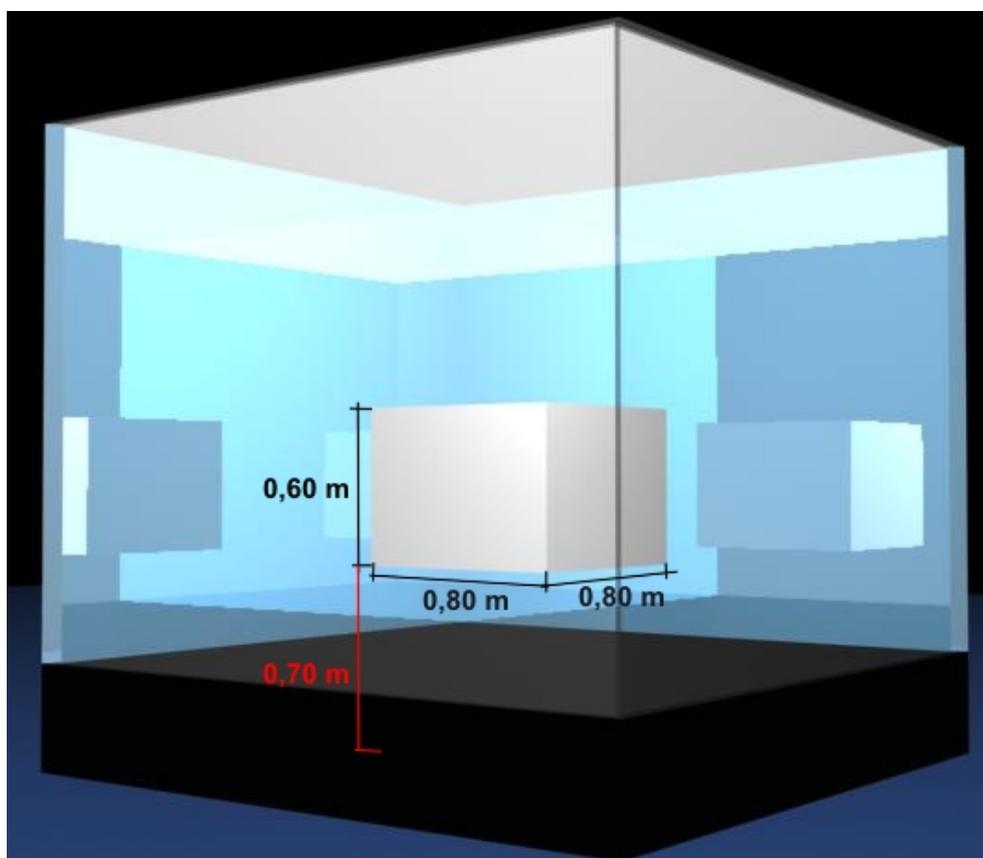


Figura 97. Paralelepípedo virtual de 80 x 80 x 60, cm para delimitação e instalação dos modelos arquitetônicos.

Este paralelepípedo virtual determina a relação do céu com os modelos arquitetônicos em escala reduzida, sendo a principal referência para a utilização deste espaço na avaliação da iluminação, garantindo seu funcionamento e a qualidade dos estudos desenvolvidos.

4.5. Outros aspectos para avaliação de modelos arquitetônicos em escala reduzida.

Além da definição do paralelepípedo virtual de trabalho, foram desenvolvidos estudos complementares com modelos arquitetônicos no céu artificial, visando determinar as condições em que estas garantam um ambiente de exposição adequado.

4.5.1. Orientação dos modelos

O PDL do céu apresenta um melhor funcionamento nas seções leste-oeste e norte-sul, devido à forma quadrada da sua planta. Outras orientações, como por exemplo, as diagonais, são afetadas pelos cantos do céu e as juntas de união das placas de espelhos. Esse aspecto foi verificado com a avaliação da distribuição das iluminâncias, observando que os cantos do céu artificial apresentam menores iluminâncias (ver figura 92). Por isso a orientação dos modelos arquitetônicos no interior do céu deve ser paralela às placas dos espelhos.

Entretanto foi observado que o céu artificial apresenta diferenças do seu PDL entre uma seção e outra, por isso foi desenvolvida uma avaliação do funcionamento das orientações e sua influência no cálculo dos DF em um modelo arquitetônico em escala 1:5.

O modelo avaliado é um volume simples, com uma janela localizada em uma de suas paredes. A base do modelo arquitetônico tem 80 cm de comprimento por 45 cm de largura e uma altura de 60 cm, encaixando-se no paralelepípedo virtual definido para as avaliações do céu artificial (Figura 98). No piso do modelo arquitetônico foram marcados 3 pontos a cada 19 cm, seguindo o eixo da janela, para medições de iluminância com as fotocélulas (Figura 99).

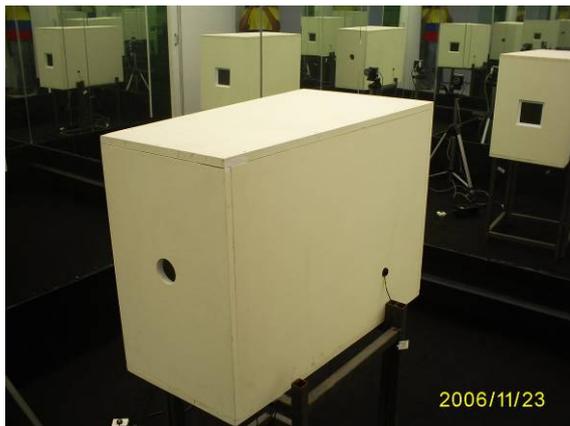


Figura 98. Modelo arquitetônico instalado no céu artificial com orientação leste.



Figura 99. Posição das fotocélulas no piso do modelo arquitetônico seguindo o eixo da janela.

O procedimento de avaliação considerou a medição de iluminâncias nos 3 pontos, em cada uma das quatro orientações do céu artificial, assim, com o registro da iluminação horizontal exterior fornecida pelo céu, foram calculados e avaliados os valores de DF para cada um dos pontos (Tabela 11 - Figura 100). Considerando que o ambiente de iluminação do céu é estável, que as fotocélulas estão devidamente calibradas, e que a construção e localização do modelo foram determinadas pelo pararelelepípedo virtual, a única variável desta avaliação foi a orientação do modelo.

Avaliação por Orientações				
E exterior	7790	P1	P2	P3
N	E (lux)	242	177	112
	DF (%)	3,11	2,27	1,44
L	E (lux)	243	175	109
	DF (%)	3,12	2,25	1,40
S	E (lux)	244	178	110
	DF (%)	3,13	2,28	1,41
O	E (lux)	238	170	106
	DF (%)	3,06	2,18	1,36

Tabela 11. Avaliação de iluminâncias por Orientações.

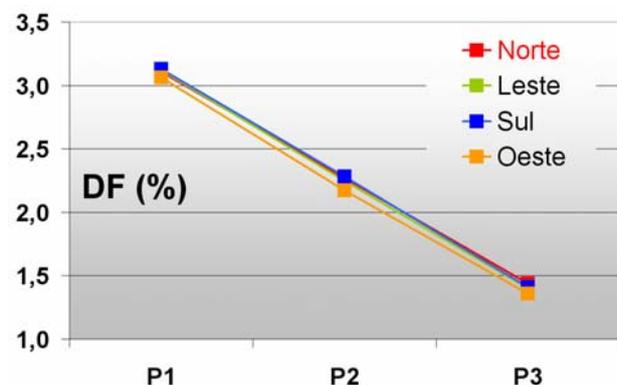


Figura 100. Percentual de DF em cada ponto, calculado por orientações.

As análises destes dados mostraram que o funcionamento das orientações leste, norte e sul, apresentaram um funcionamento muito aproximado entre elas, mas os valores de DF obtidos da orientação oeste foram mais baixos. Para avaliar esta diferença, foi calculada uma média dos valores obtidos nos três pontos das orientações leste, norte e sul, considerando que a proximidade deles determina um funcionamento adequado do céu. Assim, a partir desta média foi obtido o desvio dos

valores da orientação oeste em cada um dos pontos avaliados, os resultados foram: 3.18% no ponto P1, 4.60% no ponto P2 e 3.01% no ponto 3, com relação ao funcionamento médio das outras orientações. Entretanto, estes valores não são superiores a 5% para serem considerados inaceitáveis. Supõe-se que este comportamento seja gerado pela influência da porta do céu, localizada nesta parede, onde as placas dos espelhos não apresentam a mesma configuração de peças completas como ocorre nas outras orientações.

A consideração desta pequena diferença, junto com a localização dos furos de saída de cabos nas paredes oeste e norte do céu artificial, permitiram definir preferência na orientação dos modelos arquitetônicos para as paredes norte, leste e sul do céu, quando os projetos em estudo apresentem aberturas por uma, duas ou três de suas fachadas. Para projetos de iluminação que requerem avaliações simultâneas de 4 ou mais fachadas, as análises ainda podem considerar este erro na orientação oeste.

4.5.2. Efeito da escala

Como foi apresentado na revisão bibliográfica, o efeito de escala no estudo da iluminação com modelos arquitetônicos é apontado por muitos pesquisadores como uma das principais fontes de erro deste método (THANACHAREONKIT et al, 2005).

Este aspecto foi analisado como uma das principais determinantes da construção dos modelos arquitetônicos. Para esta avaliação foram construídos e avaliados 3 modelos arquitetônicos, em escalas 1:5, 1:7.5 e 1:10 (Figura 101).



Figura 101. Modelos arquitetônicos em escala 1:5, 1:7.5 e 1:10

No interior de cada modelo arquitetônico foram demarcados três pontos para a instalação das fotocélulas, conservando sua respectiva relação entre a distância e a abertura, na escala e na localização deles no piso de cada modelo arquitetônico. O posicionamento dos modelos arquitetônicos foi determinado pelo paralelepípedo virtual de trabalho, mantendo como referência para todos os casos, a localização do centro geométrico da janela, orientada em direção à parede leste do céu artificial.

Todos os dados registrados no interior dos modelos arquitetônicos foram processados com a iluminância horizontal exterior, fornecida pelo céu artificial. Com estes dados de iluminância foram calculados os DF de cada um dos 3 pontos dos 3 modelos arquitetônicos, como se apresenta na tabela 12 e na Figura 102.

Avaliação por Escalas				
E exterior	7425	P1	P2	P3
1: 5	E (lux)	220	136	92
	DF (%)	2,96	1,84	1,24
1: 7.5	E (lux)	214	130	90
	DF (%)	2,88	1,75	1,21
1: 10	E (lux)	210	128	89
	DF (%)	2,83	1,72	1,20

Tabela 12. Dados de iluminância obtidos nos modelos arquitetônicos em escala.

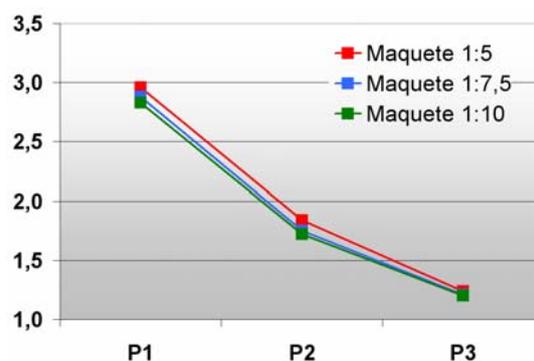


Figura 102. Curvas de DF (%) medidos nos modelos arquitetônicos 1:5, 1:7.5 e 1:10

As análises dos pontos avaliados mostraram que o modelo arquitetônico 1:5 apresentou valores de DF superiores aos outros dois modelos arquitetônicos. Para avaliar comparativamente a diferença obtida dos resultados de cada modelo, foi calculada uma média dos valores obtidos ponto a ponto, e determinar assim, seu desvio do padrão. Os desvios do modelo 1:5 foram 4,5% no ponto P1, 4,95% no ponto P2 e 1,65% no ponto P3; os desvios do modelo 1:7.5 foram 0,71% no P1, 1,41% no P2 e 0,47% no P3; para o modelo arquitetônico 1:10 os desvios foram 4,24% no P1, 3,54% no P2 e 1,18% no P3.

Os dados dos modelos arquitetônicos 1:7,5 e 1:10 apresentam-se muito próximos quando comparadas com o modelo arquitetônico 1:5, que apresenta desvio superior. Esta condição pode ser associada ao fato de que o material de acabamento do modelo arquitetônico 1:5 é uma camada de pintura sobre madeira,

enquanto que os modelos arquitetônicos 1:75 e 1:10 foram construídas com papel paraná, sendo que essa variável só foi observada após do desenvolvimento deste estudo, e provavelmente deve influenciar nos resultados obtidos.

Entretanto com esses resultados é possível afirmar que o efeito da escala não representa um erro significativo na avaliação e no cálculo de DF com modelos arquitetônicos no interior do céu artificial, considerando que os desvios obtidos da avaliação, são inferiores a 5% no funcionamento geral dos modelos arquitetônicos no céu.

4.5.3. Tratamento de superfícies exteriores

Além do efeito de escala e da orientação dos modelos no céu artificial, foi analisado o tratamento das superfícies exteriores dos modelos arquitetônicos, com os dados de DF em um modelo com acabamento branco e outro com acabamento preto, sendo a cor das superfícies a única variável deste estudo (Figuras 103-104).



Figura 103. Modelo arquitetônico 1:5 com acabamento branco.



Figuras 104. Modelo arquitetônico 1:5 com acabamento preto.

A análise foi realizada com a mesma metodologia de cálculo de DF, em três pontos interiores do modelo arquitetônico, como foi explicado nos itens anteriores. O modelo arquitetônico analisado foi construído em escala 1:5, orientado em direção à parede leste do céu artificial, tomando-se como referência de sua localização e orientação o paralelepípedo virtual e o centro geométrico da janela.

As iluminâncias interiores dos modelos arquitetônicos foram processadas com as iluminâncias horizontais exteriores, para o cálculo e avaliação dos DF ponto

a ponto (Tabela 13). Os valores de percentual de DF calculados são maiores no modelo arquitetônico branco, como era esperado, devido a suas superfícies claras para reflexão da iluminação no horizonte do céu artificial. A diferença percentual obtida da comparação ponto a ponto entre os modelos foi 4.48% no P1, 3.68% no P2, e 4.47% no P3 (Figura 105).

Avaliação Branca Vs Preta				
E exterior	7790	P1	P2	P3
Branca	E (lux)	243	175	109
	DF (%)	3,12	2,25	1,40
E exterior	7386	P1	P2	P3
Preta	E (lux)	220	160	99
	DF (%)	2,98	2,17	1,34

Tabela 12. Dados de iluminância e DF dos modelos arquitetônicos com acabamento Branco e Preto.

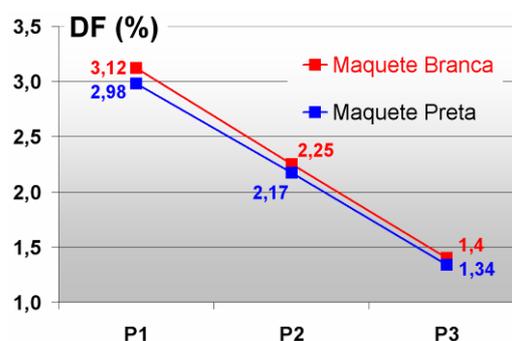


Figura 105. Avaliação ponto a ponto dos DF obtidos no estudo de acabamentos de modelos arquitetônicos.

Segundo as referências obtidas na revisão bibliográfica, onde foi determinado que o reflexo das superfícies exteriores do modelo no horizonte do céu, é considerado como um erro no seu funcionamento (ver página 40), é possível determinar que o funcionamento do modelo preto é o funcionamento correto na avaliação das cores superficiais dos modelos arquitetônicos avaliados no céu artificial.

Assim, esta avaliação mostrou que a influência das reflexões das superfícies exteriores dos modelos arquitetônicos gera uma diferença entre elas inferior a 5%, que pode ser considerada como não significativa, para estudos quantitativos. Esta condição se deve ao fato de que o efeito dos acabamentos brancos e pretos, na reflexão da iluminação nos espelhos, sempre apresenta-se em alturas que variam de 0 a 20 graus no horizonte do céu, onde as luminâncias são baixas demais para afetar consideravelmente os dados de DF no interior dos modelos.

Os efeitos do acabamento branco e preto dos modelos arquitetônicos podem ser observados diretamente na reflexão dos espelhos. Duas fotografias tiradas das janelas dos modelos arquitetônicos branco e preto, mostram a influência

do acabamento dos modelos arquitetônicos, no primeiro plano de reflexão dos espelhos e de suas múltiplas reflexões no horizonte do céu artificial (Figuras 106-107).



Figura 106. Fotografia do reflexo do modelo arquitetônico branca.



Figura 107. Fotografia do reflexo do modelo arquitetônico preta

A figura 108 mostra os efeitos diretos gerados pelo acabamento branco, primeiro no plano refletido diretamente frente ao modelo arquitetônico, e segundo, na incidência das múltiplas reflexões no horizonte do céu, alterando a distribuição esperada do modelo analítico de um horizonte com baixa iluminação.



Figura 108. Efeitos do acabamento branco de um modelo arquitetônico no interior do céu artificial.



Figura 109. Efeitos do acabamento preto de um modelo arquitetônico no interior do céu artificial.

Na figura 109, o efeito gerado pelo modelo arquitetônico preto, só pode ser considerado pela obstrução que o plano refletido faz, de uma porção do céu. Entretanto esta obstrução é um fator normal do volume e da localização do modelo arquitetônico no interior do céu artificial, e não pode ser considerada como um erro nos dados obtidos, pois é a mesma obstrução para os modelos branco e preto. Além

disso, o acabamento preto não apresenta nenhuma alteração importante no horizonte, pois essa cor se mimetiza nas múltiplas reflexões dos espelhos e na tendência da diminuição da iluminação do modelo analítico.

Desta avaliação pode-se concluir ainda que embora as diferenças obtidas entre ambos os modelos não sejam significativas (menores de 5%), recomenda-se o uso de modelos arquitetônicos pretos para avaliações quantitativas de iluminação no céu artificial, para não obter fatores de DF que possam ser elevados demais por uma maior iluminação admitida desde o exterior do modelo.

Assim mesmo, considerar avaliações com outras cores de acabamento, isso não iria representar conclusões que permitissem determinar se um acabamento de cor diferente da preta teria um funcionamento correto, mas só teria valores com diferenças menores aos valores da cor branca e em nenhuma situação menores aos valores obtidos da avaliação de cor preta.

4.6. Manutenção do céu

Além dos ajustes e a calibração do céu artificial, foram identificados aspectos importantes para garantir a qualidade dos estudos de iluminação desenvolvidos e a conservação desta ferramenta de pesquisa e ensino. A manutenção do céu apresenta principalmente dois aspectos: o primeiro é a limpeza dos espelhos e o fosso do céu, e o segundo é o tratamento do sistema de geração de iluminação constituído pelas lâmpadas, os exaustores e forro difusor.

Devido à umidade do ambiente exterior e a ocupação do céu por pessoas, a qualidade das reflexões dos espelhos pode ser afetada pela diminuição da iluminação. Por esta razão aconselha-se a limpeza dos espelhos pelo menos uma vez por mês, ou quando se planeja executar exercícios de ensino ou pesquisa de iluminação com modelos arquitetônicos.

Parte da manutenção dos espelhos está relacionada também com o contato físico das pessoas com os espelhos, gerando marcas de gordura das mãos que ficam impressas na superfície destes. Por esta razão, recomenda-se não haver qualquer contato com os espelhos.

Para a manutenção da qualidade do piso do fosso recomenda-se ingressar no céu sem sapatos, pois o carpete que forra o piso do céu acumula sujeira com muita facilidade. A limpeza do fosso é realizada com um aspirador de pó ou uma vassoura.

O tempo para a estabilização da iluminação no céu artificial é de aproximadamente 30 minutos. Assim, recomenda-se esperar este tempo mínimo antes de desenvolver qualquer atividade de medição de iluminação no interior do céu.

Para o tratamento do sistema de lâmpadas recomenda-se sempre ligar todos os circuitos simultaneamente, além de ligar o sistema de exaustores para manter o equilíbrio das temperaturas do ar na câmara dos reatores elétricos. Durante as avaliações o sistema de ventilação deve permanecer ligado. Quando terminadas as avaliações no céu, recomenda-se desligar primeiro o sistema de geração de iluminação e após 15 minutos desligar o sistema de exaustores. Recomenda-se também limpar as lâmpadas pelo menos uma vez a cada 6 meses.

Para o forro difusor recomenda-se a lavagem pelo menos uma vez a cada 6 meses. No momento de retirar ou colocar a tela, deve-se ter cuidado com o sistema de fixação para não estragar o tecido de cetim.

Como recomendação geral, sempre que o céu artificial não está em funcionamento é melhor mantê-lo com a porta fechada, para evitar o ingresso de poeira e insetos.

Capítulo 5. CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível avaliar e considerar os principais aspectos para o funcionamento de um céu artificial de tipo “caixa de espelhos”, partindo dos parâmetros definidos na revisão bibliográfica e nas atividades desenvolvidas para sua calibração. Assim, apresenta-se uma avaliação completa do céu artificial, em todos seus aspectos: suas características físicas como forma da planta e dimensões, seu sistema de geração de iluminação, seu funcionamento na distribuição de luminâncias e iluminâncias e finalmente sua relação com os modelos em escala reduzida.

Todas as atividades desenvolvidas para a avaliação e calibração do céu artificial, após da sua construção, visaram aproximar o Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL) ao modelo analítico de céu encoberto da C.I.E. O PDL encontrado foi próximo a 93%, em relação ao céu padrão da C.I.E., em todas as direções do azimute, o que permite concluir que o céu artificial apresenta um funcionamento adequado e sua correta utilização permite a simulação e avaliação de iluminação na arquitetura com modelos em escala reduzida.

Os erros identificados tais como a faixa de união entre o forro difusor e as paredes de espelhos e a redução da iluminação no centro do zênite do céu, ainda que possam ser corrigidos, não representam melhorias significativas no PDL do céu artificial. Outros aspectos de erro não avaliados neste estudo, tais como a verticalidade dos espelhos e a ortogonalidade da planta quadrada do céu, podem melhorar a proximidade do PDL com o modelo analítico da C.I.E., mas estes aspectos devem ser considerados e avaliados durante a etapa de construção dos céus artificiais.

Os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que o método de medição e avaliação de luminâncias com o sistema fotométrico digital Lumetrix, e o método de medição e avaliação de iluminâncias com o sistema fotométrico Li-Cor, deve ser considerado como adequado para construir, ajustar, calibrar e utilizar corretamente um céu artificial de tipo “caixa de espelhos”.

Assim, o estudo fotométrico desenvolvido é o principal aporte deste trabalho, permitindo além da calibração do céu artificial, a definição da relação entre o céu e os modelos arquitetônicos em escala reduzida. Todas as medições realizadas permitiram gerar ampla base de dados de luminância e iluminância, obtidas com equipamentos corretamente calibrados. Assim, o processamento e análise dos dados, permitiu avaliar o funcionamento do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC.

A avaliação do PDL do céu em suas seções leste-oeste e norte-sul, em diferentes alturas do plano do trabalho, foram complementadas com o estudo de iluminâncias da zona 1 do céu, nas mesmas alturas. Assim, todos os aspectos do funcionamento do céu artificial, na distribuição e intensidade das luminâncias e iluminâncias, ficaram contidos na definição do paralelepípedo virtual de 0,80m x 0,80m de base e uma altura de 0,60m. Este volume delimita o tamanho dos modelos arquitetônicos em escala reduzida, determina sua localização entre alturas de 0,60m e 1,40m do chão, e define sua orientação, para um adequado desenvolvimento dos estudos de iluminação na arquitetura aplicando o método de modelos físicos em escala reduzida.

Após a calibração do céu e a definição do espaço de trabalho, o estudo de variáveis dos modelos, como a orientação, a escala e o tratamento das suas superfícies exteriores, permitiram uma série de conclusões que complementam este trabalho:

1. A orientação dos modelos no céu artificial deve ser considerado de acordo com o funcionamento das paredes de espelhos do sistema, assim o estudo de DF com os modelos determinou que as orientações leste, norte e sul apresentam um funcionamento mais próximo entre elas que a orientação oeste, ainda que a diferença obtida nos resultados não seja significativa para desconsiderar esta orientação.
 2. As diferenças de escala dos modelos não é significativa para o cálculo de fatores de DF no interior do céu artificial, assim a definição desta variável pode ser determinada por outros aspectos, tais como: os limites de tamanho e proporção de acordo com o projeto avaliado, a facilidade de modelagem de detalhes e a
-

relação com o tamanho dos equipamentos de medição e análise tais como fotocélulas, luxímetros ou câmeras digitais.

3. Ainda que o tratamento das superfícies exteriores das maquetes com cores branco e preto, não apresentem diferenças significativas entre elas no cálculo do DF, é recomendável utilizar modelos arquitetônicos com superfícies exteriores pretas e foscas, no estudo da iluminação no interior do céu artificial, pois a cor branca aumenta os valores de DF obtidos pela reflexão da iluminação no horizonte do céu, sendo isso considerado como erro.

O procedimento de avaliação e análise de DF, desenvolvido neste estudo de 3 variáveis relacionadas com os modelos arquitetônicos e sua relação com o céu artificial, permitem concluir a validade da calibração do céu artificial e as possibilidades metodológicas da definição do paralelepípedo virtual, para avaliações paramétricas de iluminação na arquitetura. As características do funcionamento do céu artificial, e as determinantes definidas pelo espaço de trabalho, permitem garantir uma correta utilização do céu artificial para atividades de ensino e pesquisa da iluminação na arquitetura.

No documento ANEXO 1 intitulado: “Recomendações gerais para avaliação de iluminação natural com modelos em escala reduzida sob céu artificial”, apresenta-se um roteiro para definição, construção e avaliação de modelos arquitetônicos no céu artificial de caixa de espelhos. Este roteiro foi desenvolvido e definido com um trabalho simultâneo a esta dissertação, onde foram avaliados 15 projetos arquitetônicos, por alunos da 5ª fase do curso de Arquitetura e Urbanismo, da UFSC, na disciplina Arq.5656 Conforto Ambiental – Iluminação, entre agosto de 2006 e fevereiro de 2007.

5.1. Limitações do trabalho

Um dos mais importante componentes metodológicos deste trabalho é a experimentação direta com equipamentos de medição de iluminação, que podem apresentar problemas e alterações na qualidade dos resultados, seja pelo desconhecimento dos equipamentos, das calibrações requeridas, da manutenção ou do seu funcionamento geral.

Neste trabalho foram usados especificamente dois tipos de equipamentos para medição de iluminação, Câmara Digital IQCam-RT32 Lumetrix para registro de dados de luminância, e um sistema de medição de iluminâncias com fotocélulas e *datalogger* da Li-Cor. O funcionamento destes está ligado a outras ferramentas como computadores e softwares especializados, que em alguns casos requerem a ajuda de profissionais de outras áreas, para um melhor entendimento do funcionamento e dos dados obtidos com estes equipamentos, apresentando algumas variações na programação de suas etapas durante o desenvolvimento do trabalho.

Estas dificuldades foram superadas com o apoio do pessoal do LabCon, integrando no trabalho experimental a valiosa colaboração dos bolsistas de iniciação científica, mestrandos, doutorandos e professores. Assim o trabalho foi desenvolvido com uma programação flexível de tarefas, que permitiu cumprir com os objetivos e o tempo determinados para esta dissertação.

Outro aspecto a considerar como dificuldade para o desenvolvimento deste trabalho foi a pesquisa de referências bibliográficas relacionadas especificamente com a calibração do céu artificial: todos os referentes encontrados falam da necessidade de aproximar o PDL do céu ao modelo analítico de céu encoberto da C.I.E, entretanto nenhuma curva de calibração foi encontrada. A referência mais importante de calibração do céus artificiais retangulares foi o estudo de caso apresentado no artigo "*Limits of Sky*", onde é introduzido o conceito de PDL, mais não se faz referência aos dados de calibração obtidos nesse estudo.

Finalmente, o tempo dedicado ao processo de avaliação e calibração do céu artificial, limitou o desenvolvimento de outras atividades relacionadas com a ampliação de seu conhecimento, tais como avaliações comparativas frente a outros métodos de análise de iluminação na arquitetura, tais como métodos gráficos, analíticos e computacionais, por isso, este tipo de atividades de pesquisa fazem parte das recomendações para trabalhos futuros, relacionados com o céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

O céu artificial de caixa de espelhos é uma ótima ferramenta de ensino e pesquisa do fenômeno da iluminação na arquitetura. Após de sua calibração espera-se seu uso constante pelos alunos da graduação e pós-graduação, diretamente com o trabalho em modelos arquitetônicos.

Entretanto alguns aspectos tratados neste trabalho podem ser aprofundados para melhorar o funcionamento e as possibilidades de uso desta ferramenta de simulação. Estes aspectos podem ser:

1. Avaliar comparativamente o funcionamento do céu artificial de tipo caixa de espelhos no estudo de iluminação com modelos em escala, frente a outros métodos de estudo de iluminação tais como os métodos gráficos, analíticos e computacionais
2. Aprofundar no estudo do efeito de escala em modelos arquitetônicos, avaliando um maior número de mostras e a validação estatística dos resultados.
3. Desenhar, executar e avaliar um sistema de heliodon integrado ao céu artificial de caixa de espelhos, que permita analisar simultaneamente o fenômeno solar com a iluminação natural, com modelos arquitetônicos em escala reduzida de espelhos.
4. Desenvolver avaliações paramétricas dos elementos do projeto de iluminação natural na arquitetura, que permitam quantificar DF de cada um deles, para a geração de tabelas e fichas de informação sobre seu funcionamento, que possam ser aplicados diretamente por alunos e arquitetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/NBR 15215-1. **Iluminação natural – Parte 1: Conceitos básicos e definições.** 2005

ABNT/NBR 15215-2. **Iluminação natural – Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural.** 2005

ABNT/NBR 15215-3. **Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos.** 2005.

ABNT/NBR 15215-4. **Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição.** 2005

ALEXANDER, D.K. **Daylight modelling: The sky dome.** Centre for research in the built Environment. Welsh School of Architecture. Cardiff. UK. 2000.

AGUIRRE J. **Ingeniería de procesos: Un acercamiento,** Ed 1, febrero de 2004. ISBN 958-9352-70-7

ASHRAE Standard 90.1 – 1999. **American society of heating,** Refrigerating and air-conditioning engineers, Inc. Atlanta, 1999.

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A., STTEMERS, K., **Daylighting in Architecture – a European reference book,** Commission of the European Communities, Directorate-General XII for Science Research and Development, James & James Ltd., 1993.

BARTENBACH LICHTLABOR. Disponível em <http://www.bartenbach.com>, 2007

BETTERBRICKS DAYLIGHTING. **Northwest energy efficiency alliance.** Disponível em <http://www.betterbricks.com/>. 2007

BODART, M. **The new Belgian artificial sky and sun and its validation.** IEA Task31, Symposium. Setembro de 2004.

CABEZA, J.M.L. **Fundamentos de transferencia radiante luminosa.** Sevilla. Crowley Editions. 2005. 125. ISBN: 84-609-4316-X

CABÚS, R.C. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil.** Tese de doutorado.1998-2002.

CARLO, J.; PEREIRA, F.O.R; LAMBERTS, R. **Iluminação natural para redução do consumo de energia de edificações de escritório aplicando propostas de eficiência energética para o código de obras do Recife.** Anais ENCAC, 2003.

CARNEIRO, F. L. L. B. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos.** 2ª ed. Rio de Janeiro.1996.

CIE STANDARD, **Spatial distribution of daylight - CIE standard overcast sky and clear sky.** Commission Internationale de L'Eclairage. Publication CIE S 003.3/E-1996, Vienna, Austria, 1996.

CLARO, A, **“Modelo vetorial esférico para radiosidade aplicado à iluminação natural”.** Tese de Doutorado. UFSC, Florianópolis, 1998.

COOSKY, C., LOVELAND J., MILLET, M., VANAGS, A. **“Limits of the sky”**. **Testing and evaluation of the current state-of-the art in mirror-box sky simulation**. Department of Architecture University of Washington. Washington, 1989.

CORBIS. Disponível em <http://www.corbis.com>, 2007

COTEDI 2000 - **Conferencia internacional sobre confort y comportamiento térmico de edificaciones**. Maracaibo - Venezuela junio 21 - 23 /2000. 435 p.

COTEDI 2005 - **IV Congreso latinoamericano de confort y eficiencia energética en la arquitectura**. 23 al 27 de Mayo de 2005. Ciudad de México, México.

EVANS, J.M.; BAROLDI, G.M.; MARMORA, M.I., **Diseño y construcción de un cielo artificial tipo espejo**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 1.N.1. Rio Cuarto, Cordoba, Argentina. Volumen 1, pp 121-124.

FONTOYNONT, M. **Daylight performance of buildings**, ENTPE, European Commission Directorate General XII for Science, James & James, Lyons, France, 1999.

GHISI, E. e TINKER, J.A. **Metodologia de avaliação do potencial de economia de energia em sistemas de iluminação através da utilização de fibras ópticas**. Anais ENCAC 2003.

GONZÁLEZ, A.; GARCIA, A.; SALAZAR, J. **Labor Cero. Arquitectura a la medida**. Argos S.A. Medellín. ISBN 958-97871-0X2006.

GONZÁLEZ, A.; GARCIA, A.; SALAZAR, J. **Estudios de iluminación en modelos a escala**. Em: COTEDI 2005. IV Congreso Latinoamericano de Confort y Eficiencia Energética en la Arquitectura. 23 al 27 de Mayo de 2005. Ciudad de México, México. IN07 pág 307.

GONZÁLEZ A. e ROLDAN J.E. **Metodología para simulación del comportamiento térmico de edificaciones**. Tesis de Grado. Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia.2001

HOPKINSON, R.G. , KAY, J.D. **The lighting of buildings**. New York, Frederick A. Praeger, 1969.

HOSSDORF, H. **Modelos reducidos - Método de cálculo**. Instituto Eduardo Torroja. Madrid 1972. - 270 p.

IEA-TASK 31 - **Daylighting buildings in the 21st century**. Disponível em <http://www.iea-shc.org/task31/>.

ISO/FDIS - 15469 - CIE S 011/E. **Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky**. INTERNATIONAL STANDARD. 2003

IDMP. Disponível em <http://idmp.entpe.fr>. 2007

JACOBS, A. TSANGRASSOULIS, A, FONTOYNONT, M, et al. **SynthLight fundamentals handbook**. European educational infrastructure on energy efficient lighting technologies, assisted by 3D environments. 2004.

KIM, K.S; BOYER, L; DEGELMAN, L. **Daylighting analysis through scale model, full scale measurements and computer analysis for a Texas A&M university campus.** Texas, USA.1985.

KITTLER, R., **The need for standard skies and models for energy conservation measures**, Lighting Research and Technology vol. 26 (4), Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1994. pp 171-180.

LI-COR, **LI-COR radiation sensors - Instruction manual**, LI-COR inc. Publication No. 8609-56, Lincoln, USA, 1991.

LITTLEFAIR, P. J., **Measuring daylight – The effective use of scale models.** UK-ISES. Research & Technology, Vol.22. 1989

LOVE, J. A., NAVVAB, M., **Daylighting estimation under real skies: a comparison of full-scale photometry, model photometry and computer simulation.** Journal of the Illuminating Society, 20 (1), pp 140-156, New York, 1991.

LOVELAND, J. **The appearance of daylight.** Lighting desing Lab. Norwest Energy Efficiency Alliance.USA.2003.

LOVELAND, J. and BROWN G.Z. **Beyond the bulbs: In praise of natural light.** Em: The New York Times, article by Briam Libby, June 17 de 2003. New York. USA. 2003

LUMETRIX. **Manual corp RT32 digital photometric image analysis system v3.10 user.** Maio/2006.

LJUNG L. and GLAD T. **Modeling of dynamic system**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 361 pages, ISBN 0-13-597097-0, 1994.

MAJOROS A. **Daylighting. Plea notes 4, Passive and low energy architecture international.** Design tools and techniques, Edited by S V Szokolay, Brisbane. Australia. 1998.

MARDALJEVIC, J. **A 'Gold Standard'. Dataset for the validation of illuminance predictions.** Institute of Energy And Sustainable development. Montfort University. 2002.

MILLET, M. e LOVELAND J. **Teaching lihgt: its importance in architectural education.** Millet and Loveland. Volume 2. Right Light 4.1997.

MOORE, F., **Concepts and practice of architectural daylighting**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

NAVVAB, M, **Scale model photometry techniques under simulated sky conditions**, The 1995 IESNA Annual Conference, Illuminating Engineering Society of North America, summer, 1996. pp 160 – 171.

NIOSH. **National institute of occupational safety and health (Malaysia).** Disponível em: <http://www.niosh.com.my/>. 2007.

PEREIRA, F. O. R. e SOUZA, M.B. **Apostila de conforto ambiental - iluminação**, Centro Tecnológico. Curso de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

ROBBINS, C., **Daylighting – Design and analysis**, Van Nostrand Reinhold, New York, USA. 1986.

ROY, G. G., **A comparative study of lighting simulation packages suitable for use in architectural design**. School of Engineering Murdoch University. U.K. 2000.

REINHART, C.F **Discussion of Mardaljevic's paper: Verification of program accuracy for illuminance modelling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings**. NRCC-47043.2004.

SALAZAR J. e GONZALEZ A. **Luz natural en la arquitectura**. Cristalería Peldar S.A. Envigado, Colombia. 2004

SCHILER, M. (Eds). **Simulating daylight with architectural models**. Daylighting Network of North America/University of Southern California, Los Angeles. USA. 1987.

SOUZA, R. V. G. **Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para a descrição dos fenômenos de iluminação natural externa e interna**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, Brasil 2004.

SOUZA, R. V. G. e CARLO, J.C., **Avaliação de ambiente existente para comparação entre métodos de cálculo de iluminação natural**. Anais do II Encontro Latino-Americano e V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ANTAC. Florianópolis: 1999.

SZOKOLAY, S. **The imperative environmental one**. The 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. PLEA 1997 Kushiro, Japan. Proceedings Vol 1, 1997.

SZOKOLAY, S. **Environmental science handbook, the construction press**, Lancaster, England, pp 77-184, 1980.

SZOKOLAY, S. **Introduction to architectural science: the basis of sustainable design**, Architectural Press, Elsevier Science, pp 95 – 126. Oxford, U.K, 2004.

TSANGRASSOULIS, A. e SYNNEFA A. **Integration of electric lighting-daylighting**. SynthLight Handbook. Chapter 4.2004.

THANACHAREONKIT, A., ANDERSEN, M. SCARTEZZINI, J-L. **Comparing daylighting performances assessment of buildings within scale models and test modules**. Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH – 1015 Lausanne. 1998.

TREGENZA, P. R. **Daylight Coefficients**. Lighting Research & Tecnology. Volume 15 No 2. SAGE Publications. Disponível em <http://lrt.sagepub.com/>.1983.

TREGENZA, P.R. **Daylighting algorithms**, ETSUS 1350, School of Architecture Studies, University of Sheffield, Crown Publishing, 1993.

YAÑEZ G. **Arquitectura Solar. Aspectos pasivos, bioclimatismo e iluminación natural**. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid. España. 1988.

I. Anexo. Recomendações gerais para avaliação de iluminação natural com modelos em escala reduzida sob céu artificial.

Neste capítulo será apresentado um roteiro de trabalho para o desenvolvimento de avaliações de iluminação com modelos arquitetônicos em escala sob céu artificial. Com este roteiro pretende-se orientar os alunos de arquitetura e pesquisadores de pós-graduação para a utilização do céu artificial na análise quantitativa da iluminação natural (Figura I.1).



Figura I.1 Modelo arquitetônico 1:25 da “Church of Light” do Arquiteto Tadao Ando. Maquete: Cecília Lenzi. Céu Artificial LabCon fevereiro de 2007.

O roteiro da utilização do céu artificial é apresentado por etapas que se iniciam com a seleção do projeto arquitetônico e as variáveis que serão analisadas. Em seguida, serão indicados alguns aspectos referentes à construção e modelagem dos modelos arquitetônicos, seguindo com a instalação deles no interior do céu, a medição de dados de iluminância e o processo de avaliação dos resultados. A estrutura deste roteiro visa o desenvolvimento de avaliações paramétricas das variáveis arquitetônicas relacionadas com a iluminação natural na arquitetura. O método de análise proposto pode ser utilizado tanto como ferramenta durante as primeiras etapas do projeto, como também na etapa de detalhamento final.

I.1. Planejamento do estudo

A primeira etapa deste roteiro é planejar o estudo da iluminação do projeto arquitetônico, determinando a complexidade das avaliações a serem desenvolvidas. Este planejamento permite organizar o tempo e os recursos disponíveis para as atividades a serem realizadas pelos alunos e pesquisadores.

A formulação das hipóteses e alternativas é a principal ferramenta do planejamento do exercício, determinando as condições para a construção e medição dos modelos arquitetônicos. Neste planejamento deve-se gerar um cronograma de atividades, que começa com a definição do espaço a ser avaliado, o tempo de construção da maquete, o número de variáveis para o estudo, os equipamentos fotométricos necessários, e a utilização do céu artificial. Entretanto, esta programação do exercício deve ser flexível, pois no decorrer do trabalho podem surgir novas hipóteses e alternativas para o desenho do sistema de iluminação do projeto (Figura I.2).



Figura I.2. Variáveis do projeto de iluminação de uma casa analisada com modelo arquitetônico.

I.2. Determinantes do projeto.

A definição do projeto para a avaliação parte da informação arquitetônica de plantas, seções e demais dados que sejam relevantes quanto à iluminação no ambiente interior. A qualidade dos resultados está ligada ao detalhamento desta informação, entretanto uma avaliação do funcionamento da iluminação pode apresentar diferentes graus de complexidade, desde aberturas simples em volumes regulares para avaliações qualitativas (Figura I.3), até sistemas de iluminação em projetos de formas e espaços complexos para avaliações quantitativas (Figura I.4).

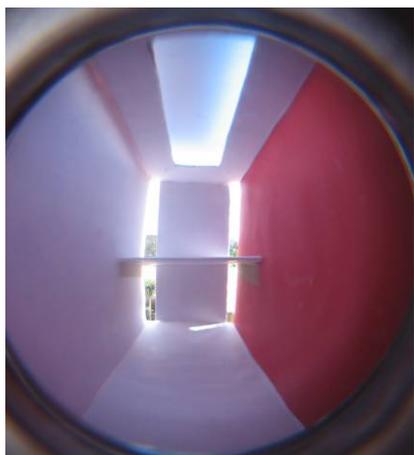


Figura I.3. Avaliação qualitativa de iluminação natural com caixa de sapatos.



Figura I.4. Avaliação quantitativa de iluminação com modelo arquitetônico no céu artificial do LabCon.

O método de avaliação de iluminação não apresenta restrições quanto à escolha de projetos para o estudo. Teoricamente qualquer projeto pode ser avaliado, sempre que o planejamento do exercício e suas alternativas cumpram com os parâmetros de avaliação determinados por este método, com relação às características dos modelos arquitetônicos, à utilização do céu artificial e aos procedimentos de avaliação propostos.

Considerando que o fenômeno da luz é complexo na sua relação com a arquitetura, a definição do projeto deve considerar esta complexidade no desenvolvimento do estudo, fazendo a avaliação correta daqueles aspectos de maior relevância no funcionamento da iluminação, tais como os sistemas de captação, de passagem e de controle da luz.

I.2.1. Definição da área de análise

Para os estudos quantitativos de iluminação, deve-se determinar uma área no interior do projeto para análise da iluminação com fotocélulas. A definição desta área está relacionada com o plano do trabalho do espaço, determinado pela função deste, como por exemplo, alturas de bancadas de trabalho em um laboratório, ou as carteiras em uma sala de aula. Algumas outras zonas podem ser avaliadas também, tais como as paredes, o chão ou o teto dos projetos.

As características da área de análise devem ser definidas antes da construção dos modelos arquitetônicos, pois a instalação das fotocélulas requer o controle dos cabos que ligam estas com o *data logger*. É importante considerar também esta área de análise em relação ao tamanho das fotocélulas no interior das modelos arquitetônicos para determinar, em escala, a altura dos planos de trabalho avaliados (Figura I.5).

Localização do Ambiente na Casa

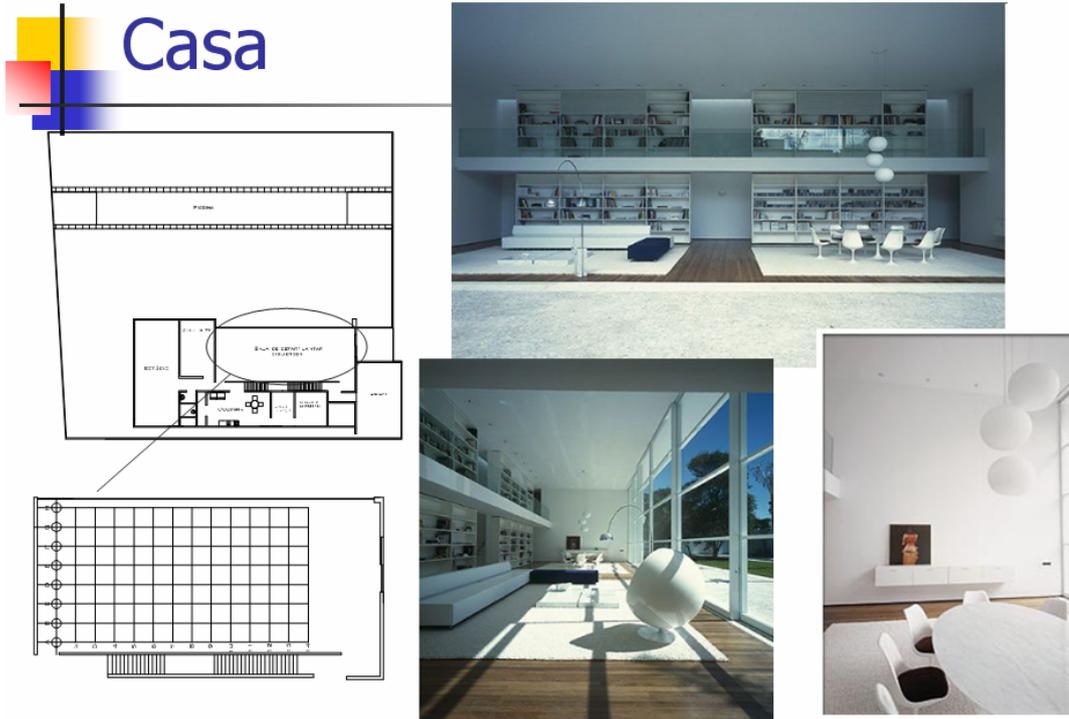


Figura I.5. Planejamento para o estudo de iluminação da casa Gama Issa do arquiteto Márcio Kogan. Alunas Marina Turnes e Priscila Koch. Agosto de 2006.

I.2.1.1. Malha de pontos

A definição da área para a análise da iluminância é determinada através de uma malha de pontos, que indica a localização das fotocélulas no interior do modelo arquitetônico. As características desta malha são definidas pelo número de fotocélulas disponíveis para a medição e estas deverão ser distribuídas uniformemente (Figura I.6).

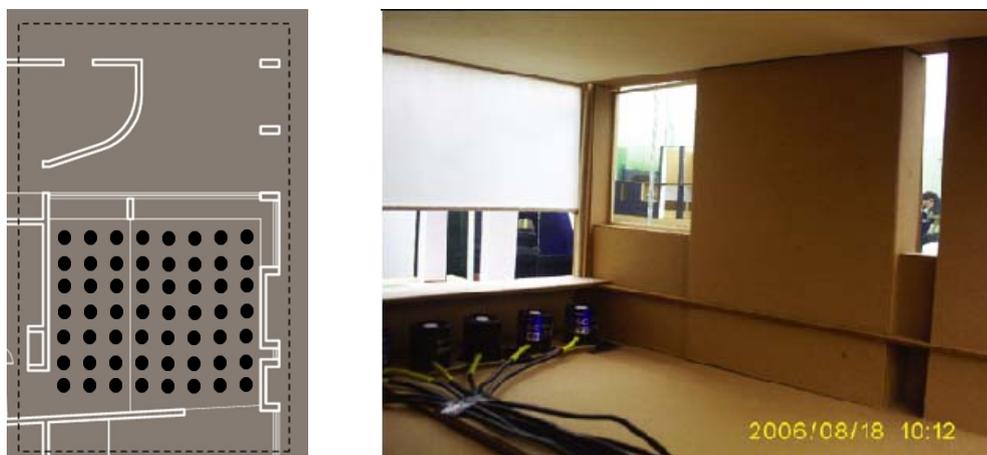


Figura I.6. Malha de pontos e fotocélulas para medição de iluminâncias no céu artificial do Labcon. Alunos: Agustín Massanet, Diego Artur Taminini, Pedro A. R. Tomás. Agosto de 2006

Os pontos da malha distribuem-se primeiro em um eixo transversal do espaço, geralmente paralelo às janelas ou ao sistema de aberturas. O comprimento da área deve ser dividido em partes iguais, de acordo com o número de fotocélulas, demarcando no centro de cada uma um ponto denominado com um número, por exemplo, para identificar as colunas. Para o eixo longitudinal a medida entre os pontos pode ser definida pela mesma distância entre os pontos do eixo transversal, definindo assim o número de filas, e pode-se denominá-las com as letras do alfabeto.

A relação de colunas x filas depende, então, do tamanho e da forma da área de análise e da quantidade de pontos definidos pelo número de fotocélulas para as medições, sendo recomendável usar o maior número possível, para obter uma resolução melhor da malha de pontos para a análise. No caso das filas, as distâncias entre eixos não depende das fotocélulas e sim da largura da área de análise.

1.2.1.2. Sistema de suporte das fotocélulas

Após de definida a malha de pontos, é importante definir o sistema de suporte das fotocélulas. Este sistema geralmente tem forma de “T” ou “L”, onde se demarcam os pontos das colunas para a instalação das fotocélulas em seu eixo transversal e as distâncias das filas em seu eixo longitudinal. Este suporte tem várias funções (Figuras I.7 - I.8 - I.9):

1. Sustentar e estabilizar as fotocélulas garantindo a horizontalidade delas,
2. Recolher e arrumar os fios das fotocélulas no interior da maquete,
3. Deslocar as fotocélulas pelo interior da maquete marcando as posições das filas de acordo com as medidas de seu eixo longitudinal,
4. Regular a altura do plano de trabalho.



Figuras I.7-I.8-I.9. Funções do sistema de suporte das fotocélulas.

Cada suporte está relacionado com a área de análise de cada projeto. A qualidade do estudo pode depender da qualidade deste suporte, e por isso sugere-se o uso de madeira para uma sustentação adequada das fotocélulas.

I.2.2. Tamanho e escala dos modelos arquitetônicos

O tamanho dos modelos arquitetônicos para avaliações quantitativas no céu artificial foi definido pelo paralelepípedo virtual do céu artificial. O limite do tamanho é de 80 x 80 cm de base e altura máxima de 60 cm. Assim, as características dimensionais do projeto estabelecem alternativas para a seleção da escala para a construção da maquete. Entretanto, o tamanho definido pela zona 1 de distribuição de iluminâncias, no interior do céu artificial, pode ser complementado pela zona 2, em casos onde seja necessária a modelagem de aspectos do projeto, tais como o entorno, as construções vizinhas ou elementos próprios da arquitetura do projeto como pátios, varandas ou sacadas (Figura I.10).



Figura I.10. Modelo arquitetônico no limite da zona 1 do céu artificial e ocupa a zona 2 com a modelagem do entorno do projeto. Aluna Greyce Kelly. Fevereiro 2007.

O tamanho e a escala têm estreita relação na definição do projeto para as avaliações quantitativas no céu artificial. Delimitado pelo tamanho limite, estabelecido neste método, o projeto depende da escala para conservar as proporções dimensionais entre os seus elementos.

Na revisão bibliográfica (ver tabela 3, capítulo 2), foram apresentados os limites de escala para a construção de modelos arquitetônicos de avaliação de iluminação, de acordo com os objetivos do estudo e o nível de detalhamento requerido. Esta classificação complementa os aspectos relacionados com a definição da escala expostos neste método de avaliação. Como foi apresentado no capítulo 4, o efeito da escala não apresenta divergências que possam ser consideradas como erro significativo, para os dados obtidos na avaliação da iluminação.

Na definição da escala da maquete é possível que se apresentem projetos com proporções entre largura, comprimento e altura, que dificultam a determinação de uma boa

relação, entre o tamanho limite determinado pelo céu e a escala para a construção da maquete. Quando esta situação se apresenta, a escolha do tamanho limite poderia determinar o uso de uma escala pequena, mas com poucas possibilidades de modelagem do ambiente interior, gerando um volume de maquete grande com baixo aproveitamento da área de análise (Figura I.11).



Figura I.11. Modelo arquitetônico em escala 1:15 de uma residência em Yamasaka, Japão. Alunos Agustín Massanet, Diego Artur Taminini, Pedro A. R. Tomás. Agosto de 2006.

Esta situação pode ser resolvida em alguns casos com a construção de um modelo seccionado, prevalecendo assim a eleição de uma escala maior, mas que não ultrapasse o tamanho limite determinado pelo céu artificial. Esta decisão se suporta na idéia de que a maquete de estudo de iluminação tem como objetivo principal modelar e recrear ambientes interiores, conservando a relação destes com as aberturas e janelas do projeto.

I.2.3. Modelagem

A modelagem do projeto tem como objetivo a reprodução exata das características físicas do espaço interior, onde pretende-se efetuar o estudo da iluminação. Um dos principais aspectos da modelagem é a reprodução das características óticas das superfícies que integram o espaço avaliado. As texturas e as cores devem ser consideradas na construção dos modelos arquitetônicos, especialmente naqueles casos onde o efeito da iluminação depende principalmente da componente refletida interior, do fluxo luminoso, como por exemplo, zonas interiores afastadas das aberturas e janelas do projeto (Figuras I.12 – I.13).



Figura I.12. Modelagem de piso de madeira.



Figura I.13. Modelagem de fechamento com papel de arroz.

Na modelagem do projeto o tamanho e a escala podem apresentar a possibilidade de construir modelos arquitetônicos com os mesmos materiais do projeto real. Esta decisão está associada à complexidade do estudo. Para projetos simples, muitos materiais podem ser representados por outros ajustáveis ao projeto em escala, tais como papelões, cartolinas ou folhas de papel colorido.

Uma alternativa para a modelagem de materiais complexos ou difíceis de escalar, como pedras, tijolos, madeiras ou qualquer outro material específico do projeto, é a impressão de uma fotografia do material (Figura I.14).



Figura I.14. Modelo com impressão digital do acabamento das paredes em pedra e o piso em granito branco, o piso de madeira é material real. Aluna Greyce Kelly, Fevereiro 2007.

Em muitos casos a modelagem das superfícies exteriores, fornece e/ou determina a iluminação no ambiente avaliado, e por isso esta etapa do trabalho requer de tempo e atenção durante o planejamento do método.

I.3. Seleção das variáveis do estudo

As variáveis para estes estudos apresentam tantas possibilidades, como a própria arquitetura. Entretanto, estas alternativas podem ser classificadas de acordo com o sistema de iluminação natural apresentado na tabela I.1.

Tabela I.1. Sistema de iluminação natural (Adaptado de PEREIRA, 1995)

SISTEMA DE ILUMINAÇÃO NATURAL NO PROJETO ARQUITETÔNICO				
CLASSIFICAÇÃO		EXEMPLOS	DESCRIÇÃO	OBSERVAÇÕES
Componentes de Condução				
Grupo 1	Espaços iluminados Intermediários	Galeria Aberta	São parte da zona perimetral da edificação e direcionam e distribuem luz natural aos espaços internos contíguos.	São analisados de acordo com suas características geométricas: • Tamanho • Localização • Forma.
		Galeria Fechada		
Grupo 2	Espaços iluminados internos	Pátios	São parte do ambiente interno e direcionam e distribuem luz natural para espaços específicos sem acesso direto ao exterior.	
		Átrio		
		Poço de luz		
		Duto de luz solar		
Componentes de Passagem				
Grupo 1	Componentes de Passagem Lateral	Janela	Estão localizados em superfícies verticais do envoltório, admitindo penetração de luz lateral.	São analisados de acordo com suas características geométricas: • Tamanho • Localização • Forma.
		Sacada sem cobertura		
		Parede translúcida		
		Parede cortina		
Grupo 2	Componentes de Passagem Zenital	Janela de cobertura	Localizados em geral, na cobertura, permitindo penetração de luz zenital ao espaço situado abaixo.	
		Lanterna		
		Dente de serra		
Grupo 3	Componentes de Passagem Globais	Cobertura translúcida	São parte do envoltório, podem envolver o espaço interno parcial ou totalmente, proporcionam iluminação lateral e zenital.	
		Domo		
		Cobertura Hemisférica		
Elementos de Controle				
Grupo 1	Superfícies de Separação	Convencional	Elementos transparentes ou translúcidos que admitem luz sem admitir passagem de ar, podem ou não prejudicar a visão.	São analisados de acordo com sua localização, mobilidade e propriedades óticas: • Transparência • Difusão • Redirecionamento
		Ótico		
		Prismático		
		Ativo		
Grupo 2	Telas Flexíveis	Toldo	Elementos móveis que proporcionam a obstrução total ou parcial da luz direta do sol e de abóbada.	
		Cortina		
Grupo 3	Telas Rígidas	Beiral ou marquise	Elementos opacos que obstruem e/ou redirecionam a luz solar direta que incide sobre a abertura, são normalmente fixos, sem regulagem.	
		Prateleira de Luz		
		Parapeito		
		Brise Vertical		
		Brise Destacado		
Grupo 4	Filtros Solares	Elemento vazado	Elementos que cobrem totalmente a abertura protegendo o ambiente interno da radiação direta do sol, podem ser fixos ou móveis.	
		Veneziana		
		Persiana Interna		
Grupo 5	Proteções Solares	Fechamento Tampão.	Elementos opacos, ajustáveis que cobrem toda a área da abertura	

A seleção prévia das alternativas ou variáveis do estudo permite ter uma melhor organização e controle do exercício, especialmente porque estas variáveis geralmente são modificações do projeto, que se reproduzem nos modelos arquitetônicos para o desenvolvimento de estudos paramétricos. Nesta etapa do método, o critério de eleição das alternativas para o estudo é muito importante, principalmente na determinação de soluções que tenham relação direta com a área de análise de estudo, garantindo a objetividade do exercício.

Para a análise das variáveis arquitetônicas em estudos paramétricos, recomenda-se construir modelos desmontáveis, que permitam, a partir de uma unidade básica, integrar peças adicionais. Outra opção é a construção de múltiplas peças como fachadas, coberturas ou paredes que possam ser trocadas facilmente no modelo arquitetônico durante o estudo.

I.4. Construção de modelos arquitetônicos

Na construção dos modelos arquitetônicos deve-se considerar que o objetivo deles é reproduzir, com o maior detalhamento possível, as características do ambiente interior que será avaliado. Por isso, os modelos arquitetônicos de estudo de iluminação não precisam apresentar necessariamente, na sua imagem exterior, uma relação direta com a forma do projeto. Assim são reproduzidas só as aberturas, janelas ou componentes de condução que permitem o ingresso de luz no interior do projeto, desconsiderando formas, volumes e demais elementos que não tenham relação direta com a iluminação (Figuras I.15 – I.16).



Figura I.15. Interior do modelo arquitetônico.



Figura I.16. Exterior do modelo arquitetônico.

Algumas considerações importantes para a construção de modelos arquitetônicos são a seleção dos materiais, o sistema de encaixe de peças, a qualidade do acabamento e o tratamento das suas superfícies exteriores.

I.4.1. Materiais

A seleção dos materiais está relacionada com aspectos como o tamanho, a escala e a modelagem da maquete, expostos previamente. Esta seleção também está relacionada com a complexidade do estudo. Considerando que este método é desenvolvido para avaliações paramétricas, a construção de modelos arquitetônicos com materiais especiais pode, além de ser muito cara, levar muito tempo o seu processamento. Entretanto, com o uso de materiais simples podem ser desenvolvidos modelos arquitetônicos eficientes e rápidos, com ótimos resultados.

Na seleção dos materiais é importante verificar as propriedades óticas deles, evitando por exemplo, a transmissão da iluminação em peças que deverão ser opacas. Este erro é muito comum na construção de modelos arquitetônicos com materiais leves como isopor ou cartolinas. Sempre que se escolhe um material, deve-se considerar sua forma de manipulação, seu corte e a sua interação com outros materiais. Os materiais têm principalmente duas funções: estruturar e modelar. Alguns materiais podem cumprir ambas as funções.

Os materiais usados para a estrutura dos modelos devem garantir sua estabilidade, principalmente porque o método de avaliação apresenta muitas manipulações durante o processo de estudo paramétrico. A qualidade do modelo arquitetônico pode afetar a exatidão dos resultados e, por isso, seu planejamento e construção são considerados as etapas que requerem mais tempo no desenvolvimento deste exercício.

I.4.2. Encaixe

Na definição das variáveis de estudo, se definem as peças do modelo arquitetônico que necessitam ser trocadas ou modificadas, durante o desenvolvimento do exercício. Para facilitar esta tarefa, recomenda-se utilizar um sistema de encaixe para a troca de peças, conservando sua qualidade na união delas, para evitar a criação de frestas que poderiam permitir o ingresso de iluminação, afetando na qualidade das medições.

O sistema de encaixe do modelo arquitetônico facilita a instalação do sistema de medição de iluminâncias, tais como o suporte com as fotocélulas, ou as câmaras digitais. Um sistema de encaixe planejado com antecedência permite a construção de modelos arquitetônicos que possam ser desmontáveis, para seu armazenamento e conservação. Assim, o modelo pode ser usado em múltiplas ocasiões e acompanhar todo o processo de desenvolvimento do projeto arquitetônico, fazendo dele ferramenta permanente de desenho e estudo.

Uma das peças de maior importância na construção dos modelos arquitetônicos é a base. Esta base geralmente se estende para conformar o entorno próximo ao projeto onde são modelados os pátios, as calçadas ou as varandas. A eleição de uma base firme e uniforme garante que o sistema de encaixe da maquete opere com exatidão, além de conservar sua estabilidade, pois os encaixes geralmente não apresentam compromissos estruturais dentro do sistema do modelo arquitetônico.

Uma consideração importante durante esta etapa de encaixe e construção do modelo arquitetônico é a definição da localização e da saída do sistema de suporte das fotocélulas, por uma de suas paredes. Esta saída deve permitir o deslocamento do eixo longitudinal do suporte e dos fios das fotocélulas, que geralmente são arrumados sobre este eixo para o controle deles, no interior do modelo arquitetônico.

I.4.3. Qualidade de acabamento

Além da modelagem, o acabamento dos modelos arquitetônicos deve garantir que sua qualidade na apresentação final. As uniões e as superfícies do modelo arquitetônico devem conservar estabilidade e uniformidade para não afetar a captação, distribuição e reflexão da iluminação em seu interior.

A qualidade do acabamento, em muitos casos, é afetada pela seleção de materiais leves, que se deformam facilmente com a umidade do ambiente ou da sua interação com outros materiais como colas ou tintas. Um erro no acabamento do modelo pode ser mais significativo na avaliação dos dados que os erros possíveis obtidos pelo sistema de medição ou fornecidos pelo céu artificial.

I.4.4. Superfícies externas.

È recomendável que as superfícies externas dos modelos arquitetônicos que não participam do sistema de iluminação do projeto, apresentem um acabamento preto e fosco. Esta condição, além de minimizar os efeitos das reflexões nos espelhos, também garante que as paredes, pisos e coberturas dos modelos arquitetônicos sejam opacos. Para este acabamento preto recomenda-se utilizar cartolinas ou papelão, para forrar as superfícies dos modelos arquitetônicos, pois a aplicação de tinta pode afetar a uniformidade dos materiais.

I.5. Instalação dos modelos arquitetônicos no céu artificial

A instalação dos modelos arquitetônicos no interior do céu artificial está determinada pelo paralelepípedo virtual definido no capítulo 3, localizado a 75 cm do chão e no centro geométrico do espaço. Para a orientação dos modelos arquitetônicos deve-se considerar o número de fachadas que participam no sistema de iluminação do projeto, seguindo a recomendação de utilizar a parede leste do céu como primeira alternativa (Figura I.17).



Figura I.17. Modelo arquitetônico 1:25 da “Church of Light” do Arquiteto Tadao Ando. Maquete: Cecília Lenzi. Céu Artificial LabCon fevereiro de 2007.

A base do modelo arquitetônico deve ser sustentada e nivelada a 75 cm do chão por suportes metálicos ou de madeira (Figura I.18). Uma das principais atividades no interior do céu artificial é a instalação do sistema fotométrico de iluminâncias, constituído pelas fotocélulas e seu suporte (Figura I.19).



Figura I.18. Instalação e nivelção dos modelos no céu artificial.

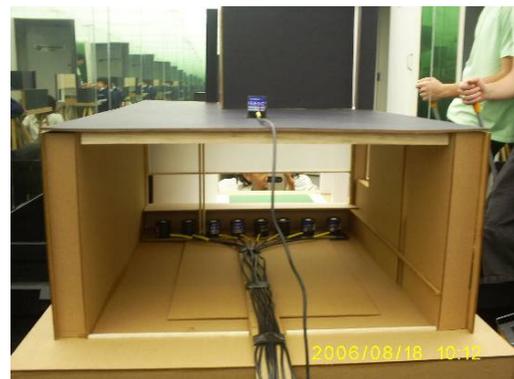


Figura I.19. Instalação do sistema fotométrico de iluminâncias.

A localização de cada fotocélula deve ser referenciada no sistema de *data logger* com relação a cada ponto da malha de dados de análise definidos previamente. Para a elaboração das malhas de dados, deve ser identificado cada ponto de medida e sua localização no interior do modelo arquitetônico. A instalação do modelo arquitetônico termina com o posicionamento de uma fotocélula adicional, geralmente na cobertura do modelo, para registrar a iluminância horizontal exterior, que possibilita o cálculo dos fatores de luz natural DF (Figura I.20).



Figura I.20. Localização final do modelo para as avaliações.

I.6. Medição de Dados

Conforme foi determinado no processo de condicionamento e calibração do céu artificial, os dados de iluminância devem ser medidos sem a presença de pessoas no interior do céu. A medição de iluminância se faz com a conexão das fotocélulas ao *data logger*, os dados registrados diretamente em lux, devem ser escritos em tabelas ou planilhas previamente definidas com a malha de pontos, da área de análise definida no planejamento do exercício.

O exercício de medição dos dados começa com o registro das iluminâncias na primeira posição da área de análise, registrando simultaneamente a iluminância horizontal exterior no *data logger*. Em seguida, deverá ser deslocado o sistema de suporte das fotocélulas, marcando as posições definidas no eixo longitudinal, para medição da segunda posição do eixo transversal. Esse procedimento se repete até complementar a totalidade da malha de pontos. Cada registro de um eixo demora aproximadamente de 2 a 3 minutos, assim, para malhas com filas de 10 eixos, cada medição demora de 20 a 30 minutos.

Uma vez terminada a primeira malha de medição, modificam-se as condições de iluminação do modelo arquitetônico, de acordo com as variáveis determinadas no exercício, sem alterar seu posicionamento ou sua orientação. Após das intervenções nos modelos, se repete o procedimento de medição de iluminâncias até obter todas as malhas de dados contidas no exercício.

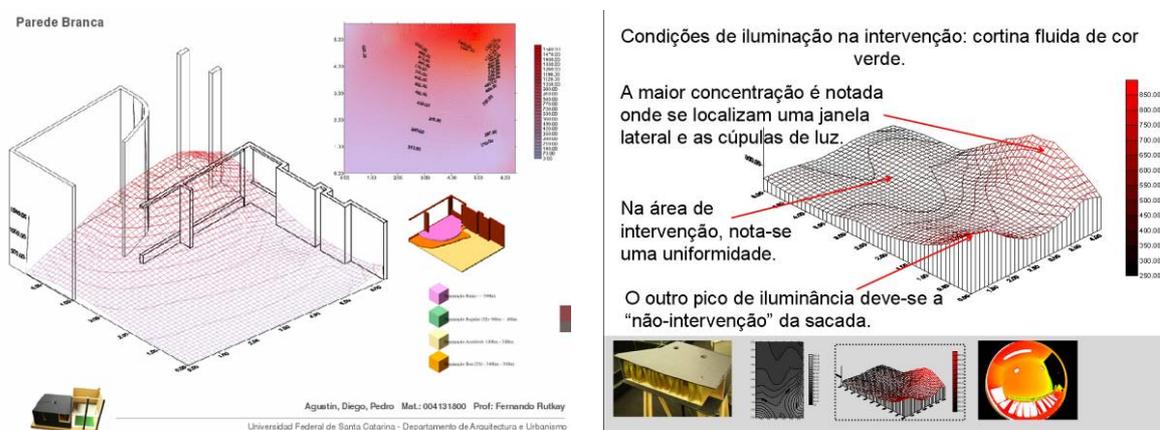
A medição de dados de iluminância no interior dos modelos arquitetônicos também pode ser desenvolvida com a instalação de pontos fixos, como foi realizado nas avaliações de orientação, escalas e superfícies do capítulo 4. Estas avaliações são mais rápidas, embora sejam limitadas a poucos pontos de medida, considerando que uma malha de análise das áreas interiores de um projeto, pode ter entre 60 e 120 pontos.

I.7. Processamento e representação dos dados

Os dados obtidos em cada medição são registrados pelas fotocélulas em unidades de iluminância (lux). Assim, as avaliações comparativas de iluminação podem ser desenvolvidas diretamente, comparando as diferenças obtidas entre cada malha ou ponto de medição. Os valores obtidos em lux não podem ser considerados como representativos, na intensidade e distribuição da iluminação no interior dos espaços avaliados, até que sejam processados com a iluminância horizontal exterior medida simultaneamente no interior do céu, para calcular os fatores de luz natural DF.

Para desenvolver avaliações de conforto e eficiência energética em edificações, o procedimento é obter o produto dos DF, de cada um dos pontos das malhas medidas nos modelos arquitetônicos, pela iluminância horizontal, confrontada para o local onde será localizado o projeto arquitetônico.

A representação dos dados finais pode ser realizada com a geração de curvas de isolux em planilhas de cálculo eletrônico ou programas de análises como o Winsurf, disponível no site do LabCon⁴ (Figuras I.21- I.22).



Figuras I.21- I.22. Representação de dados de iluminância obtidos no céu artificial. Alunos da disciplina Arq.5656 Conforto Ambiental – iluminação, 2006.

I.8. Utilização do céu artificial de caixa de espelhos LabCon-Arq-UFSC

Os resultados obtidos deste trabalho de dissertação e sua aplicação direta com alunos de 5 fase de arquitetura justificam a construção e o uso de céus artificiais de caixa de espelhos, em escolas de arquitetura e laboratórios de conforto ambiental, devido a seu custo

⁴ www.labcon.ufsc.br

relativamente baixo frente aos céus artificiais hemisféricos, além da sua efetividade e qualidade para simular condições de céu real encoberto.

O método proposto para utilização do céu artificial e a avaliação paramétrica de iluminação em arquitetura com modelos arquitetônicos, foi aplicado com alunos da 5ª fase do curso de Arquitetura e Urbanismos da UFSC, na disciplina Arq.5656 Conforto Ambiental – Iluminação nos semestres 01 e 02 de 2006. O exercício de avaliação quantitativa de maquetes proposto como trabalho final da disciplina, permitiu a análise de 15 projetos com mais de 40 variáveis de elementos de captação, de passagem e de controle de iluminação na arquitetura.

Para detalhar e exemplificar o roteiro metodológico proposto neste Anexo I se apresenta nos Anexos II e III, dois trabalhos desenvolvidos pelos alunos da disciplina Arq. 5656 Conforto Ambiental – Iluminação. No Anexo II se apresenta a análise da residência “Haus H” projetada por Caramel Architekten, em Linz, Áustria, 2004, trabalho desenvolvido pelas alunas Bruna Bervian, Renata D’Ávila e Thalita Barbosa, no semestre 01-2006. No anexo III se apresenta o estudo da “Capela da Luz” do arquiteto Tadao Ando, trabalho desenvolvido pelos alunos Cecília Lenzi, Mariana Nunes e Marcelo Carraro, no semestre 02-2006.

II. Anexo. Análise da Residência Haus H.

O objeto de estudo consiste em uma residência unifamiliar projetada por Caramelo Architekten, em Linz, Áustria, 2004. O projeto apresenta uma fachada envidraçada e cúpulas de luz localizadas no teto, as quais contribuem na iluminação interna da residência. O ambiente escolhido para estudo é a sala de estar da residência. A sala é um meio-andar entre a cozinha (no piso inferior) e um espaço de escritório (no piso superior). Toda a face sul é vitrificada e mostra apenas a estrutura metálica presente na construção de concreto armado (Figura II.1-2).



Figura II.1. Vista da fachada Sur envidraçada
(Fonte: Revista AU, 2006).



Figura II. 2. Vista interior da sala.
(Fonte: Revista AU, 2006)

II. 1. Análise do ambiente

A casa tem as paredes externas originalmente pintadas de preto. A face sul apresenta vidro como principal material, além de cortinas e persianas móveis, as quais podem ter sido instaladas simplesmente para garantir uma maior privacidade por parte da família, já que, no Hemisfério Norte, o sol nessa intensidade pode ser desejado. Se a residência fosse construída no Brasil, seria necessária a implantação de estratégias para controlar a entrada do sol e, conseqüentemente, a iluminação excessiva da área mais próxima à fachada de vidro. O excesso de luz natural pode gerar ofuscamento e, principalmente, ocasionar o ganho de calor acima do desejado.

II. 2. O modelo

As dimensões do modelo ficarem contéúdas dentro do paralelepípedo virtual de análise, calculado para o céu artificial de caixa de espelhos de LabCon-Arq-UFSC, considerando a construção de uma maquete em escala 1:15. Este modelo apresenta duas paredes pretas em uma das laterais do ambiente para a realização do estudo apenas na área onde está localizada a sala de estar da residência. A construção da maquete

considerou uma base sólida em madeira compensada, os materiais de acabamento interior simulam o acabamento do projeto original. A Maquete foi dividida em 80 pontos para a medição com fotocélulas no interior da sala estudada. A seguir, a planta baixa do ambiente e o esquema da localização dos pontos (Figuras II.3).

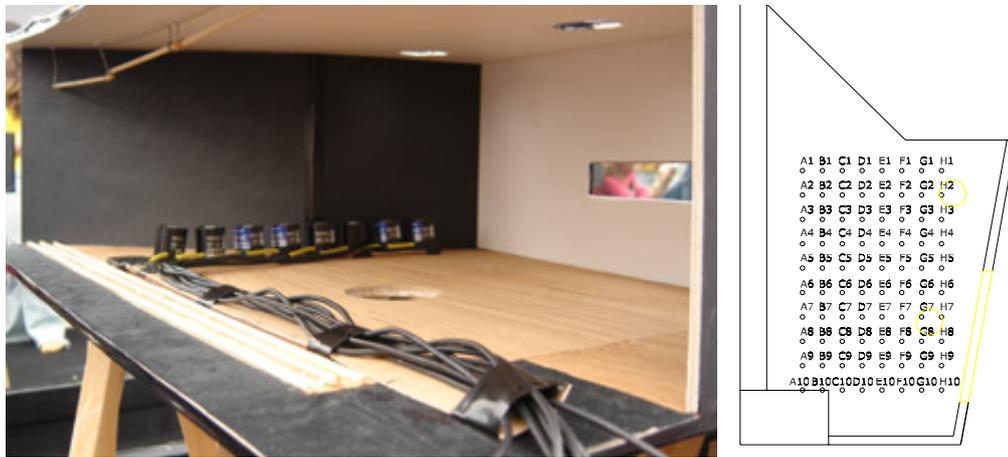


Figura II.3. Fotocélulas e malha de pontos para medição de iluminâncias no céu artificial do Labcon.

II. 3. Variáveis de análise

Para controlar a entrada de luz natural no ambiente de estudo, foi decidido que não seria adequado modificar a estrutura da residência através do fechamento das paredes para não descaracterizar a arquitetura, onde o vidro foi utilizado justamente para permitir a vista da cidade e o ganho de calor. Diante disso, a intervenção do grupo está centrada na instalação de painéis móveis ou cortinas, aqui considerados como elementos da arquitetura. Foram sugeridas três variáveis de cortinas, feitas com materiais alternativos a fim de controlar a insolação, e aumentar o nível de sombreamento da sala de estar da residência, bem como obter o efeito de cor através de um dos modelos. Além disso foi possível avaliar a combinação entre os diferentes sistemas de controle propostos.

II. 4. Processo

A instalação da maquete no interior do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC, foi determinada pela posição definida pelo paralelepípedo virtual. Cada um dos pontos interiores medidos com as fotocélulas, consideram uma base de 10 valores de iluminância, antes de passar à seguinte posição da malha de pontos, este tratamento possibilita estabelecer uma base de dados com suficiente informação, para tratamento estatístico dos valores obtidos experimentalmente. Simultaneamente com a medição dos valores de iluminância interior, foram medidos os dados de iluminância exterior horizontal, para o cálculo de DF.

II.4.1 Projeto Original

A medição de dados de iluminância no interior do modelo começou com o projeto original, para estabelecer um padrão de comparação com relação as variáveis de análise propostas. Os dados obtidos foram analisados e representados no programa Win-Surf (Figuras II.4 e II.5).



Figura II. 4. Projeto Original.

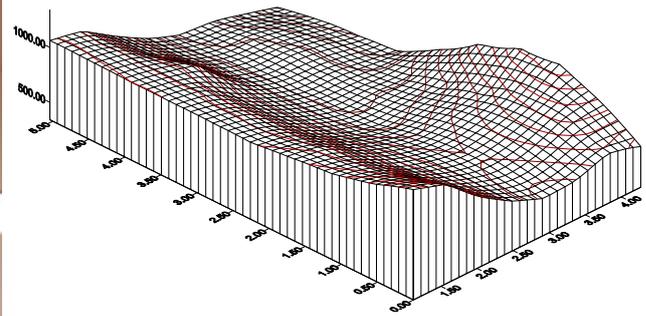


Figura II. 5. Dados da fachada envidraçada processados em Win-Surf.

II. 4. 2. Painéis metálicos

A primeira proposta das variáveis avaliadas foi a instalação de quatro painéis móveis, feitos com material metálico sob a forma de uma tela. Cada painel no projeto real apresentaria 2,30 metros de largura por 2,60 metros de altura o qual pode ser deslocado através de um trilho instalado no piso (Figura II.6). A análise foi feita com os quatro painéis dispostos em toda a extensão da fachada envidraçada, deixando a abertura da sacada da maneira original do projeto (Figura II.7).



Figura II. 6. Variável 1. Painéis metálicos.

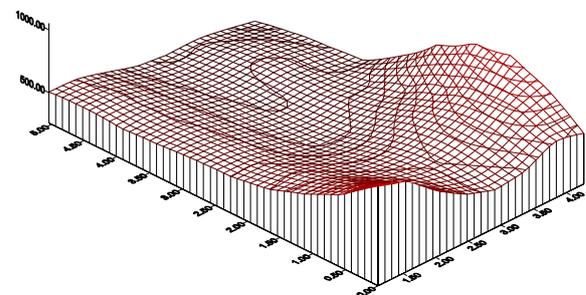


Figura II. 7. Dados dos painéis metálicos processados em Win-Surf.

II.4.3. Painéis de tecido

Esta proposta considerou a instalação de seis painéis móveis feitos com linho na cor branca. O linho caracteriza-se por ser um tecido um tanto rígido e com estrutura de fios espaçada a qual limita a passagem da luz. Cada painel tem na escala 1:1 1,55 metros de largura por 2,60 metros de altura (Figura II.8), podendo ser igualmente deslocado através do trilho no piso. A análise foi feita com os seis painéis dispostos em toda a extensão da fachada envidraçada (Figura II.9).



Figura II. 8. Variável 2. Painéis de tecido.

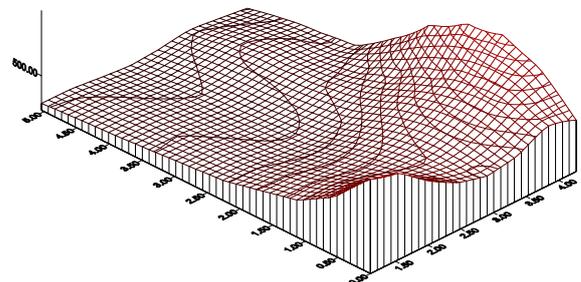


Figura II. 9. Dados dos painéis de tecido processados em Win-Surf.

II. 4.4. Cortina Fluida

A variável de uma cortina fluida foi instalada em três varões de madeira de 2,90 metros de comprimento cada, presos no teto da sala de estar. Foi utilizado um tecido bastante fluido, conhecido como voil, na cor verde. Para a cortina, foram utilizados três panos com 5,80 metros de largura e 2,60 de altura (Figura II. 10). A análise foi feita com a cortina disposta em toda a extensão da fachada envidraçada (Figura II.11).

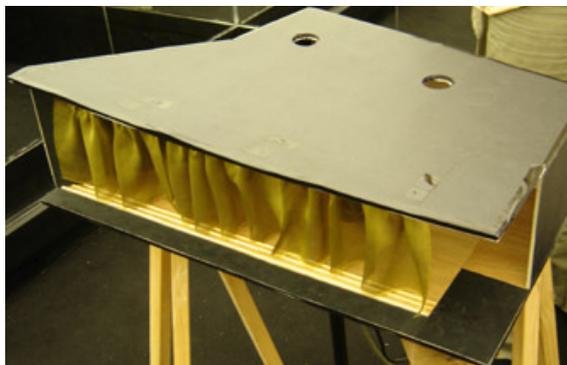


Figura II. 10. Variável 3. Cortina Fluida.

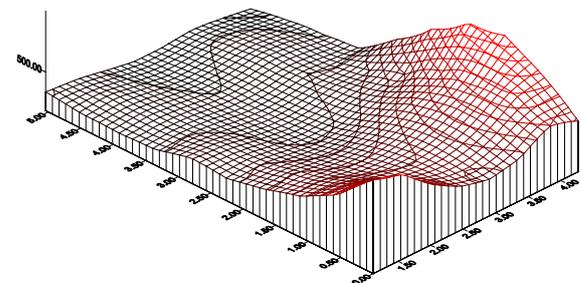


Figura II. 11. Dados da cortina processados em Win-Surf.

II. 4. 5. Cortina Fluida + Painéis Metálicos

Aqui, a análise foi feita com a cortina fluida instalada juntamente com os painéis metálicos (Figura II.12). Os painéis e a cortina foram dispostos em toda a extensão da fachada envidraçada (Figura II.13).



Figura II. 12. Variável 4. Combinação Cortina Fluida + Painéis metálico.

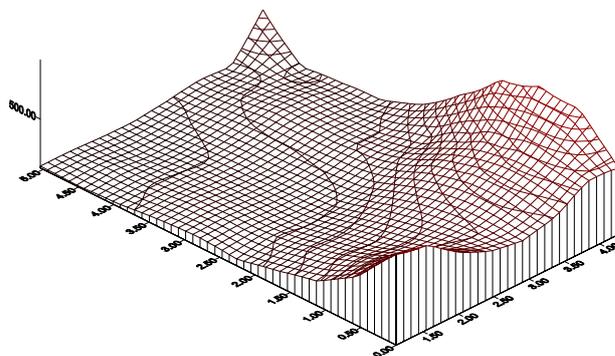


Figura II. 13. Dados da variável 4 processados em Win-Surf.

II. 4.6. Painéis de tecido entreabertos

Foram analisados os seis painéis de tecido com disposição não uniforme, na extensão da fachada envidraçada, ou seja, a fachada não foi totalmente coberta (Figuras II.14-15).



Figura II. 14. Variável 5. Painéis de tecido entreabertos.

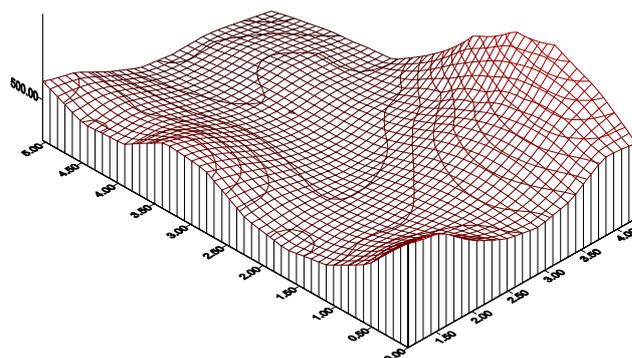


Figura II. 13. Dados da variável 5 processados em Win-Surf.

II. 5 Resultados

Através dos resultados obtidos na simulação com maquete no “céu artificial”, foi concluído que a proposta de instalação dos painéis e cortinas, interfere positivamente no controle dos raios solares que chegam ao ambiente, proporcionando maior conforto lumínico

em seu interior, à medida que o usuário é livre para controlar o fechamento dos mesmos, de acordo com a sua necessidade e desejo.

Todas as intervenções certamente aumentaram o controle sobre a iluminação admitida no ambiente. Cada material demonstrou um comportamento diferente, e todos com suas qualidades e restrições. Os painéis em linho, por exemplo, obtiveram o maior controle sobre a intensidade de luz, tornando a sala mais uniforme de acordo com a iluminação, porém é um bloqueio visual. Para tal foi simulada a opção de deixá-los entreabertos, permitindo a visão em certos pontos e controlando ainda parte da luz que entra. Os painéis cinza metálicos com trama bem espaçada permitem visão do exterior, mas foi o mais precário no controle da luz. As cortinas verdes foram escolhidas em material translúcido e de grande leveza na aparência, permitindo a apreciação da vista ainda com controle desejável da iluminação.

Foi observado também, nos gráficos, que onde existiam as cúpulas de luz (juntamente com a janela da fachada norte) e na sacada (onde não foi feita nenhuma intervenção) havia picos de maior intensidade luminosa. Através da realização do trabalho, foi percebido que é possível utilizar outros elementos, para diminuir a entrada dos raios solares num ambiente, além do fechamento com paredes e brises. É possível utilizar materiais alternativos como matéria-prima para painéis e cortinas, os quais podem ser definidos como elementos da arquitetura, já propostos em projeto, de grande importância na configuração e no conforto dos ambientes.

II. 6 Considerações sobre o trabalho.

“O grupo considera o conteúdo da disciplina de grande importância para a nossa formação como arquitetos. A maneira como os conteúdos foram ministrados foi bastante positiva, sempre intercalando as aulas teóricas com as atividades práticas. Salientamos que a parte prática da disciplina foi muito agradável de ser feita e é, sem dúvida, a melhor maneira de absorver os conhecimentos adquiridos”. (Tomado do relatório final do trabalho,)

III. Anexo. Análise da Capela da Luz do arquiteto Tadao Ando.

Este estudo foi realizado para a disciplina ARQ5656 - Conforto Ambiental: Iluminação, semestre 2006-02 ministrada pelo professor Fernando Oscar Ruttkay Pereira. Possui como objetivo desenvolver avaliações quantitativas de iluminação em edificações mediante o cálculo de fatores de distribuição de luz natural. Seu desenvolvimento busca efetivar a integração entre a teoria e a prática no ensino de iluminação natural no ambiente contruído.

O presente trabalho, que corresponde a 2ª etapa das atividades da disciplina, consiste na prática de projeto em um modelo em escala para a análise de Iluminação Natural. Esta etapa configura-se numa intervenção arquitetônica propriamente dita, que consiste em propor intervenções em um projeto arquitetônico com vistas a perceber as respostas nos índices de iluminação.

III. 1. Análise do ambiente

Para a realização deste estudo, foi feita a escolha de um projeto arquitetônico onde o elemento “luz natural” se mostrasse importante na composição. O projeto escolhido foi a “Capela da Luz” do arquiteto Tadao Ando, localizado em Osaka, Japão (Figuras III.1 – 2).



Figura III.1. Modelo em escala da capela da luz
(Fonte: www.designarq.com, 2006).



Figura III. 2. Vista interior da capela.
(Fonte: www.designarq.com, 2006).

A Capela da Luz, tal como as demais Capelas e obras de Tadao Ando, é marcada por uma simplicidade formal ao mesmo tempo monumental, que lhe confere uma forte sensação de espiritualidade. A luz é aqui trabalhada de forma magistral, e suas paredes de concreto aparente com cerca de 7 metros de altura, conferem uma escala monumental e imponente a todo o conjunto.

III. 2. O modelo

A maquete utilizada para o estudo foi construída na escala 1:20. Optou-se pela seção frontal da igreja, focando o estudo na avaliação da intensidade e distribuição da luz gerada pela abertura em forma de cruz, principal característica desta edificação. Desta forma, as intervenções propostas também foram focadas neste elemento. O modelo em escala reduzida foi construído com placas de isopor de espessuras correspondentes à escala, revestidas com papel “cartão chumbo” de forma a aproximar-se das características da edificação real, que originalmente é composta de concreto aparente. As faces externas foram pintadas na cor preta para evitar interferência nas medições, conforme recomendação dos orientadores (Figura III.3).

As faces da maquete que sofreram intervenções foram executadas de forma que sejam reversíveis, alternando assim a peça original e a modificada. Esse procedimento facilitou as medições das intervenções propostas. As medições foram executadas de acordo com uma malha de 8 por 12 pontos, sendo a carreira de 8 fixos numa régua e equidistantes entre si, e a cada medição realizada a régua era deslizada totalizando 12 movimentos que preenchiam a malha (Figura III.4).

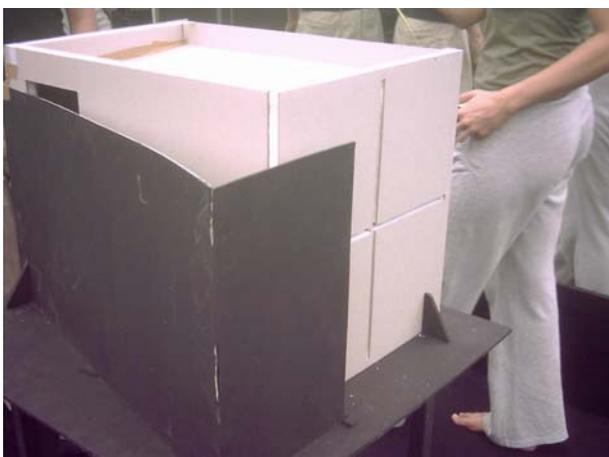


Figura III.3. Modelo em escala 1:20



Figura III. 4. Localização das Fotocélulas

III. 3. Variáveis de análise

A escolha das variáveis consideradas no experimento, a priori respeitam o projeto do arquiteto, não fazendo portanto intervenções muito dramáticas pois originalmente este já é resultado de estudos em termos de iluminação natural. Optou-se por focalizar o estudo na influência na iluminação do ambiente da fenda em forma de cruz, podendo assim aumentar a escala, o que resultou em fazer a maquete apenas de metade do ambiente devido a dimensão que iria tomar. Assim, foram consideradas as seguintes variáveis:

1. A cor do vidro da fenda.
2. A geometria da fenda.
3. A modificação das dimensões da cruz.
4. Uma intervenção mais dramática como a abertura de uma outra fenda na cobertura, de mesma dimensão que a da cruz.

III. 4. Processo

A maquete foi instalada no interior do céu artificial, segundo as recomendações gerais do procedimento para avaliação e análise de iluminação natural, em modelos arquitetônicos em escala reduzida, apresentadas pelo orientador do trabalho, o Arq. Alexander González Castaño.

Os dados de iluminância monitorados no interior do modelo, foram medidos 10 vezes para cada um dos pontos interiores que conformam a malha de análise proposta para o projeto. Antes de cada simulação foram verificados os valores da iluminância externa, encontrando assim o valor médio de 7530 lux. Este foi o valor utilizado para o cálculo posterior do Fator de Luz do Dia.

III.4.1 Projeto Original

Descrevendo de forma simples, o projeto compõe-se de um volume retangular, em concreto aparente, transpassado por um muro. A parede atrás do altar é rasgada por uma fenda em forma de cruz, com 20 centímetros de largura, desde a extrema esquerda até a extrema direita, do piso à cobertura (Figura III. 5).

As outras fontes de luz natural do ambiente correspondem a uma janela localizada numa parede lateral e rasgos entre a laje e a parede, mais ao fundo do retângulo. A iluminação deste ambiente possui níveis bastante baixos, coerente com o uso para o qual está destinado.

Os dados e gráficos do projeto original, processados e analisados no programa Win-Surf, são a base para as análises das intervenções. Nela percebemos claramente a influencia das duas aberturas no ambiente interno: a fenda em forma de cruz e a abertura lateral (Figura III.6).



Figura III.5. Vista interior do projeto original.

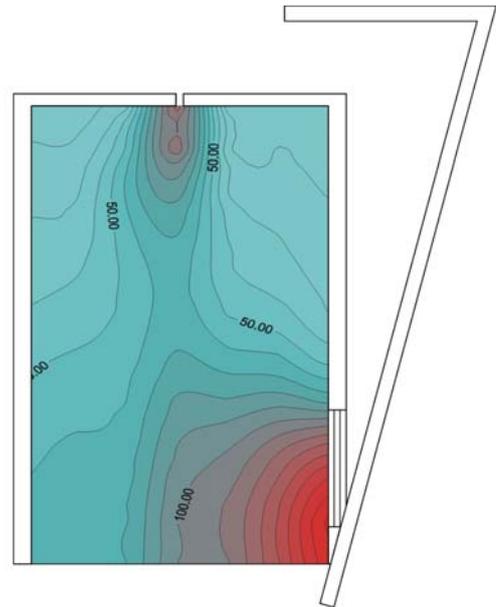


Figura III. 6. Curvas isolux no interior da capela, projeto original. Gráfico de Win-Surf.

III. 4. 2. A cor do vidro da fenda

Esta intervenção propõe a modificação na cor da abertura da fenda em forma de cruz na parede atrás do altar. Foi trocada a cor do vidro transparente por um vidro de cor azul, com o objetivo de observar a alteração da intensidade da iluminação de acordo com a cor (Figura III. 7). Desta forma não foi alterada a arquitetura em si, mas sim sua ambiência interna (Figura III.8).



Figura III.7. Tratamento da fenda com vidro de cor azul.

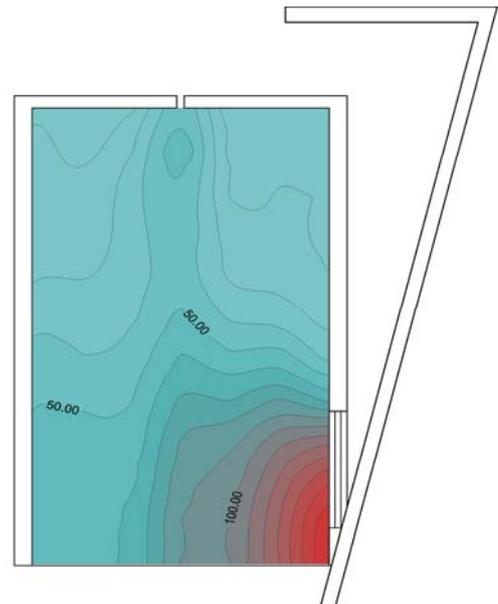


Figura III. 8. Gráfico de isolux em Win-Surf, projeto com vidro azul.

Observando os valores de iluminância desta intervenção com relação aos originais, se notou que a iluminância correspondente à abertura modificada pelo vidro colorido diminuiu em cerca de 50% sua atuação. Para análises mais aprofundadas sobre o tema, seria interessante, por exemplo, a introdução de outras cores, percebendo assim as diferenças relativas a cada uma e entre si, porém assim saindo do foco da proposta inicial de intervenção.

III.4.3. A geometria da fenda.

Esta intervenção propõe a modificação na geometria da abertura da fenda em forma de cruz na parede atrás do altar. Na face interna se conserva a mesma dimensão de 20cm, sem modificar a percepção do usuário. Partindo dos 20 cm no interior foi aberto um ângulo de 45 graus, chegando na face externa com 60cm de abertura (Figura, III.9). Esta intervenção tinha como principal objetivo ser discreta. Para os frequentadores da Capela não haveria diferença entre a cruz original e esta proposta. Porém procurou-se entender se desta forma se conseguiria um aumento significativo da iluminação no interior do ambiente.



Figura III.9. Modificação da geometria da fenda que forma a cruz.

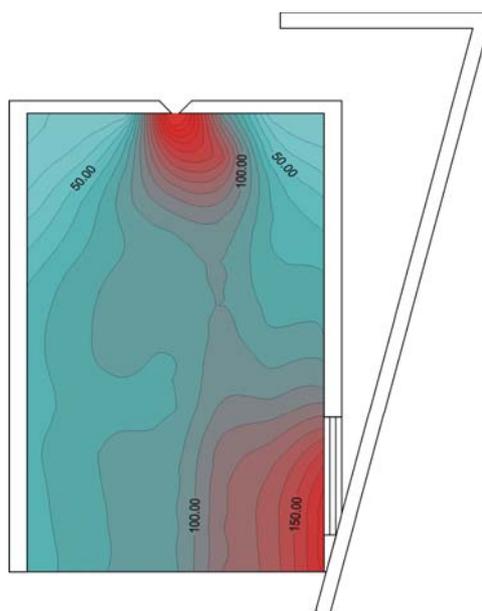


Figura III. 10. Gráfico de isolux com a modificação da geometria da fenda.

Com felicidade foi confirmada nossa hipótese, que mostrou consideráveis aumentos de iluminância interna com esta discreta intervenção (Figura III.10). Foi constatado também um leve aumento na uniformidade da iluminação da Capela, especialmente no centro, e próximo a abertura, onde num mesmo ponto observou-se 26lux no projeto original, foi verificado um salto para 234lux.

III. 4.4. Modificação das dimensões da cruz

Esta intervenção propõe a modificação na dimensão da abertura da fenda em forma de cruz (Figura III.11). A dimensão original é de 20 cm, se propõe um alargamento para 60 cm, com objetivo de visualizar a projeção da cruz nos valores das iluminâncias coletados, projeção esta que ainda não foi possível ver com as avaliações anteriores, devido aos baixos níveis de iluminância encontrados.



Figura III.11. Aumento das dimensões da cruz.

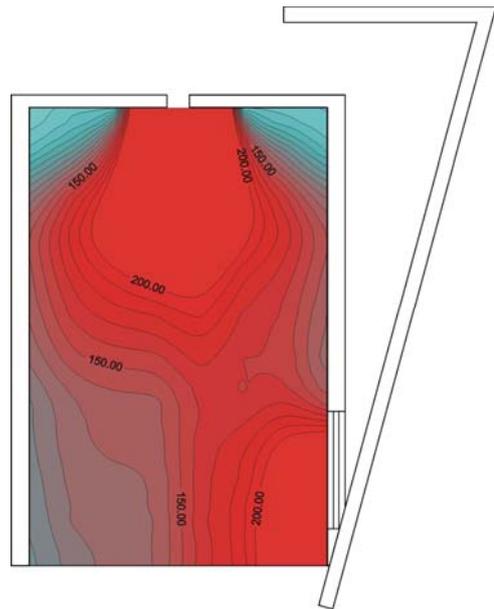


Figura III.12. Curvas de isolux com o aumento da geometria da cruz.

Aqui foi possível visualizar alguma intenção do gráfico em projetar a cruz nas iluminâncias internas horizontais (Figura III.12). Esta intervenção foi a que mais se aproximou da hipótese que havia sido levantada antes do início das simulações. Apresentando o contraste entre luz e sombra mais marcado - a fenda proposta possui três vezes o tamanho da original – foi possível perceber nas curvas do gráfico o desenho da cruz.

Esta também se mostrou a proposta que mais homogeneizou a luz no interior da Capela. Provocou um aumento dos valores de iluminância quase generalizado, podendo ser observado pelas cores avermelhadas dos gráficos, indicando homogeneidade e altos níveis de iluminância quando em relação aos anteriores.

III. 4. 5. Modificando a cobertura da capela com a abertura de uma fenda

Esta intervenção propõe a modificação na cobertura através de um rasgo de 20cm de largura num ângulo de 45° direcionado para o altar (Figura III.13). Esta intervenção pretendia aumentar a iluminação do plano de trabalho de quem realiza as leituras no altar. O rasgo na cobertura foi realizado de forma que os usuários não o percebessem dando assim suavidade à intervenção.



Figura III.13. Aumento das dimensões da cruz.

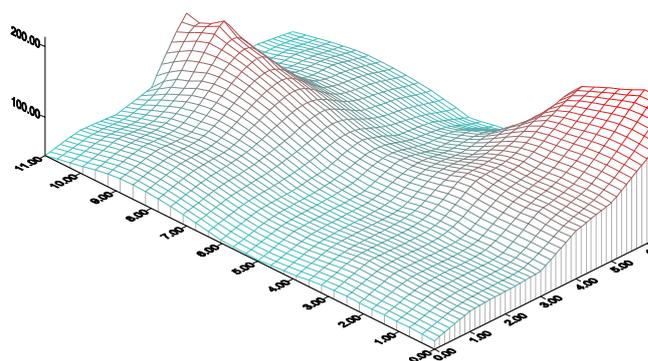


Figura III.14. Curvas de isolux com o aumento da geometria da cruz.

Inicialmente esta era a proposta parecia mais dramática com relação ao aumento de iluminâncias, por ser uma abertura zenital e ousada porque esta feita por fora dos padrões da proposta original. Porém, se mostrou mais contribuindo na homogeneização da iluminâncias do que como efeito dramático de iluminação do ambiente (Figura III.14). O objetivo de melhorar a situação de quem utiliza o plano de trabalho no altar foi alcançado, porém não apenas ali como também em toda a parte frontal da edificação.

As duas próximas intervenções foram realizadas para compreensão do efeito da fenda cruciforme, mais do que como efetiva intervenção arquitetônica. Em ambas as situações, a abertura lateral foi bloqueada de forma a exercer no ambiente escuro apenas o fenômeno proporcionado pelo elemento “cruz”.

III. 5. Obtenção de DF

A partir dos valores de iluminância encontrados para cada ponto de cada intervenção da simulação realizada, torna-se possível obter uma proporção entre as iluminâncias internas e a iluminância externa do local no momento da simulação. Esta proporção encontrada corresponde à porcentagem da iluminância total do céu naquele

momento que está incidindo sobre o ponto que é medido e é chamada de “Fator de Luz do Dia”, do inglês Daylight Factor. Os seguintes valores de DF foram obtidos para os pontos avaliados em cada intervenção:

Original: Fator de Luz do Dia (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0,15	0,25	0,20	0,34	1,68	0,17	0,21	0,20
B	0,19	0,28	0,28	0,66	1,59	0,27	0,28	0,22
C	0,26	0,37	0,36	0,82	1,17	0,36	0,33	0,25
D	0,29	0,42	0,43	0,74	0,97	0,50	0,40	0,31
E	0,34	0,47	0,52	0,69	0,87	0,55	0,46	0,34
F	0,40	0,55	0,60	0,69	0,88	0,65	0,59	0,40
G	0,46	0,63	0,68	0,73	0,96	0,83	0,82	0,58
H	0,54	0,71	0,74	0,78	1,08	1,05	1,12	0,96
I	0,60	0,76	0,81	0,84	1,19	1,27	1,50	1,69
J	0,63	0,80	0,83	0,88	1,28	1,41	1,74	2,18
K	0,66	0,85	0,87	0,92	1,34	1,49	1,87	2,44
L	0,65	0,82	0,89	0,93	1,32	1,45	1,84	2,35

1) Modificando a cor da cruz: Fator de Luz do Dia (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0,16	0,27	0,18	0,24	0,66	0,14	0,22	0,22
B	0,20	0,31	0,23	0,39	0,79	0,20	0,24	0,20
C	0,21	0,32	0,28	0,48	0,67	0,23	0,28	0,26
D	0,24	0,37	0,32	0,46	0,63	0,32	0,31	0,24
E	0,28	0,38	0,38	0,46	0,60	0,36	0,36	0,27
F	0,34	0,50	0,46	0,50	0,69	0,49	0,48	0,33
G	0,42	0,58	0,54	0,57	0,81	0,68	0,73	0,48
H	0,49	0,65	0,64	0,66	0,96	0,90	1,06	0,85
I	0,57	0,73	0,71	0,71	1,08	1,14	1,42	1,54
J	0,57	0,75	0,74	0,75	1,15	1,25	1,62	1,98
K	0,60	0,77	0,79	0,82	1,21	1,33	1,73	2,25
L	0,60	0,76	0,79	0,81	1,21	1,33	1,72	2,27

2) Modificando a geometria da cruz: Fator de Luz do Dia (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0,23	0,33	0,28	3,11	1,27	0,30	0,29	0,23
B	0,29	0,44	0,98	2,01	1,94	0,68	0,45	0,30
C	0,41	0,74	1,15	1,45	1,50	0,90	0,68	0,40
D	0,61	0,86	1,06	1,15	1,25	0,90	0,86	0,52
E	0,79	1,00	1,10	1,10	1,22	0,95	0,98	0,69
F	0,86	1,02	1,11	1,07	1,24	1,03	1,06	0,76
G	0,87	1,03	1,08	1,05	1,29	1,17	1,23	0,88
H	0,82	0,98	1,04	1,03	1,36	1,35	1,49	1,24
I	0,89	1,03	1,08	1,12	1,52	1,61	1,93	2,17
J	0,87	1,02	1,09	1,15	1,58	1,76	2,20	2,80
K	0,85	1,01	1,09	1,15	1,60	1,79	2,27	2,98
L	0,83	0,99	1,10	1,16	1,59	1,76	2,26	2,88

3) Modificando as dimensões da cruz: Fator de Luz do Dia (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0,42	0,62	0,64	6,48	8,54	0,69	0,60	0,51
B	0,68	1,15	2,35	5,07	5,36	2,52	1,33	0,75
C	1,43	2,16	2,91	3,98	4,05	2,82	2,10	1,50
D	1,86	2,46	2,94	3,40	3,45	2,75	2,33	1,84
E	1,81	2,31	2,59	2,77	2,86	2,42	2,20	1,80
F	1,74	2,15	2,31	2,39	2,53	2,23	2,09	1,72
G	1,62	1,95	2,06	2,09	2,31	2,12	2,09	1,64
H	1,45	1,71	1,82	1,83	2,16	2,11	2,23	1,84
I	1,43	1,69	1,76	1,81	2,19	2,33	2,72	2,88
J	1,39	1,64	1,71	1,75	2,20	2,42	2,95	3,52
K	1,34	1,60	1,68	1,74	2,22	2,48	3,11	4,05
L	1,29	1,51	1,65	1,74	2,18	2,46	3,09	4,07

4) Modificando a cobertura: Fator de Luz do Dia (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0,60	0,75	0,71	0,88	1,97	0,68	0,72	0,62
B	0,74	0,94	0,93	1,34	2,22	0,89	0,88	0,77
C	0,88	1,07	1,07	1,57	1,92	1,07	1,04	0,88
D	0,87	1,08	1,12	1,47	1,68	1,16	1,04	0,87
E	0,78	0,97	1,06	1,23	1,42	1,07	0,97	0,80
F	0,66	0,86	0,92	1,02	1,23	0,98	0,91	0,64
G	0,64	0,85	0,91	0,95	1,21	1,06	1,09	0,77
H	0,70	0,90	0,94	0,98	1,31	1,29	1,45	1,21
I	0,77	1,01	1,00	1,08	1,52	1,59	1,95	2,25
J	0,78	1,01	1,01	1,05	1,49	1,64	2,10	2,55
K	0,78	0,99	1,04	1,08	1,52	1,71	2,22	2,84
L	0,77	1,00	1,04	1,09	1,52	1,71	2,21	2,84

III. 6. Avaliação da luz interior da igreja, partindo dos dados de DF obtidos e cruzando os resultados com a norma NBR 5413 – Iluminância de Interiores.

A norma da ABNT NBR 5413 trata da iluminância de interiores, e tem como objetivo estabelecer “os valores de iluminâncias médias mínimas” para diversos ambientes, de acordo com as tarefas visuais exercidas por seus freqüentadores. De acordo com o item 5.3.30 desta norma, igrejas e templos devem possuir valores mínimos de 50lux (nave, entrada, auditório, sem escritório), enquadrando-se ao caso estudado.

Para tornar esta uma comparação coerente, utilizamos as proporções de Fator de Luz do Dia demonstradas no item anterior para simular valores de iluminância interior quando uma fotocélula instalada na cobertura esteja marcando cerca de 25000 lux, que é um valor utilizado para dias médios. Os gráficos foram modificados para representar em cor preto aqueles valores de iluminância nas regiões que apresentaram na simulação, valores iguais ou inferiores a 50 lux (Figuras III. 15, 16, 17 e 18).

Desta forma, tendo por um lado o Fator de Luz do Dia e por outro um valor de iluminância externa real, a simulação trará valores mais aproximados da realidade a partir dos quais podemos iniciar uma análise da suficiência da iluminação natural para determinado ambiente, tendo como parâmetro a norma ABNT NBR 5413.

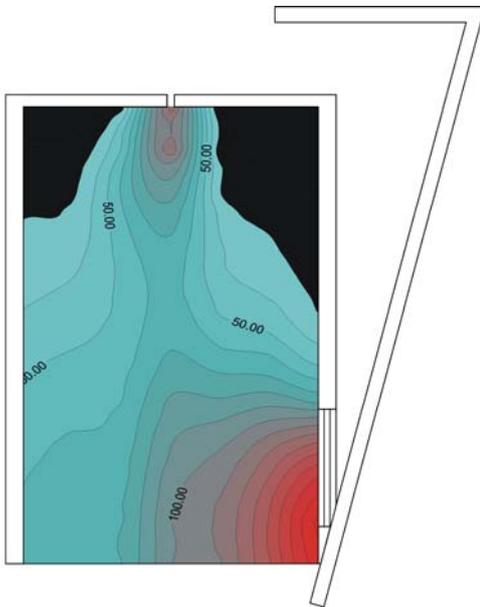


Figura III.15. Projeto Original.

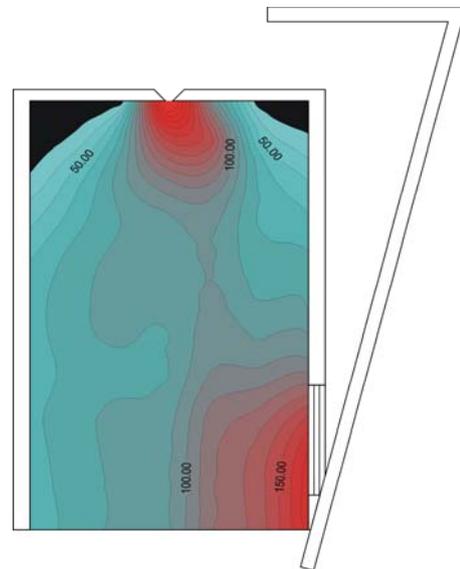


Figura III. 16. Modificação da geometria da cruz.

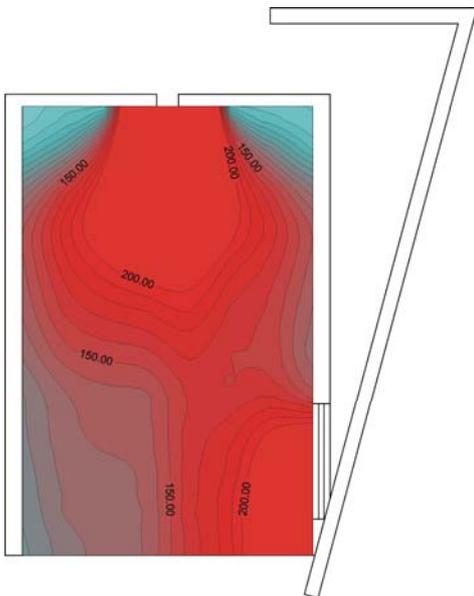


Figura III.17. Modificação do tamanho da cruz.

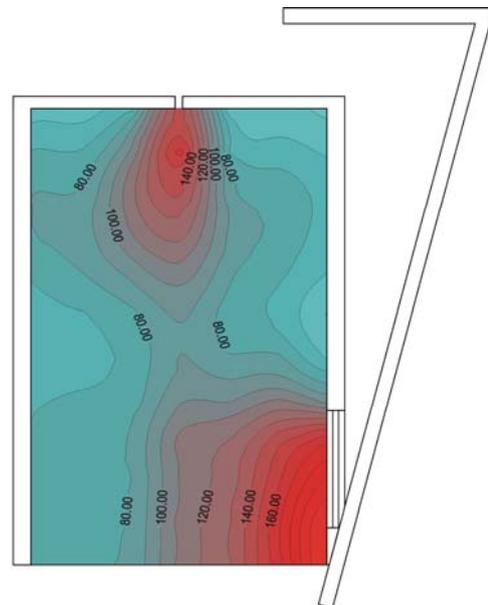


Figura III. 18. Modificação da cobertura.

Os gráficos apontam as deficiências de acordo com a intervenção proposta ao projeto de Tadao Ando (Figura III.15). Podemos observar que no projeto original há cerca de 20% da área do ambiente com valores de iluminância inferiores ao mínimo orientado pela NBR 5413 – 50lux para um céu de 25000 lux. A partir desta avaliação, poderia-se iniciar um

novo estudo de intervenção arquitetônica – iluminação artificial, novas aberturas, etc – que tivesse como objetivo adequar a edificação a referida norma.

Duas das intervenções propostas neste estudo tiveram 0% da área do ambiente com valores de iluminância inferiores a 50lux, o que indica que a intervenção atingiu uma boa distribuição pela superfície analisada. Dentre elas, a intervenção na cobertura mostrou-se interessante por não interferir demais na obra e colaborar na homogeneização da iluminação do ambiente (Figura III.18).

III. 7. Conclusões

Consideramos que este exercício conseguiu atingir seu objetivo principal de integrar os estudos teóricos com a comprovação e experimentação. Temos claro que este desempenho foi possível devido ao acompanhamento docente e à disponibilidade dos equipamentos calibrados para as medições.

A primeira vista nos pareceu notável a diferença entre as medições feitas neste exercício com relação ao anterior – que consistia na verificação in loco da variações de iluminância. Com a experiência do primeiro exercício da disciplina, nos impressionamos quando encontramos valores tão baixos de iluminância nas simulações durante nosso estudo.. Compreendemos, posteriormente, que estes valores correspondiam a um céu não muito próximo das condições reais, pois possuía iluminância média de 7530lux, ou seja, o que havíamos obtido era na verdade uma malha de proporções, já que um céu natural possui em torno de 20000 a 25000lux.

A experiência de intervir num projeto arquitetônico e, desta intervenção, obter dados quantitativos concretos nos aproxima da prática projetual consciente no que diz respeito à importância da iluminação natural no ambiente construído.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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