

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

**AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO DE DUTOS DE LUZ, NA CIDADE
DE SÃO CARLOS – SP**

Andrigo Demétrio da Silva

SÃO CARLOS
2005

Andrigo Demétrio da Silva

**AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO DE DUTOS DE LUZ, NA CIDADE
DE SÃO CARLOS – SP**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Construção Civil da Universidade
Federal de São Carlos para
obtenção do título de Mestre em
Construção Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Maurício Roriz

Co-orientador:

Prof. Dr. Eneide Ghisi

SÃO CARLOS
2005

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

S586at

Silva, Andrigo Demétrio da.

Análise teórica e experimental do desempenho de duto de luz, na cidade de São Carlos / Andrigo Demétrio da Silva.
-- São Carlos : UFSCar, 2006.

119 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Iluminação. 2. Iluminação natural. 3. Dutos de luz. I. Título.

CDD: 621.321 (20^a)

**AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO DE DUTOS DE LUZ, NA CIDADE
DE SÃO CARLOS – SP**

ANDRIGO DEMÉTRIO DA SILVA

Dissertação de Mestrado apresentada em 10 de junho de 2005.
Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Maurício Roriz, Dr. (UFSCar)
(Orientador)

Prof. EneDir Ghisi, Dr. (UFSC)
(Examinador Externo)

Prof. Rosana Maria Caram de Assis, Dr^a. (EESC-USP)
(Examinadora Externa)

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus amados pais, Jonas e Maria Tereza, e à minha avó, Teresa Costa Cunha, que, aos 89 anos, continua transmitindo lições de vida e fé através de seus textos e poesias. A Dona Neguinha, como é chamada, é exemplo e inspiração em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao **Criador**, por conceder a todos o sopro da vida.

Aos **meus pais, Jonas e Maria Tereza**, pelos princípios que me foram ensinados e norteiam meu caminho todos os dias, e pelo incentivo, compreensão e amor irrestritos.

Aos **meus irmãos, Andrey e Aniele**, pelos sorrisos, risos e gargalhadas, que alimentam meu espírito a cada encontro.

À minha amada **Luciana**, por sua importante participação na minha vida e neste trabalho, ao demonstrar confiança e oferecer apoio psicológico.

Ao amigo **Danilo**, pelo conhecimento partilhado e companheirismo.

Aos amigos **André, Eduardo, Fernando, Ivan, Paulo e Roberval**, pelas longas conversas filosóficas e sobre engenharia.

Ao **professor Maurício Roriz**, por sua orientação, sem a qual este trabalho não seria possível.

Ao **professor Eneidir Ghisi**, por ser co-orientador neste trabalho e por suas valiosas observações.

À **professora Rosana Caram**, por sua presteza e por participar da banca examinadora.

Aos **professores Lucila Chebel Labaki e Admir Basso**, pela colaboração com este trabalho.

Aos **professores do Departamento de Engenharia Civil**, em especial, ao **Celso Carlos Novaes e José Carlos Paliari**, que lutaram e continuam lutando por melhores condições de ensino.

À **FAPESP**, pela bolsa de estudos.

Ao **engenheiro Nadin**, que autorizou o acesso à obra sob sua responsabilidade, para a parte experimental desta pesquisa.

Aos amigos de mestrado **Adriana, Gustavo, Kelen e Marcus**.

EPÍGRAFE

*“(...) Vamos duvidar de tudo que é certo (...)
(...) Se faltar o vento a gente inventa (...)
(...) Se faltar calor a gente esquenta,
Se ficar pequeno a gente aumenta,
E se não for possível, a gente tenta (...)”*

Humberto Gessinger

RESUMO

SILVA, Andriago Demétrio. **Avaliação Teórica e Experimental do Desempenho de Dutos de Luz, na Cidade de São Carlos – SP.** 2005. 124p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

Os sistemas elétricos de iluminação respondem por significativo consumo da energia em edificações. A luz natural, por outro lado, é abundante, gratuita e mais favorável à saúde e à eficiência das atividades produtivas das pessoas. Entretanto a iluminação através de aberturas laterais, quando usada isoladamente, apresenta sérias limitações quanto à distribuição de iluminâncias. Tais limitações podem ser atenuadas utilizando-se mecanismos de redirecionamento da luz solar como, por exemplo, os Dutos de Luz (DLs). Os DLs captam a luz do céu e a conduzem, por sucessivas reflexões, distribuindo-a no ambiente, proporcionando maior conforto visual e economia de energia. A pesquisa ocorre na seguinte ordem, com estudos detalhados: do difusor; da iluminação interna e da captação, condução e distribuição da luz pelo DL. Na análise do material difusor a ser aplicado na distribuição da luz, diferentes materiais foram expostos à luz natural, e seus comportamentos, sob o espectro da luz solar, foram avaliados através dos dados obtidos. Um difusor ideal não foi encontrado e foi utilizado o acrílico leitoso. A contribuição na iluminação de ambientes, resultante do uso do sistema de DL, foi quantificada e analisada, através do monitoramento de maquetes, e comparada ao desempenho de sistemas convencionais de iluminação natural. Dutos com diferentes seções (quadrada e retangular) e superfícies internas espelhadas foram analisados e tiveram seus desempenhos comparados, de modo a avaliar a influência de variáveis como geometria, refletância interna e orientação do DL, no desempenho do sistema. Os resultados indicam uma maior eficiência do DL de seção quadrada. Também foram analisadas as condições de céu e sua influência na iluminação do ambiente interno. Foram confrontados os dados experimentais com o estudo teórico. Por fim, fez-se uma avaliação do potencial de economia de energia quando se usa o sistema de DLs.

ABSTRACT

SILVA, Andriago Demétrio. **Theoretical and Experimental Evaluation of Light Pipes Performance in São Carlos – SP.** 2005. 124p. Dissertation (M. Sc. in Civil Construction) – Post-Graduation Program in Civil Construction, Universidade Federal de Sao Carlos, Sao Carlos, 2005.

Illumination electric systems are responsible by expressive consumption of energy in buildings. Daylight, on the other hand, is abundant, free and more favorable to health and to the efficiency of people activities. However the side-windows system, when it is used alone, presents limitations in illuminance distribution. These limitations can be attenuated by usage of sunlight redirecting devices, such as Light Pipes (LPs). LPs collect daylight, conduct it by successive reflections and deliver it to an internal ambient, providing more visual comfort and saving energy. This research is carried out by studying the diffuser, the internal illumination and the collection, conduction and distribution of light by LP. To analyze the diffuser that would be used on the distribution of light, different materials were exposed to daylight and their behavior under the sunlight was evaluated. An appropriate diffuser was not found, therefore the milky acrylic was used as a diffuser panel. LP systems contribution in illumination was quantified and analyzed by monitoring scale models and the results were compared to conventional daylight systems. LP different sections (square and rectangular) with mirror internal surfaces were analyzed to evaluate their performances and they were compared to evaluate the influence of geometry, internal reflectance and LP orientation. Results indicate that the LP with square section is more efficient. Also sky conditions were analyzed and their influence in the internal illuminance. Experimental data were compared to a theoretical analysis. At last an evaluation of potential for energy savings by using LP was performed.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1: Usos finais de energia elétrica no campus da UFSC	24
Figura 2.2: Distribuição de luminâncias em céu claro (a) e em céu encoberto (b)	30
Figura 2.3: Distribuição de iluminâncias em uma sala de 5,2 x 4,0 metros	33
Figura 2.4: Projeto que combina luz e ventilação natural – maior eficiência energética	33
Figura 2.5: Sistemas de coleta, distribuição e emissão da luz natural	35
Figura 2.6: Esquemas de redirecionamento da luz solar	36
Figura 2.7: Esquema de DL horizontal	37
Figura 2.8: Iluminação e ventilação naturais no mesmo dispositivo	37
Figura 2.9: Dutos apresentados por Langley	38
Figura 2.10: Duto bi-dimensional considerado por Swift & Smith	39
Figura 2.11: Dados experimentais (círculos) e teóricos (linha contínua) da transmissão de Dutos de Luz em função do ângulo de incidência dos raios	40
Figura 2.12: (a) Esquema do DL; (b) Difusor; (c) Dispositivo instalado	41
Figura 2.13: Configurações do emissor composto testadas por Qi et al	42
Figura 2.14: Configurações usadas com a iluminação natural	43

Capítulo 3

Figura 3.1: Luxímetro Gossen	45
Figura 3.2: <i>Hobo</i> H08-004-02	45
Figura 3.3: (a) Maquete usada, com Duto de Luz. (b) Vista interna da maquete. (c) Maquete com janela e duto	47
Figura 3.4: (a) Detalhe dos perfis de alumínio utilizados. (b) Vista externa do Duto de Luz. (c) Vista interna do Duto de Luz.	47
Figura 3.5: Valores médios do CLD nos pontos medidos, com janela	49
Figura 3.6: Valores médios do CLD nos pontos medidos, com janela e DL	49
Figura 3.7: Valores de iluminâncias externas, no dia das medições	50
Figura 3.8: Gráfico comparativo das iluminâncias médias, no eixo 2 (central)	50
Figura 3.9: Gráfico comparativo das iluminâncias médias, no eixo 1	51
Figura 3.10: Esquema da maquete (ambiente interno dividido) para comparação entre DLs	53

Figura 3.11: Caminho percorrido pelos aparelhos durante as medições	53
Figura 3.12: Planta da maquete usada para teste do material difusor	55
Figura 3.13: Corte A-A da maquete	55
Figura 3.14: Planta da maquete usada. Medidas em metros	57
Figura 3.15: Corte A-A da maquete	57
Figura 3.16: Sentidos e ângulos das fotografias do céu	60

Capítulo 4

Figura 4.1: FLT registrados com DLs de seção quadrada e retangular (3x12)	62
Figura 4.2: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 18/06/04	63
Figura 4.3: FLT registrados com DLs de seção quadrada e retangular (12x3)	63
Figura 4.4: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 22/06/04	64
Figura 4.5: FLT registrados com DLs de mesma seção e alturas 15 e 25 centímetros ..	65
Figura 4.6: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 01/07/04	65
Figura 4.7: FLT registrados com DLs de mesma altura e seções 6x6 e 3x3	66
Figura 4.8: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 02/07/04	66
Figura 4.9: Gráfico comparativo entre difusor ideal e vidro jateado (dia 08/06/2004)..	68
Figura 4.10: Gráfico comparativo entre difusor ideal e vidro jateado (dia 11/06/2004)..	68
Figura 4.11: Gráfico comparativo entre difusor ideal e acrílico leitoso (dia 08/06/2004)	69
Figura 4.12: Gráfico comparativo entre difusor ideal e acrílico leitoso (dia 11/06/2004)	69
Figura 4.13: Gráfico comparativo entre difusor ideal e película (dia 28/06/2004)	70
Figura 4.14: Gráfico comparativo entre difusor ideal e acrílico leitoso (dia 28/06/2004)	70
Figura 4.15: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 02/12/2004, 8 às 11h	71
Figura 4.16: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 06/12/2004, 8 às 11h	72
Figura 4.17: Iluminâncias externas no plano horizontal – 02/12/2004	72
Figura 4.18: Iluminâncias externas no plano horizontal – 06/12/2004	73
Figura 4.19: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 13/01/2005, 8 às 11h	73
Figura 4.20: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 13/01/2005, 11 às 14h	74
Figura 4.21: Iluminâncias externas no plano horizontal – 13/01/2005	74

Figura 4.22: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 31/01/2005, 8 às 11h	75
Figura 4.23: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 31/01/2005, 11 às 14h	75
Figura 4.24: Iluminâncias externas no plano horizontal – 31/01/2005	76
Figura 4.25: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 01/02/2005, 8 às 11h	76
Figura 4.26: Iluminâncias externas no plano horizontal – 01/02/2005	77
Figura 4.27: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 03/02/2005, 8 às 11h	77
Figura 4.28: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 03/02/2005, 11 às 14h	78
Figura 4.29: Iluminâncias externas no plano horizontal – 03/02/2005	78
Figura 4.30: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 04/02/2005, 8 às 11h	79
Figura 4.31: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 10/02/2005, 8 às 11h	79
Figura 4.32: Iluminâncias externas no plano horizontal – 04/02/2005	80
Figura 4.33: Iluminâncias externas no plano horizontal – 10/02/2005	80
Figura 4.34: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 11/02/2005, 8 às 11h	81
Figura 4.35: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 11/02/2005, 10h30min às 13h30min	81
Figura 4.36: Iluminâncias externas no plano horizontal – 11/02/2005	82

Capítulo 5

Figura 5.1: Distribuição porcentual das parcelas direta e difusa da luz	86
Figura 5.2: Iluminâncias externas obtidas para as parcelas direta, difusa e total da luz.	86
Figura 5.3: Modelo do duto para estudo teórico.....	87
Figura 5.4: Caminho percorrido no duto por um raio solar.....	88
Figura 5.5: Caminho percorrido no duto pela luz direta	89
Figura 5.6: Energia em função da relação x/y, para áreas do DL de 0,18 e 0,36 m ²	91
Figura 5.7: Energia total em função de α	92

Figura 5.8: Energia em função da altura do DL	93
Figura 5.9: Energia total em função de α , para α variando de 1 a 89°	93
Figura 5.10: Técnicas que melhoram a captação e transmissão da luz no duto.....	94
Figura 5.11: Variação da carga térmica com o uso do DL, 8h às 11h	98
Figura 5.12: Variação da carga térmica com o uso do DL, 11h às 14h	98
Figura 5.13: Variação da carga térmica com o uso do DL, 8h às 11h	99
Figura 5.14: Variação da carga térmica com o uso do DL, 11h às 14h	99

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Consumo de energia do setor comercial – % (Fonte: Brasil, 2003)	22
Tabela 2.2 – Consumo de energia do setor público – % (Fonte: Brasil, 2003)	22
Tabela 2.3 – Consumo de energia do setor residencial – % (Fonte: Brasil, 2003)	22
Tabela 2.4 – Consumo de energia do setor industrial – % (Fonte: Brasil, 2003)	23
Tabela 2.5 – Consumo de energia, com iluminação, em edificações comerciais	24

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Acréscimo (percentagem) no nível de iluminâncias, devido ao uso do DL.	83
---	----

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Médias das iluminâncias externas obtidas na cidade de São Carlos	85
Tabela 5.2 – Cálculo da energia total na saída do DL. Área da seção = 0,36 e $\alpha = 45^\circ$..	90
Tabela 5.3 – Cálculo da energia total na saída do DL. Área da seção = 0,18 e $\alpha = 45^\circ$..	91
Tabela 5.4 – Cálculo da energia total na saída do DL. Área da seção = 0,36 e α variando	92
Tabela 5.5 – Cálculo da energia total na saída do DL. Área da seção = 0,36 e H variando	92

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	15
1.1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS.....	16
1.2 – OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
1.2.1 – Objetivo Geral.....	18
1.2.2 – Objetivos específicos.....	18
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 – ENERGIA ELÉTRICA.....	21
2.2 – ILUMINAÇÃO.....	24
2.2.1 – Iluminação artificial.....	25
2.3 – ILUMINAÇÃO NATURAL.....	28
2.3.1 – Condições de Clima e de Céu.....	28
2.3.2 – Uso da Iluminação Natural.....	32
2.4 – DUTOS DE LUZ.....	35
2.4.1 – Condução da luz através do DL.....	38
2.4.2 – Distribuição da luz (difusor).....	42
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 – MEDIÇÕES INICIAIS.....	45
3.1.1 – Instrumentos e métodos.....	45
3.1.2 – Projeto e construção da maquete.....	47
3.1.3 – Primeiras medições.....	48
3.2 – MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DIFERENTES DUTOS DE LUZ.....	52
3.3 – MEDIÇÕES PARA ESCOLHA DO MATERIAL DIFUSOR.....	54
3.4 – MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DUTO DE LUZ E JANELA.....	56
3.5 – ANÁLISE TEÓRICA DA GEOMETRIA DO DUTO DE LUZ.....	58
3.6 – ESTIMATIVA DA ECONOMIA DE ENERGIA.....	58
3.7 – ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CÉU.....	59
4 – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	61
4.1 – MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DIFERENTES DUTOS DE LUZ.....	62
4.2 – MEDIÇÕES PARA ESCOLHA DO MATERIAL DIFUSOR.....	67
4.3 – MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DUTO DE LUZ E JANELA.....	71
5 – AVALIAÇÃO TEÓRICA.....	84
5.1 – ESTUDO TEÓRICO SIMPLIFICADO DO DUTO DE LUZ.....	85

5.2 – ANÁLISE DA PERPECTIVA DE ECONOMIA DE ENERGIA.....	96
5.3 – ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CÉU.....	100
6 – CONCLUSÕES.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
Bibliografia Adicional Consultada.....	114
ANEXO I.....	115

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Os transtornos provocados recentemente no Brasil pela necessidade de racionamento de energia começaram a despertar nos diversos setores da sociedade uma consciência sobre a importância de procurar formas mais sustentáveis de uso dos recursos naturais, buscando-se fontes de energia renovável que substituam, parcial ou totalmente aquelas mais usadas, a saber: derivados do petróleo, termoelétricas, hidroelétricas. Essas fontes alternativas supririam a energia consumida na produção de bens e serviços, nos sistemas de condicionamento e iluminação, entre outros.

Os sistemas elétricos de iluminação de ambientes internos são responsáveis por significativa parcela do total de energia consumida em edificações. A luz natural, por outro lado, é abundante, gratuita e oferece o espectro mais favorável à saúde e à eficiência das pessoas em suas atividades produtivas (BOYCE et al, 2003; BEGEMANN et al, 1997). Entretanto, os sistemas convencionais de iluminação natural, que adotam apenas janelas laterais, apresentam sérias limitações quanto à distribuição dos níveis de iluminância dos ambientes, e podem produzir zonas de calor e ofuscamento próximas à janela e regiões com baixos níveis de iluminância nos pontos mais distantes. Tais limitações podem ser atenuadas, ou mesmo superadas, pela utilização de mecanismos de redirecionamento da luz solar como, por exemplo, os chamados Dutos de Luz (DLs). Estes mecanismos devem ser usados concomitantemente com as janelas laterais para se obter melhorias na iluminação do ambiente.

Assim como a água é normalmente distribuída por meio de dutos em uma edificação, a luz também pode ser, aplicando-se racionalmente as propriedades ópticas dos materiais. Embora esses sistemas de “luz encanada” venham sendo progressivamente aplicados e pesquisados em inúmeros países, no Brasil ainda são praticamente desconhecidos. Os DLs captam a luz natural e a conduzem, por meio de sucessivas reflexões, distribuindo-a no interior do ambiente. Se bem utilizada, a iluminação por meio de DLs pode trazer um maior conforto visual aos usuários, ao proporcionar boa distribuição da luz e fidelidade de cores sem o consumo de energia elétrica. Quando aliada a outros aspectos de conforto ambiental, interfere positivamente no conforto e bem-estar das pessoas e, conseqüentemente, no seu desempenho nas diversas atividades num edifício (CALIFORNIA, 2003), além de ser, a luz natural, indispensável à saúde humana.

Assim, há forte incentivo a pesquisas nessa área nos países desenvolvidos, procurando um melhor entendimento do desempenho dos DLs. A produção científica é grande, mas ainda existem muitos aspectos a serem estudados e alguns deles dependem do céu e latitude locais, não podendo ser generalizados. Aspectos como a distribuição da luz, a melhor geometria e o alcance dos DLs não estão bem esclarecidos. A busca pela adequação dos estudos às características do Brasil, contribuindo para a melhor compreensão dos aspectos ainda não resolvidos reforça a justificativa deste projeto.

A importância do estudo é confirmada pelo fato de haver pesquisas recentes (a partir da década de 80) realizadas na Argentina (URRIOL et al., 1987), Austrália (SWIFT & SMITH, 1995; EDMONDS et al, 1995; WEST, 2001), Europa (COURRET et al, 1998; ELMUALIM et al, 1999; OAKLEY et al, 2000) e Ásia (CHIRARATTANANON et al, 2000) e quase nenhuma pesquisa no Brasil, país onde as condições climáticas são favoráveis ao uso da iluminação natural.

Já na década de 80, o físico e filósofo Fritjof Capra (1982) escrevia: “Esta década será marcada pela transição da era do combustível fóssil para uma era solar, acionada por energia renovável oriunda do Sol; essa mudança envolverá transformações radicais em nossos sistemas econômicos e políticos”. A declaração reafirma o quão estão defasadas as pesquisas no Brasil, e a urgência em se estudar fontes de energia renovável.

O estudo proposto conduzirá a um melhor conhecimento de técnicas e/ou produtos que diminuem o custo de utilização dos sistemas de iluminação dos edifícios.

O presente trabalho busca compreender, para melhor aplicar, uma alternativa mais eficiente e econômica para os sistemas de iluminação. Ao utilizar a iluminação natural, captada e transmitida através de DLs, objetiva-se a aplicação de uma forma de energia mais sustentável que, realizado o estudo, contribua – ao agir em conjunto com outros fatores, como forma e uso do edifício – com uma perspectiva de grande economia de energia elétrica, cujo benefício à sociedade é irrefutável.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é estudar o desempenho de DLs, e adequar modelos matemáticos para que sejam utilizados, de maneira satisfatória, na previsão da contribuição (na iluminação e economia de energia) desses sistemas de iluminação natural, nas condições de céu e latitude da cidade de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil.

1.2.2 Objetivos específicos

Nesta pesquisa, têm-se como objetivos específicos:

- 1) Avaliar experimentalmente o desempenho de DLs;
- 2) Procurar adequar modelos matemáticos, através da análise teórica e dos resultados medidos;
- 3) Estimar a economia de energia que poderá ser proporcionada pelo uso dos DLs comparando-os com sistemas convencionais de iluminação (com aberturas laterais).
- 4) Estudar variações nos DLs – usando diferentes disposições, geometrias e alcance (altura) – e o impacto dessas variações na condução da luz, eficiência do sistema e no atendimento aos níveis mínimos e na distribuição de iluminâncias;
- 5) Registrar as condições de céu e verificar sua influência na iluminação interna do ambiente.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Posteriormente ao capítulo de introdução, segue-se a Revisão Bibliográfica, com uma discussão sobre o panorama energético brasileiro e sua relação com a necessidade de se estudar fontes alternativas de energia. Na mesma linha, é mostrada e discutida a participação da iluminação no consumo energético das edificações dos diversos setores. Apresentam-se iniciativas, como as tomadas pelo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), que buscam um uso mais racional da energia, e a reforma curricular das faculdades de Engenharia Civil e Arquitetura, que têm grande responsabilidade na formação profissional. Essa questão é levantada, no texto, para incitar a discussão. A seguir são abordadas as diretrizes a serem atendidas num projeto luminotécnico eficiente e a importância de um melhor uso da iluminação artificial. Em relação à iluminação natural, primeiramente é discutida a influência das condições de clima e de céu na disponibilidade de luz natural, e apresentada a classificação dos tipos de céu adotada pela ABNT (1999a). O uso da luz natural é tratado de maneira a esclarecer que as soluções devem ser adotadas conforme cada caso e não se limitar a uma única solução. Na sequência, é apresentado o conceito de Duto de Luz, e é discutida a condução da luz através do duto e a distribuição da luz, com base em trabalhos realizados, principalmente, na Europa e Austrália. São apresentados alguns estudos e os resultados conseguidos nestes, com a economia de energia e obtenção de modelos matemáticos.

O capítulo seguinte versa sobre as medições iniciais, realizadas para treinamento no uso dos aparelhos e definição dos métodos, e sobre a metodologia usada para a aquisição e análise dos dados e para o estudo teórico realizado.

No quarto capítulo, são mostrados os resultados obtidos no estudo experimental, nas medições para comparação entre diferentes tipos de DLs, entre os desempenhos de janela lateral e DL, e para a escolha do material difusor.

O quinto capítulo apresenta o desenvolvimento da análise teórica da condução da luz no DL, da perspectiva de economia de energia com o uso do DL e das condições de céu e sua influência na iluminação interna.

Por fim, o sexto capítulo trata das conclusões, que mostram os resultados obtidos e as dificuldades encontradas neste estudo. Sugerem-se alguns assuntos, para trabalhos futuros, com base em questões e limitações surgidas durante a pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA ELÉTRICA

Presentemente a economia de energia elétrica e o seu uso eficiente começam ser considerados no Brasil. Os transtornos e prejuízos recém trazidos com o racionamento de energia abriram os olhos do país para a necessidade da utilização mais racional dos recursos naturais.

A conscientização de que os impactos ambientais gerados pela industrialização devem ser evitados ou controlados é recente no mundo. Sendo o Brasil um país em desenvolvimento e tendo grande potencial hidráulico para a geração de energia elétrica, não houve muitas dificuldades para o país atravessar a crise do petróleo na década de setenta, pois sua dependência deste tipo de energia é menor que a dos países desenvolvidos. Desse modo, o Brasil sofreu mais tarde – somente a partir de 2002 - com as conseqüências do mau planejamento no uso e fornecimento de energia elétrica.

De 1970 a 1996, a produção de energia elétrica no país teve um grande aumento criando uma certa reserva energética. Do total de energia produzida, 87% era gerada hidráulicamente (BRASIL, 2000). Atualmente, porém, o Brasil já não possui mais os mesmos recursos para investimento em construção e implantação de usinas geradoras de energia.

No princípio da década de 80 apareceram as primeiras iniciativas no sentido de tornar o uso da energia mais eficiente. Iniciou-se, em 1985, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel – que desenvolve programas de conservação, eficiência e incentiva pesquisas.

Apesar das (poucas) iniciativas, o consumo de energia elétrica no país chegou a uma demanda de 95% da capacidade disponível, o que deixou o sistema numa situação crítica. Esta situação fez com que se buscasse maior eficiência e economia da energia. Incentivou-se o uso de aparelhos eletrodomésticos mais eficientes (identificados por meio do selo Procel que qualifica o aparelho conforme sua eficiência) e lâmpadas (fluorescentes compactas) que economizam até 75% quando comparadas com as mais utilizadas (incandescentes). Fizeram-se campanhas de incentivo à conservação de energia e recomendações quanto à utilização de elementos construtivos (cores, aberturas, disposição de ambientes) que proporcionam maior eficiência energética à edificação como um todo (MAGALHÃES, 2002).

Tabela 2.4 – Consumo de energia do setor industrial – % (Fonte: Brasil, 2003).

Identificação \ Ano base	1987	1990	1993	1996	1999	2000	2001	2002
Gás natural	2,2	3,2	3,6	4,7	5,2	6,3	7,4	8,8
Carvão mineral	3,7	2,3	2,0	3,3	4,2	4,6	4,5	4,6
Lenha	14,1	12,4	10,3	9,2	8,8	8,7	8,3	7,8
Bagaço de cana	12,2	10,5	11,9	13,6	16,6	12,8	16,0	17,1
Outras fontes primárias renováveis	3,0	3,4	4,5	4,3	4,8	4,9	5,0	5,0
Óleo combustível	14,5	15,6	15,8	16,5	13,0	11,6	9,8	9,0
Gás de coqueria	2,3	2,1	2,0	1,9	1,5	1,5	1,5	1,4
Coque de carvão mineral	12,1	11,8	13,9	12,7	9,7	10,6	10,3	10,3
Eletricidade	19,7	22,2	22,1	20,8	19,9	20,6	19,5	19,6
Carvão vegetal	12,0	12,5	9,8	7,6	6,6	7,1	6,4	6,3
Outras	4,2	4,2	4,2	5,4	9,6	11,2	11,4	10,2
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Outro problema, provavelmente o mais grave, é o grande impacto sócio-ambiental causado pela implantação de parques geradores de energia. Nas termoelétricas, com a emissão de gases (dióxido e monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio) e poluição da água utilizada e, nas hidroelétricas, com a formação de lagos, que inundam áreas agricultáveis, alteram o micro-clima da região, prejudicam a fauna e flora e trazem a necessidade do deslocamento da população local para um lugar apropriado.

2.2 ILUMINAÇÃO

Segundo dados oficiais brasileiros (BRASIL, 2000), do total da produção nacional de energia elétrica, 25,2% são consumidos em residências e 23,3% em edifícios comerciais e públicos. Grande parcela da energia elétrica utilizada é consumida com iluminação, nos diversos tipos de edifícios. A Tabela 2.5 apresenta os valores correspondentes a alguns tipos de edifícios comerciais.

Tabela 2.5 – Consumo de energia, com iluminação, em edificações comerciais (PROCEL, 1988).

Edifício comercial	Consumo de energia, com iluminação (%)
Lojas	76
Escritórios	56
Oficinas	56
Bancos	52
Shoppings	49

No caso de edifícios públicos, a energia destinada à iluminação pode ser também muito representativa. Estudo desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina (GHISI, 1997) identificou a distribuição ilustrada na Figura 2.1.

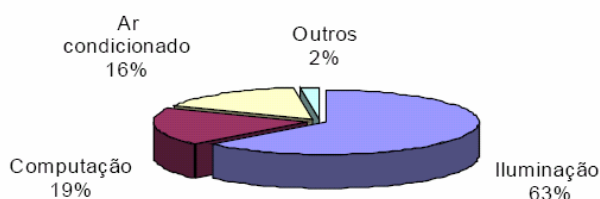


Figura 2.1: Usos finais de energia elétrica no Campus da UFSC (GHISI, 1997).

A representatividade da iluminação no consumo energético de edifícios comerciais e públicos coloca estes setores como potenciais usuários dos sistemas de iluminação natural. O uso destes sistemas no setor residencial também traria enormes benefícios, visto que esse setor tem a maior participação no total de energia consumida.

Para diminuir a dependência de energia elétrica das edificações, além das recomendações feitas pelo Procel, é preciso empregar os recursos naturais a favor da eficiência e redução do custo de uso e manutenção das edificações. Por esse motivo,

busca-se um uso mais eficiente dos sistemas de iluminação, artificial e natural. Através deste uso, objetiva-se uma economia no consumo de eletricidade e, conseqüentemente, redução dos impactos causados ao meio ambiente.

Vale ainda ressaltar que a iluminação deve ser projetada para as pessoas e não para as edificações.

O homem não é um autômato – um robô – para ser comparado com a máquina; não recebe passivamente os impulsos externos, mas responde ativamente a todos os estímulos de forma variada. Além disso, todo engenheiro conhece muito bem as maneiras de manipular a matéria que a natureza oferece, mas bem pouca gente sabe o que essa matéria, transformada pelo engenheiro, faz do homem. O planejamento da vida humana não deve reduzir o homem a uma quantidade suscetível de cálculo (...) (FERRAZ, 1983).

Desse modo, envolvendo a iluminação, eficiência da edificação e conforto do usuário, os engenheiros e arquitetos devem conciliar as decisões técnicas com a aleatoriedade das preferências das pessoas, às quais a edificação deverá servir.

Para que se consiga um consistente desenvolvimento dos sistemas de iluminação em edificações, as faculdades de Engenharia Civil e Arquitetura têm um papel fundamental no que tange à transferência de conhecimento teórico e técnico qualificado aos profissionais formados por essas instituições. Também o governo, por meio dos órgãos públicos, pode desempenhar importante função realizando campanhas de conscientização da população e de atualização profissional.

2.2.1 Iluminação artificial

À medida que os sistemas artificial e natural de iluminação deveriam trabalhar conjuntamente, é muito importante conhecer o funcionamento de um sistema de iluminação artificial.

O uso eficiente da iluminação elétrica, através do uso de lâmpadas mais modernas e reformas nos sistemas para adequação às atividades que se desenvolvem em determinado ambiente, apresenta-se como uma solução que pode ser adotada

imediatamente, reduzindo o consumo enquanto se estuda a aplicação de outras fontes de energia.

A eficiência dos sistemas de iluminação artificial está relacionada às características técnicas, ao rendimento e à eficiência dos elementos que a compõem: lâmpadas, luminárias, reatores, circuitos de distribuição e controle, cores das superfícies internas, mobiliário e aspectos de projeto e aproveitamento da luz natural.

Por ser o foco deste trabalho a iluminação natural, não serão discutidos esses aspectos, exceto a importância do projeto e do uso da luz natural.

É durante a etapa de projeto que deve haver a definição dos componentes (lâmpadas, luminárias, etc.) do sistema de iluminação, das tintas a serem usadas nas paredes, caixilhos, teto e piso de ambientes (internos e externos), da posição das aberturas (janelas e portas) e de todas as características que determinam a qualidade e eficiência da iluminação.

Os desígnios a serem atendidos, num projeto luminotécnico eficiente, são os seguintes (RODRIGUES, 2002):

- **Condições adequadas de visibilidade:** para isso, deve-se definir o nível de iluminância no local, conforme sua utilização, e seguir as recomendações das normas técnicas;
- **Boa reprodução de cores:** essa característica depende diretamente da composição do espectro da luz que ilumina uma superfície ou objeto, das refletâncias espectrais desses elementos e do sentido da visão humana;
- **Economia no uso de energia elétrica:** através da escolha apropriada dos elementos do sistema de iluminação e aproveitamento da iluminação natural;
- **Preço inicial viável:** que justifique sua aplicação e atenda às necessidades dos usuários;
- **Praticidade:** e diminuição dos custos de manutenção;
- **Integração com projetos de outras especialidades:** como ventilação, estruturas, etc., dentro da perspectiva de um projeto global;

- **Uso da iluminação natural aliada à artificial:** para garantir uma distribuição uniforme da luz no ambiente, evitar o ofuscamento e favorecer a produtividade das atividades desenvolvidas.

Não se observa, nas recomendações citadas, a indicação da prioridade no uso da iluminação natural. Racionalmente, dever-se-ia buscar o suprimento da demanda de iluminação, numa edificação, unicamente com o uso da luz natural (durante o dia). Exclusivamente nos casos em que fosse necessário complementar a iluminação ou em ambientes que necessitam de uma iluminação diferenciada (como estúdios) seria utilizada a iluminação artificial (SÃO PAULO, 200-).

Em contrapartida, não são raras situações em que salas de prédios públicos são observadas com as lâmpadas acesas durante o dia todo; escadas e áreas de circulação não conseguem captar a luz natural; edifícios industriais sub-aproveitam a luz natural, ao usar janelas em plantas com grandes dimensões horizontais e obter luz em excesso para uma região periférica da sala, e luz insuficiente para o centro do ambiente; salas de escritórios que, por terem o ambiente subdividido, têm uma insatisfatória distribuição da luz principalmente nas salas centrais. Esses são apenas alguns dos exemplos de edifícios que continuam em uso e em construção e que são grandes consumidores de energia, ineficientes e alheios ao meio que os cerca.

O uso da luz natural não resolverá todos os problemas de conforto e eficiência de uma edificação, mas é incontestável que um edifício que usa energia limpa, disponível e sem custo, e considera as condições do meio, é mais inteligente que outro que ergue paredes estanques ao meio externo e fabrica sua própria atmosfera, às custas do consumo de energia não-renovável.

2.3 ILUMINAÇÃO NATURAL

2.3.1 CONDIÇÕES DE CLIMA E DE CÉU

Previamente ao estudo e aplicação da iluminação natural, é mandatório o conhecimento das condições climáticas. Certos aspectos do clima diferenciam-se conforme o local sobre o qual atuam. A insolação recebida na superfície terrestre, bem como a disponibilidade de luz, são determinadas pelos fatores apresentados a seguir, segundo Mascaró, 1981.

- **Efeito da atmosfera:** Quase 40% da radiação solar são imediatamente refletidos, para o espaço, pela atmosfera, superfície terrestre e pelas nuvens. Apenas os 60% restantes aquecem e iluminam a terra e a atmosfera. O ozona e o vapor d'água têm importante participação, ao absorverem aproximadamente 15% da energia que chega à atmosfera.
- **Efeito da latitude:** A latitude altera a insolação porque a situação geográfica de uma região determina a duração do dia e a distância que os raios do sol têm de percorrer através da atmosfera. As temperaturas máximas da superfície da Terra não ocorrem, como seria o esperado, no Equador, mas nos trópicos e nas regiões temperadas, pelo fato de que a passagem do sol sobre o Equador é relativamente rápida, e a sua velocidade diminui quando se aproxima dos trópicos. Entre 6° N e 6° S, os raios solares permanecem quase verticais durante 30 dias apenas. Já entre 17,5° e 23,5° de latitude, os raios solares incidem verticalmente durante 88 dias consecutivos no período de solstício.

Este período de maior duração, além do fato de que nos trópicos os dias são mais longos do que no Equador, é a causa do grande armazenamento de calor na superfície e das altas temperaturas nos trópicos, assim como também da enorme disponibilidade de iluminação natural.(MASCARÓ, 1981)

- **Efeito da nebulosidade:** A influência depende da quantidade e espessura das nuvens existentes. Também é importante o tipo de nuvens, que caracteriza a abóbada celeste. Num céu totalmente encoberto, a radiação solar refletida varia entre 44% e 50% para cirros, e entre 55% e 80% no caso de estratocúmulos. A

nebulosidade atua também no sentido contrário, já que uma camada de nuvens pode reter uma quantidade de calor que, de outro modo, seria perdido pela Terra ao longo do dia e da noite.

Como a disponibilidade de luz natural depende do tipo de céu, necessita-se, para o cálculo de elementos que proporcionem iluminação natural a ambientes, conhecer as condições de céu, bem como as parcelas oriundas do sol (luz direta) ou do céu (luz difusa) (HOPKINSON, 1975; COURRET et al., 1998).

As condições de céu variam conforme a região, sendo que em algumas regiões há uma grande variabilidade, mesmo quando analisado um único dia. Contudo, os pesquisadores da área de conforto ambiental utilizam, para seus estudos, dados registrados ao longo dos anos, médias, condições de maior ocorrência e previsões. O projeto de norma para iluminação natural da ABNT (1999a) trabalha, para simplificar, com três tipos de céu, os quais são: céu claro, céu parcialmente encoberto e céu encoberto. O projeto não considera a condição de céu uniforme, o que é pertinente, visto que tal condição nunca é encontrada em situações reais.

A ABNT (1999a) ainda descreve os tipos de céu, para que se possa diferenciá-los, quando da aplicação da norma, como segue:

- **Céu claro:** Condição na qual, dada a inexistência de nuvens e baixa nebulosidade, as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que apenas os baixos comprimentos de onda, ou seja, a porção azul do espectro, emirjam em direção à superfície da terra, conferindo a cor azul, característica do céu;
- **Céu parcialmente encoberto:** Condição de céu na qual a luminância de um dado elemento será definida para uma dada posição do sol sob uma condição climática intermediária que ocorre entre os céus padronizados como céu claro e totalmente encoberto;
- **Céu encoberto:** Neste tipo de céu, as nuvens preenchem toda a superfície da abóbada celeste.

As condições de céu são caracterizadas visualmente conforme o montante de cobertura de nuvens e expressas em percentagem (ABNT, 1999a):

- **Céu claro:** 0% a 35%;
- **Céu parcialmente encoberto:** 35% a 75%;
- **Céu encoberto:** 75% a 100%.

A distribuição de luminâncias é diferente para cada tipo de céu, como na Figura 2.2. As luminâncias num céu parcialmente encoberto, como num céu claro, dependem da altura solar.

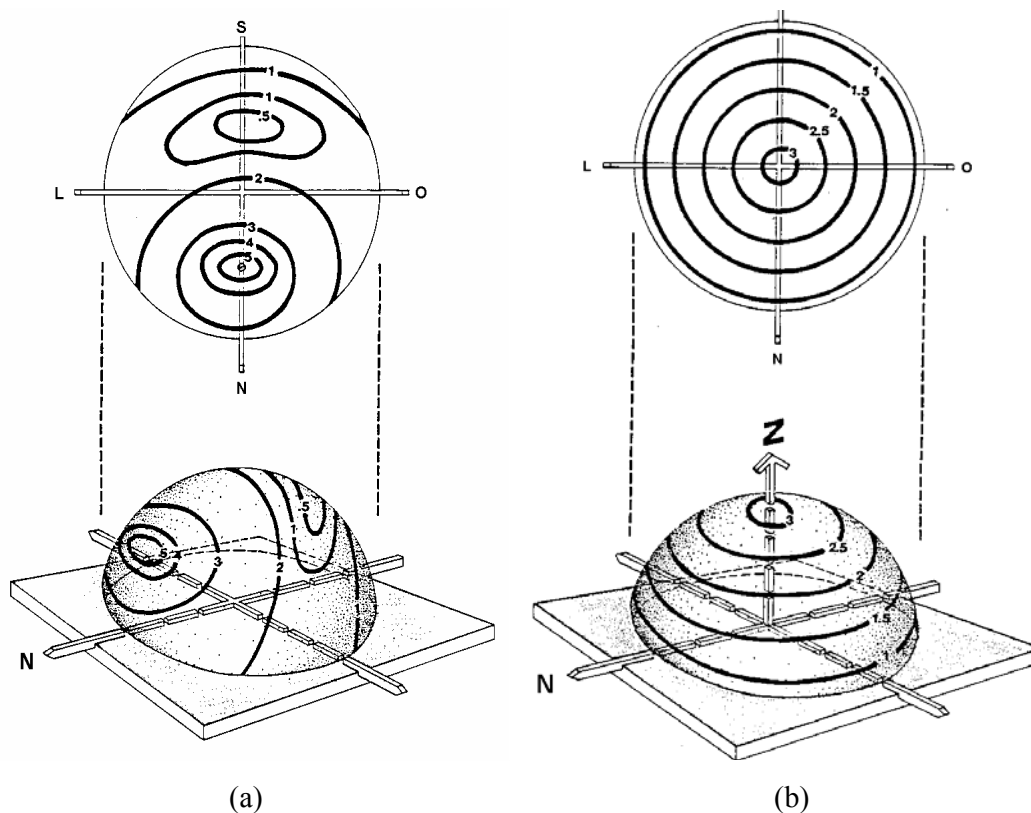


Figura 2.2: Distribuição de luminâncias em céu claro (a) e em céu encoberto (b).

(Moore apud ABNT, 1999)

Para a perfeita adequação dos espaços construídos ao meio que os cerca é necessário entender melhor as variáveis climáticas que caracterizam cada região.

O generalizado desconhecimento das condições climáticas por parte dos projetistas e o baixo prestígio das soluções de acondicionamento natural ficam evidenciados pelos grandes e frequentes erros de projeto encontrados. Ignora-se, por exemplo, que, se há

preocupação dos usuários, um edifício térmica e luminosamente bem projetado poderá, mesmo climatizado artificialmente, consumir menos energia que outro mal resolvido tecnicamente. (BRASIL, 1984)

Para estudos em conforto ambiental, deve-se atentar para o fato de que existem, além dos fatores climáticos gerais citados anteriormente, outros fatores que podem originar micro-climas. Estes podem ter características muito diferentes das do clima presente na região.

2.3.2 USO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

O uso da iluminação natural aparece como forte alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica nas edificações, pois a energia utilizada nesse caso tem qualidade e não gera resíduo, sendo limpa e mais sustentável. Além de ser abundante, gratuita, essencial à saúde e proporcionar maior conforto visual e bem-estar às pessoas, em ambientes que a utilizam corretamente, a iluminação natural pode trazer grande melhora na produtividade das pessoas em suas atividades (CALIFORNIA, 2003).

Detendo o conhecimento das condições de céu e climáticas, o projetista deve dispor de alternativas variadas de sistemas de iluminação natural, dentre os quais especificará o que melhor atenda aos parâmetros de eficiência e economia e às preferências do usuário. Salienta-se que o arquiteto ou engenheiro não deve, de modo algum, ater-se às soluções convencionais, de uso tradicional, mas usar as propriedades dos materiais e da luz natural para obter o melhor resultado.

Diante do desejo e necessidade de tornar as cidades mais sustentáveis, engenheiros e arquitetos se tornam peças-chave para um melhor desenvolvimento dos centros urbanos. Atuando em áreas abertas e edificações, estes profissionais têm o dever de produzir espaços onde haja uma harmonia com o meio ambiente aliada ao atendimento das necessidades de utilização.

São comuns erros em projetos na forma e disposição dos locais, na altura de edifícios, em coberturas, na disposição de aberturas e na sua orientação. Mesmo em edifícios luxuosos onde a escolha das composições dos sistemas, técnicas utilizadas e dos detalhes construtivos não depende da quantidade disponível de recursos financeiros, observam-se erros variados. O uso de soluções insatisfatórias não se deve às restrições

econômicas e sim ao desconhecimento das condições climáticas e de conforto e dos consumos energéticos por parte dos usuários e projetistas.

Nas universidades tem-se procurado, nas reformas curriculares, dar maior atenção a questões ambientais e uma arquitetura mais eficiente, e formar profissionais que incluam em seus projetos elementos que melhorem a interação do edifício com o meio e maior eficiência energética. Essa interação e eficiência são obtidas quando se utilizam, de modo eficiente, os recursos naturais disponíveis (FORÇA, 2001), emprestando da natureza o que ela pode oferecer sem danificá-la.

A iluminação natural deve ser melhor compreendida e colocada como um dos parâmetros principais na execução de plantas arquitetônicas e projetos de engenharia. Existem, atualmente, estudos na área nos quais os pesquisadores procuram entender melhor o comportamento em relação à luz natural dos elementos como aberturas (CORREA, 1999), superfícies refletoras, refletância das cores, e a própria iluminação natural. Tenta-se, também, quantificar a luz natural que está presente nos ambientes através de programas computacionais, modelos matemáticos e medições em modelos reduzidos ou de tamanho real.

As soluções convencionais de uso da luz natural, através de aberturas laterais (janelas), quando utilizadas isoladamente, geralmente estabelecem uma distribuição muito irregular nos ambientes internos, provocando iluminâncias excessivas nas regiões próximas à abertura, com conseqüentes problemas de ofuscamento, e níveis insuficientes de iluminação nos pontos mais distantes (Figura 2.3). “Os sistemas de aberturas mais simples (abertura lateral e zenital com vidro simples) distribuem a luz de forma irregular, causando ofuscamento, superaquecimento nos locais próximos da abertura, um aumento significativo no consumo de energia na edificação.” (MACEDO, 2002).

Para solucionar esse problema, têm sido usados sistemas que melhor aproveitam a luz natural, principalmente dispositivos que redirecionam a luz – como materiais prismáticos, prateleiras de luz, Dutos de Luz, etc. A melhor solução deverá considerar a possibilidade do uso de um ou mais sistemas, conforme as características de cada ambiente.

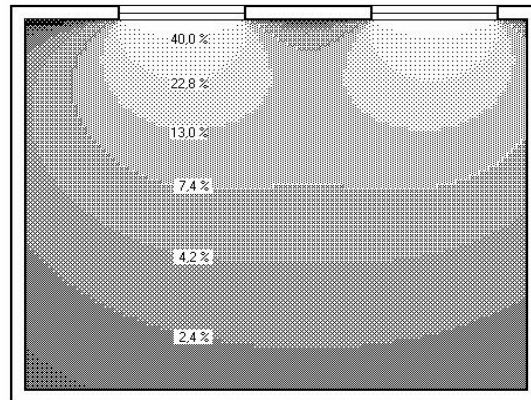


Figura 2.3: Distribuição de Iluminâncias em uma sala de 5,2 x 4,0 metros (RORIZ, 2001).

É tendência, portanto, que os projetos sejam cada vez mais bem elaborados no que diz respeito ao conforto ambiental e eficiência energética (como o exemplo da Figura 2.4) e, sendo assim, aqueles que não considerarem estes aspectos estarão fora dos padrões aceitáveis.

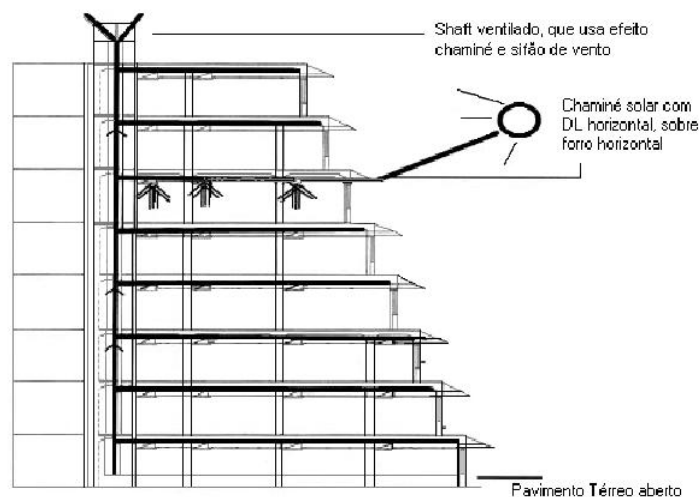


Figura 2.4: Projeto que combina luz e ventilação natural, acarretando em maior eficiência energética. (WEST, 2001)

Na execução de projetos, não se pode esquecer o conforto térmico, o qual pode variar conforme o modo como entra a luz natural e a carga térmica (CHIRARATTANANON et al, 2000), e a ventilação natural que, num projeto, interfere na disposição das aberturas e orientação da edificação.

Um panorama das possibilidades desses sistemas inovadores é encontrado em LITTLEFAIR (1996), MACEDO (2002) e PEREIRA (1992). Há ainda outras publicações com o intento de reunir as alternativas existentes, pelo que, entende-se que seja mais proveitoso, para esta pesquisa, restringir-se ao sistema que será analisado.

2.4 DUTOS DE LUZ

O interesse em conhecer as propriedades da luz é antigo. Sabe-se, por exemplo, que a propagação retilínea e a reflexão da luz eram conhecidas pelos antigos gregos. A lei básica da reflexão luminosa (que determina a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão de um raio de luz) foi descoberta por Heron de Alexandria, no século I. Em 1880, William Wheeler de Concord, Massachusetts, recebeu a patente de DL. Sua idéia era usar dutos com superfície interna refletiva para conduzir a luz. O protótipo não era muito eficiente e a maior parte da energia era absorvida pelos espelhos. Os DLs usam o princípio da “refletância total interna”, o qual foi observado cerca de dez anos antes por John Tyndal e é utilizado atualmente nos sistemas com fibra óptica.

Conforme Pereira (1992), o sistema de DL é composto por três subsistemas: de coleta da luz, de transmissão e distribuição da luz e de emissão da luz, conforme a Figura 2.5. Os DLs utilizam-se, portanto, do antigo conceito da reflexão aliado a uma nova e melhor compreensão.



Figura 2.5: Sistemas de coleta, distribuição e emissão da luz natural. (MACEDO, 2002)

O sistema de DLs capta a luz proveniente do céu e a conduz, por meio de sucessivas reflexões, distribuindo-a no interior do ambiente (ver Figura 2.6), economizando energia elétrica e melhorando o conforto visual – dependendo do uso do edifício e do tipo de trabalho realizado, pode-se incrementar o sistema com elementos que controlem a quantidade de luz que chega ao ambiente interno.

Alguns estudos, realizados em outros países, mostram economias de até 30% (COURRET et al., 1998) da energia gasta com iluminação, ou mesmo, dependendo do ambiente, a dispensabilidade do uso de luz elétrica, durante o dia (OAKLEY et al., 2000). Essa economia, bem como a eficiência do sistema em relação ao conforto visual

do usuário depende de aspectos climáticos da região, do posicionamento e da geometria do duto, de características da edificação e de outros dispositivos que podem ser usados para complementar o sistema.

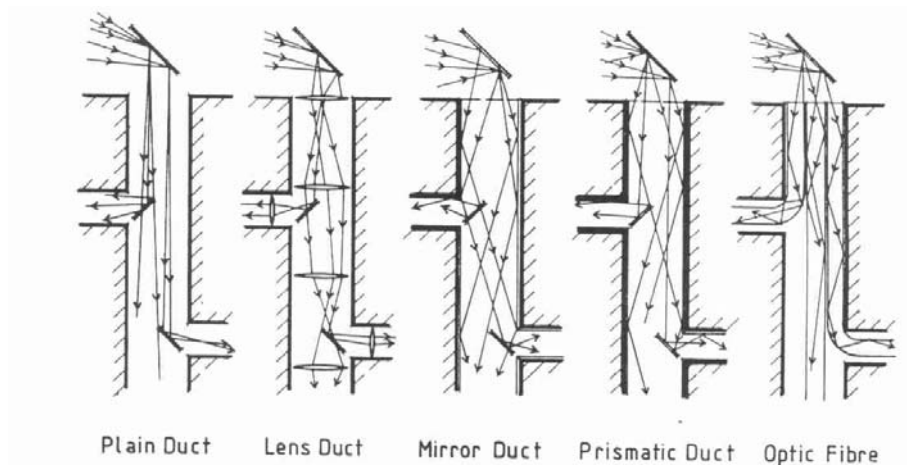


Figura 2.6: Esquemas de redirecionamento da luz solar. (MACEDO, 2002)

Na década de 1980 surgiram novos estudos que trouxeram avanços tecnológicos aos DLs, os quais passaram então a apresentar uma eficiência muito maior comparada a do primeiro modelo de 1880. Em 1987, foi apresentado um estudo sobre Duto de Luz Solar Passivo (URRIOL et al., 1987) por um instituto argentino. No estudo foi utilizado duto cilíndrico e reflexão especular e foram apresentados modelos para o cálculo do que chamaram transmitância do duto. Mas foi a partir do início da década de 1990 que se intensificaram os estudos, buscando economia de energia e minorar os danos causados ao meio ambiente pela poluição gerada na produção da energia.

Com a necessidade de obtenção de fontes alternativas e mais sustentáveis de energia, surgem pesquisas, na Europa e Austrália, que analisam aspectos da geometria e transmissão dos dutos, novos materiais para melhorar a eficiência do sistema e a relação entre as diversas variáveis que interferem no desempenho do DL. Exemplos são os trabalhos de Edmonds et al. (1995), no qual é analisado um sistema que associa o DL a um painel cortado a laser, melhorando a reflexão da luz para baixas elevações do sol, e de Courret et al. (1998), na Suíça, que utiliza dutos com seção retangular e formas diferenciadas nas seções que captam e distribuem a luz, conforme Figura 2.7. No estudo foram analisados o conforto visual e eficiência energética.

Atualmente há pesquisas com cabos de fibra óptica e outros materiais e pesquisas que consideram sistemas que unem a iluminação natural à ventilação natural, melhorando o conforto visual e térmico para o usuário. Elmualim et al. (1999) estudaram a utilização de material seletivo (o qual reflete a luz visível e permite a passagem do infravermelho) nas paredes internas do DL. Este duto era envolvido por um outro duto, de diâmetro maior, por onde o calor (raios infravermelhos) saía da edificação (Figura 2.8). Há ainda um estudo no qual Shao & Riffat (2000) analisam um sistema que integra iluminação e ventilação naturais e aquecimento solar de água.

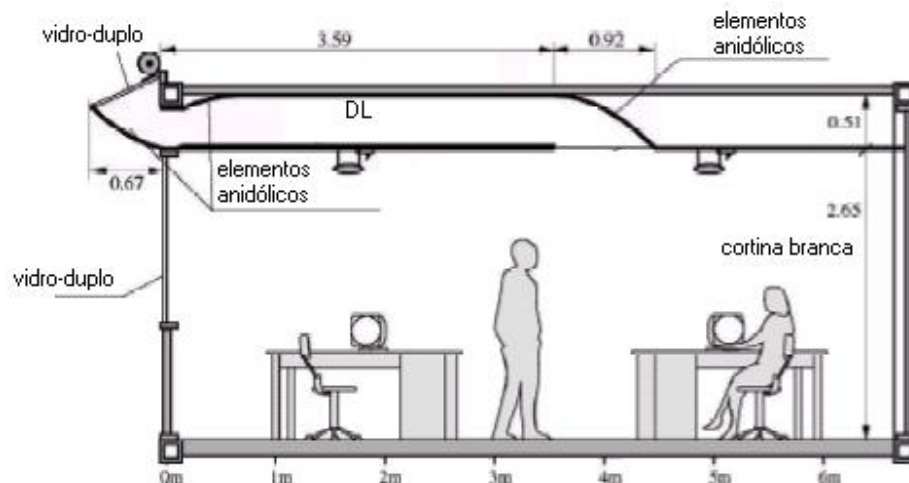


Figura 2.7: Esquema de DL horizontal. (COURRET et al., 1998)

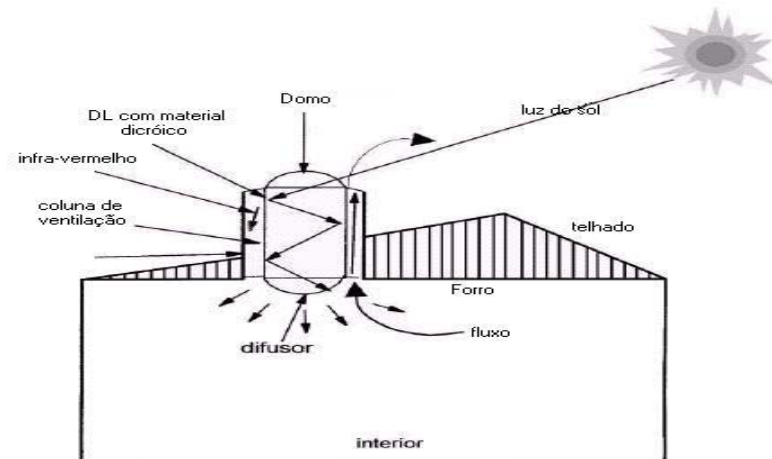


Figura 2.8: Iluminação e ventilação naturais no mesmo dispositivo. (ELMUALIM et al., 1999)

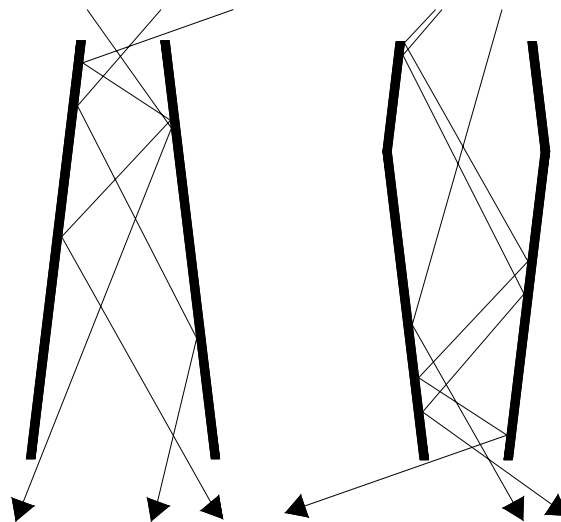
No Brasil há ainda poucas pesquisas e quase não se vê aplicação de sistemas com um aproveitamento mais eficiente da luz natural. Assim, vislumbra-se um campo enorme de oportunidades para estudos e pesquisas.

2.4.1 Condução da luz através do DL

Com o uso de DLs, surgem a necessidade e o interesse em conhecer o comportamento da luz conduzida através do duto. Usando conceitos da Física e dados experimentais, pesquisadores elaboram modelos matemáticos que descrevem o desempenho do DL e a influência das variáveis (diâmetro e comprimento do duto, altura angular do sol, etc.) na condução da luz.

A condução da luz através do DL depende de sua geometria, da refletância interna do duto e do ângulo de incidência dos raios solares, como será demonstrado no estudo teórico mais adiante. Outro aspecto essencial que também influi na condução dos raios solares é a diferença na distribuição da luz direta e difusa, quando o DL está submetido a diferentes condições de céu (JENKINS & MUNEER, 2003).

Na atual pesquisa, utilizam-se DLs com seção quadrada e retangular e com as paredes paralelas. Mas, a depender dos requisitos de projeto, podem ser usados DLs com geometrias diferenciadas, seja na captação ou na transmissão da luz. A Figura 2.9 ilustra alguns exemplos usados em DLs para direcionar a luz e controlar sua emissão na saída do duto, conforme se queira (Langley apud AYERS & CARTER, 1994).



DUTO DE RAIOS CONVERGENTES

DUTO DE RAIOS DIVERGENTES

Figura 2.9: Dutos apresentados por Langley apud AYERS & CARTER (1994).

Ao se utilizar um duto de raios convergentes ou divergentes, deve-se procurar diminuir o número de reflexões e obter a distribuição desejada. Por exemplo, no duto de raios convergentes apresentado, consegue-se, com a inclinação das paredes do duto, diminuir o número de reflexões e fazer com que os raios converjam. Entretanto, pode ser indesejável a convergência dos raios, e, neste caso, poder-se-ia utilizar o duto de raios divergentes, como o ilustrado na Figura 2.9. Qualquer que seja o caso, o importante é obter um conjunto que maximize a captação de luz, minimize a perda de energia durante a condução, e distribua a luz conforme a necessidade para cada situação.

Urriol et al. (1987) propuseram equações para a transmitância (termo usado pelo autor) da luz solar direta e difusa num DL. Foi considerada a propagação da luz num tubo cilíndrico vertical com paredes espelhadas.

Swift & Smith (1995) consideraram, primeiramente, um duto bi-dimensional, de comprimento l e largura s , no qual eram refletidos os raios de luz (Figura 2.10). Tendo a equação para a transmissão bi-dimensional, a transmissão tri-dimensional foi calculada como a integral dessa em função do diâmetro (largura s), resultando na Equação 2.1, válida para dutos cilíndricos, mostrada a seguir.

$$T = \frac{4}{\pi} \int_s^1 \frac{s^2}{\sqrt{1-s^2}} R^{\text{int}(p \tan \theta / s)} (1-R)(p \tan \theta / s - \text{int}[p \tan \theta / s]) ds \quad [\text{Eq. 2.1}]$$

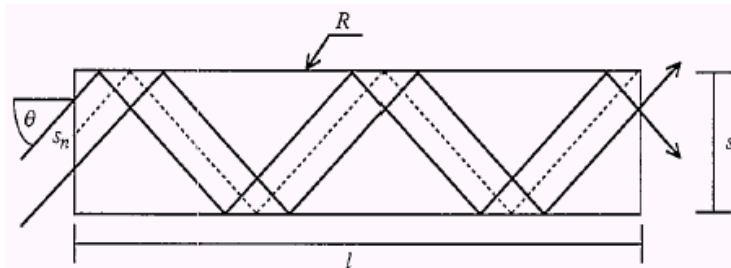


Figura 2.10: Duto bi-dimensional considerado por Swift & Smith (1995).

Os parâmetros utilizados foram: T (transmissão do duto), R (refletividade do duto), θ (ângulo de incidência dos raios solares com o eixo do duto), s (largura do duto) e $p = l/d$ (relação entre comprimento e diâmetro).

Nota-se que o ângulo de incidência, considerado, é formado, não com a superfície refletora, mas entre o raio solar e o eixo do duto. Por isso, quanto maior for o ângulo de incidência, maior será o número de reflexões e menor a transmissão do DL.

Em seguida foram obtidos dados experimentais para determinados valores de p e comparados com os resultados teóricos das equações. Percebe-se pelos gráficos da Figura 2.11, que as equações utilizadas representam bem o comportamento dos dutos.

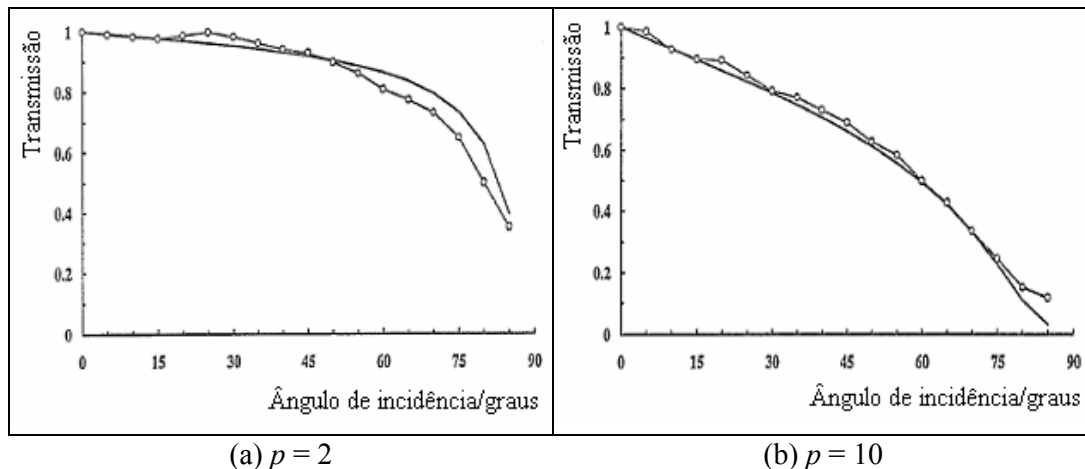


Figura 2.11: Dados experimentais (círculos) e teóricos (linha contínua) da transmissão em DLs em função do ângulo de incidência dos raios. (SWIFT & SMITH, 1995)

Zhang et al. (2000) adotaram um caso específico e analisaram o desempenho de um DL de diâmetro 33 cm e comprimento 121 cm. Iniciaram o estudo baseando-se no trabalho de Zastrow & Wittwer apud ZHANG et al (2000) e introduziram o conceito de Fator de Penetração da Luz do Dia do DL (“*daylight penetration factor*”- DPF) para relacionar a iluminância interna com a externa. Foi encontrado que, para um dado modelo de DL, o DPF varia em função da altitude solar, nível de claridade do céu e distância entre o ponto de medida da iluminância e o difusor do DL. Um esquema de DL, a vista do dispositivo instalado no telhado e o elemento difusor estão ilustrados na Figura 2.12.

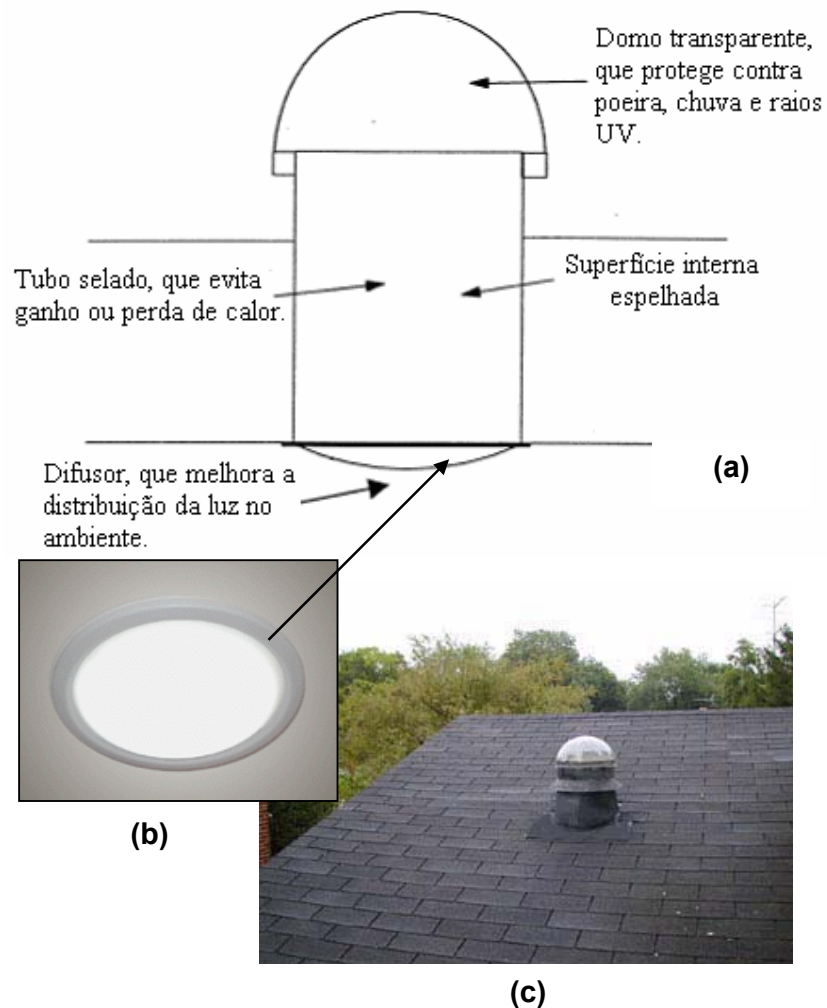


Figura 2.12: (a) Esquema do DL (OAKLEY et al., 2000; ZHANG et al., 2000); (b) Difusor; (c) Dispositivo instalado.

É extremamente importante obter uma equação sofisticada que descreva o comportamento de DLs. Estão surgindo novos estudos com esse foco, mas o caminho a ser percorrido é longo. Estando o mundo a passar por uma crise energética, em busca de economia de energia e de preservação do meio ambiente, as pesquisas nessa área são ainda insuficientes, o que impossibilita o aperfeiçoamento e a ampla aplicação dos DLs. Questões como o alcance do duto e melhor geometria deste e formas de distribuição da luz ainda não foram bem esclarecidas.

2.4.2 Distribuição da luz (difusor)

Qi et al. (1995) avaliaram algumas configurações possíveis (Figura 2.13) para o que chamaram *discrete emitter*, que tem, entre outras, a mesma função do difusor considerado neste trabalho. As configurações estudadas foram formadas pela combinação entre lentes (que podem ser côncavas, convexas, de Fresnel ou prismas), materiais difusores e superfícies refletoras ou pelo uso de apenas um dos elementos.

Em seu estudo, os pesquisadores chegaram à conclusão que o emissor composto (nome adotado em substituição ao termo na língua inglesa) tem vantagens sobre as luminárias convencionais. Concluíram, também, que o emissor pode ser aplicado tanto em sistemas de iluminação elétrica quanto em sistemas de iluminação natural, como os descritos no próprio trabalho (Figura 2.14).

O emissor composto mostra-se um elemento interessante para auxiliar na condução e distribuição da luz. Com um uso adequado das propriedades óticas de cada material, podem-se obter, conforme as conclusões dos pesquisadores, melhorias na qualidade e na eficiência da iluminação.

Não foram analisados ofuscamento, aparência estética, métodos de fabricação e manutenção. Estes são aspectos essenciais, que devem ser estudados posteriormente para possibilitar a aplicação e o uso dos emissores compostos.

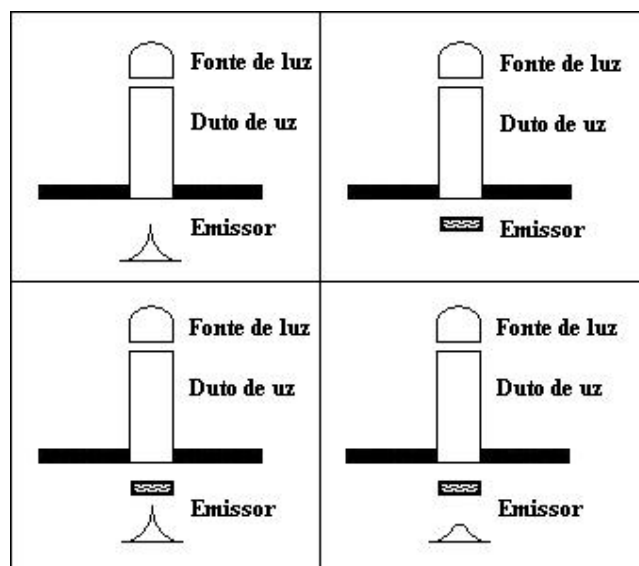


Figura 2.13: Configurações do emissor composto testadas por Qi et al. (1995).

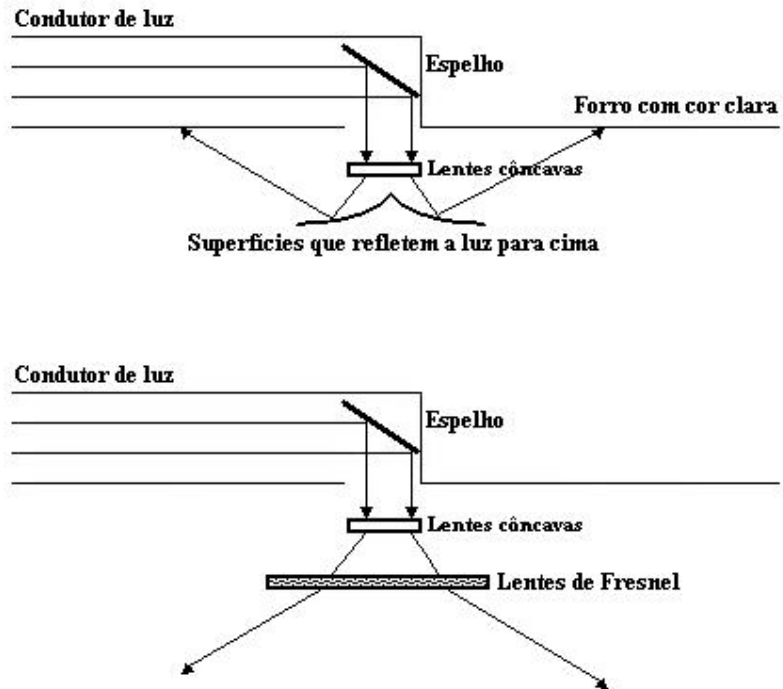


Figura 2.14: Configurações usadas por Qi et al. (1995) com a iluminação natural.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Equipamentos

Os seguintes equipamentos, disponíveis no Departamento de Engenharia Civil, foram usados no presente trabalho:

- **Luxímetro PANLUX eletrônico 2/GOSSEN (Figura 3.1):** Sua sensibilidade espectral acompanha a curva de sensibilidade do olho. Podem ser medidos todos os tipos importantes de luz, sem necessidade de aplicar qualquer fator de correção. O instrumento tem também um recurso interno de correção de cosseno, é fácil de operar e proporciona medida de alta precisão. Até mesmo a luz mais brilhante (luz do dia, refletores) pode ser medida sem ter que usar um acessório especial. Sua faixa de medida mais larga alcança até 200.000 lux;
- **Hobo H08-004-02 (dois aparelhos):** Registra e armazena dados de temperatura, umidade e iluminância (Figura 3.2) – Armazena até 7943 dados, com tempo programável de início e intervalo das medições. Intervalo de medições para intensidade da luz: 2 a 600 footcandles (lumens/ft²), que corresponde a um intervalo entre 22 e 6460 lux;



Figura 3.1: Luxímetro *Gossen*.



Figura 3.2: *Hobo* H08-004-02.

3.1.2 Maquete

Nesta pesquisa foram utilizados modelos em escala reduzida devido à possibilidade de:

- Adequação para condições de formas complexas;
- Facilidade em comparar alternativas de projeto, por meio de componentes intercambiáveis, permitindo ainda análises quantitativas e qualitativas;
- Estimular a percepção e compreensão dos fenômenos físicos envolvidos.

Procurou-se atentar para algumas normas de procedimento: ambientes muito recortados são impróprios, deve-se ter fácil acesso ao interior da maquete e as propriedades dos ambientes e superfícies devem estar corretas (LITTLEFAIR, 1996).

Fizeram-se medições em modelos em escala, que representam ambientes com sistema de iluminação por janela lateral (comumente utilizado) e outro com a utilização de DL.

Durante o projeto e construção da primeira maquete (Figura 3.3a a 3.3c), objetivou-se a possibilidade de realizar modificações – em paredes, forro e piso – na disposição de aberturas, tipo e posicionamento do DL e na altura do pé-direito. Procurou-se, também, confeccionar uma maquete que fosse leve, fácil de transportar, mas que não sofresse danos durante o transporte e manipulação.

As paredes foram feitas de isopor reforçado com papel cartão, colado nas duas faces, e podem ser facilmente removidas e substituídas, dependendo do estudo a ser realizado. Para dar rigidez e estabilidade à maquete, fez-se a estrutura com perfis de alumínio (Figura 3.4a) e base em madeira aglomerada. Para o forro, optou-se pelo PVC, que se ajustou à modulação da maquete, possibilitando alterar a posição do DL, conforme se queira, e substituí-lo, de modo a variar o seu comprimento, sua seção, etc. Pode-se, ainda, movimentar o piso de modo a alterar o pé-direito (Figura 3.3b), deixando-o próximo ao utilizado em edificações residenciais, escolares, ou mesmo industriais.

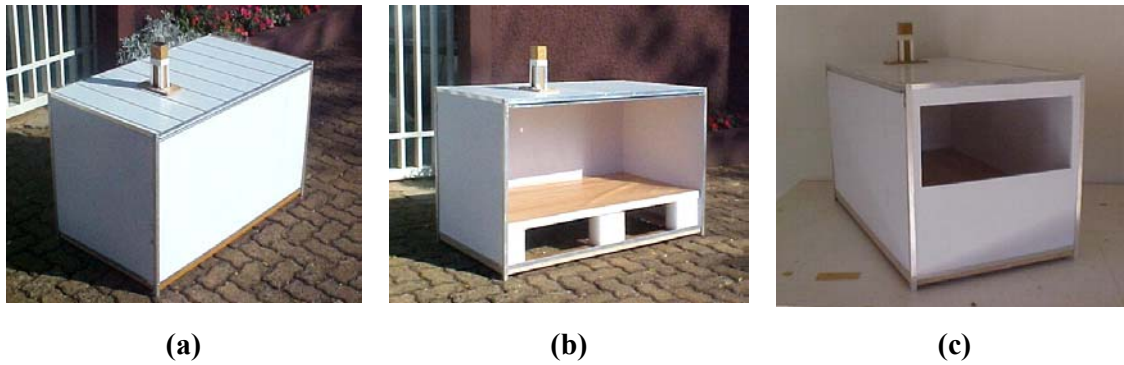


Figura 3.3: (a) Maquete usada, com Duto de Luz. (b) Vista interna da maquete. (c) Maquete com janela e duto.

A maquete, inicialmente, procurou simular um ambiente como uma sala de aula, escritório, etc., ao possuir paredes com cores claras (papel cartão branco), piso que simula um piso de madeira e forro de PVC, materiais estes muito usados nos ambientes em geral. Os elementos que contêm vidro na escala real, foram deixados sem material algum na maquete.

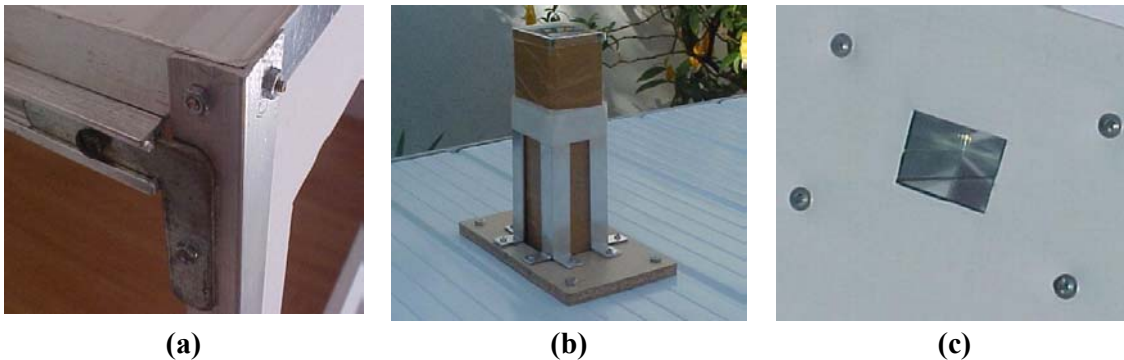


Figura 3.4: (a) Detalhe dos perfis de alumínio utilizados. (b) Vista externa do Duto de Luz. (c) Vista interna do Duto de Luz.

A maquete possui comprimento de 0,80m e largura de 0,44m, e o pé-direito pode variar até um máximo de 0,45m, em escala 1:10.

Foram utilizados DLs com espelho comum (Figuras 3.4b e 3.4c), por ser um material barato e que apresenta as características necessárias ao uso neste projeto. Fez-se necessário o uso de um difusor na saída do duto para melhorar a distribuição de iluminâncias. Inicialmente, fizeram-se ensaios com alguns materiais (papel vegetal e polímero utilizado em pastas escolares), e não se obteve a distribuição desejada. Um difusor adequado é fator determinante na eficiência do sistema e um estudo para a escolha desse material foi feito em etapa a ser apresentada posteriormente.

Após as medições, no intento de avaliar o desempenho do DL em relação ao da iluminação lateral, analisaram-se as variáveis, a saber:

- **Geometria do DL:** Seção do duto, seção pela qual é captada e distribuída a luz natural, comprimento do duto;
- **Posicionamento do DL:** Orientação do duto e superfícies de captação;
- **Ponto de medição:** Distribuição da luz no ambiente, em relação à distância entre o ponto medido e o ponto de entrada de luz;
- **Características das superfícies:** Para a reflexão da luz no duto, no piso, teto e nas paredes;
- **Dispositivos para controle da luz:** Elementos (materiais) usados para controlar a luz levada ao espaço interno pelo DL – difusores;
- **A latitude do local e altura angular do sol sobre o horizonte:** O comportamento dos dutos varia conforme a trajetória do sol e a latitude do local estudado, que definem as condições de céu da região (São Carlos – SP).

3.1.3 Primeiras Medições

Na busca por um local com horizonte pleno, obteve-se acesso à cobertura de um edifício em obras, localizado na Avenida Dois, esquina com Avenida Três, no Parque Faber em São Carlos (SP). As primeiras medições serviram para o treinamento no uso dos aparelhos, identificar possibilidades de melhoria e definir métodos a serem utilizados. A maquete foi montada em duas configurações (só com janela lateral e com DL mais janela) com a abertura lateral orientada para Sul, de modo que não incidisse luz solar direta no ambiente interno.

As dimensões (escala 1:10) são 8,0 x 4,4m e o pé-direito 3,5m. O peitoril tem 1,1m e a janela, área equivalente a 52% da fachada Sul. Dividiu-se internamente a maquete em quinze pontos, nos quais foram medidas as iluminâncias internas. Mediu-se, também, a iluminância externa, entre 10h30min e 15h30min do dia 22 de setembro de 2003, obtendo, através da relação entre iluminâncias interiores e exteriores (Figura 3.7), os Coeficientes de Luz Diurna – CLD. Foram definidos três eixos, mas devido à simetria os valores de iluminância foram obtidos em apenas dois deles (ver Figuras 3.5 e 3.6). Cobriu-se a maquete com plástico preto para evitar vazamento de luz. No exterior, protegeu-se a fotocélula da luz solar direta, conforme recomendações do projeto de norma (ABNT, 1999b). É importante ressaltar que os resultados apresentados

neste item são de medições iniciais e que o sistema de iluminação e os métodos de ensaio foram otimizados com o andamento da pesquisa.

Os valores de CLD obtidos, bem como os eixos e posições onde foram feitas as medidas, estão representados nas Figuras 3.5 e 3.6. Percebe-se que os níveis de iluminação são maiores nas regiões próximas à janela e diminuem em direção ao fundo da sala.

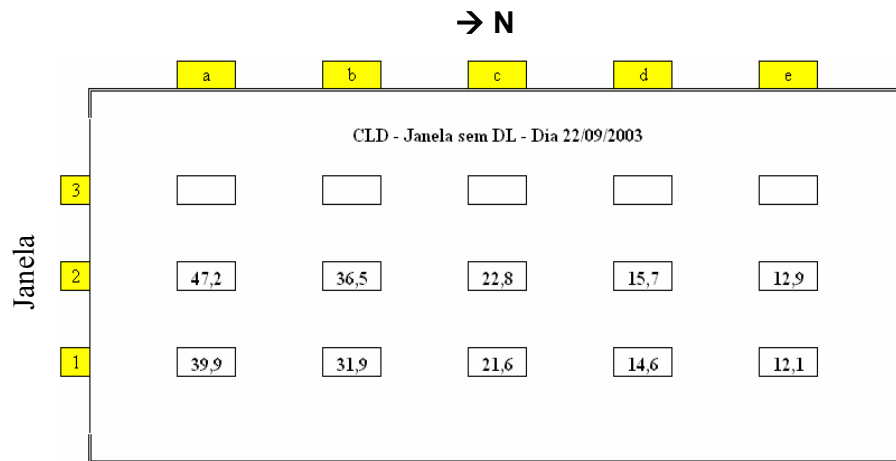


Figura 3.5: Valores médios do CLD nos pontos medidos, com janela.

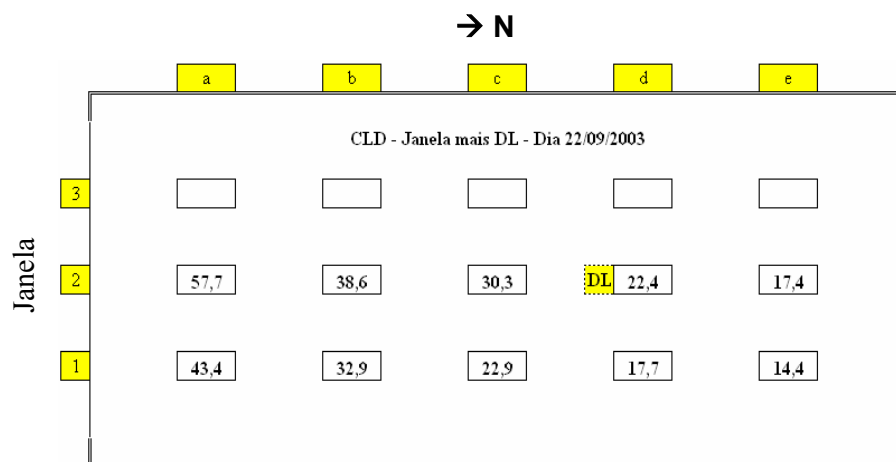


Figura 3.6: Valores médios do CLD nos pontos medidos, com janela e DL.

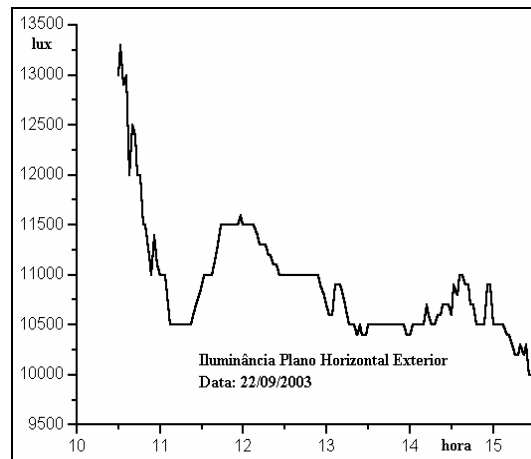


Figura 3.7: Valores de iluminâncias externas, no dia das medições.

Para facilitar a visualização da contribuição do DL na iluminação, as iluminâncias internas, com e sem DL, foram representadas nas Figuras 3.8 e 3.9. Com as primeiras medições foram observados os seguintes aspectos:

- O DL pode melhorar expressivamente a quantidade e a distribuição da luz. No entanto, a seção do DL usado foi considerada pequena e a área da janela muito grande, o que dificultou a verificação dessa melhoria (ver Figuras 3.8 e 3.9);
- O material difusor utilizado não atende aos requisitos desejados. São necessários testes para encontrar um material adequado para o difusor;
- Seria ideal ter aparelhos para medição de um maior número de pontos.

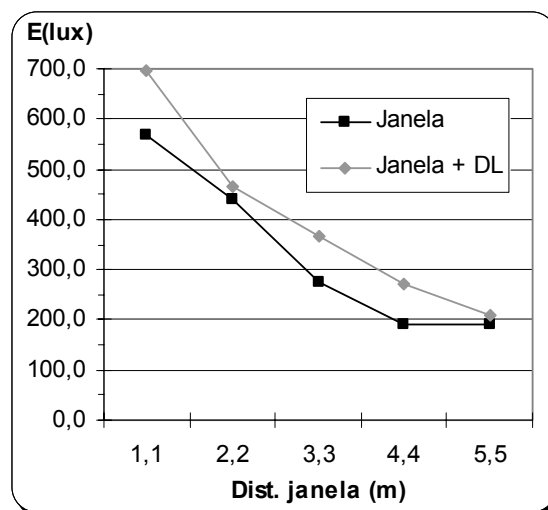


Figura 3.8: Gráfico comparativo das iluminâncias médias, no eixo 2 (central).

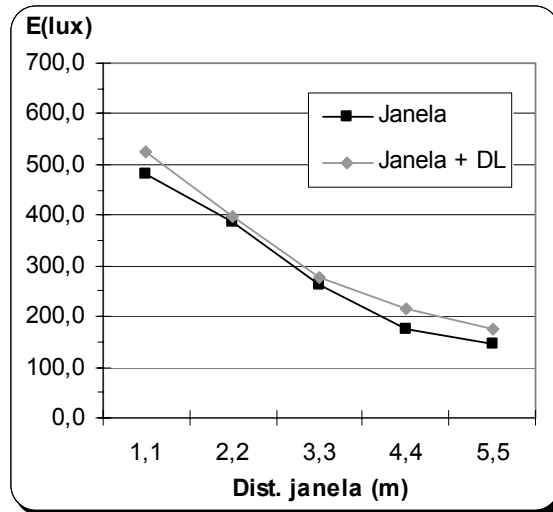


Figura 3.9: Gráfico comparativo das iluminâncias médias, no eixo 1.

3.2 MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DIFERENTES DUTOS DE LUZ

Após as primeiras medições, julgou-se válido um estudo pormenorizado da contribuição do DL, sem se considerar a participação da janela. Após um melhor conhecimento da iluminação provida pelo DL, torna-se mais simples a comparação com o sistema de abertura lateral, por meio de simulação ou mesmo por novas medições.

A maquete, então, foi dividida em dois ambientes para um estudo sobre a influência da seção, orientação e comprimento do DL. Cada um dos ambientes resultantes após a divisão recebeu iluminação somente através do duto. Num ambiente, foi colocado um DL com seção quadrada, com seis centímetros de lado (tomado como referência). No outro ambiente, variou-se (de medição para medição) a seção, a altura e a orientação do DL. Adotou-se, aqui, a nomenclatura da seção 3x12 quando a menor dimensão (três) está paralela ao eixo leste-oeste (como na Figura 3.10). Do mesmo modo, quando o texto refere-se à seção 12x3, significa que a dimensão com 12cm (e não mais a menor) está no eixo leste-oeste.

Em cada ambiente foi colocado um aparelho *Hobo* para registrar as iluminâncias internas e a iluminância externa foi medida com o luxímetro portátil. Foram tomadas medidas das iluminâncias devidas à luz total e difusa. O luxímetro foi protegido contra a radiação solar direta por uma haste que possui um pequeno disco (aproximadamente sete centímetros de diâmetro) na sua extremidade, para sombrear a fotocélula do aparelho e obter a iluminância devida à luz difusa. No mesmo instante, a iluminância devida à luz total foi medida, com o aparelho sem proteção. A partir da diferença entre os valores medidos obteve-se a iluminância produzida pela parcela de luz direta.

Com os valores das iluminância internas e das iluminâncias externas devidas à luz total (direta mais difusa), calculou-se a percentagem da luz externa disponível que chega ao ambiente interno. A razão entre iluminância interna e externa foi chamada aqui de Fator de Luz Total (FLT).

Nestas medições, pôde-se observar a influência das características do DL e também aspectos das condições de céu e as implicações destes na iluminação do ambiente interno. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram um esquema da maquete dividida e do percurso com as posições dos aparelhos nas medições.

Procurou-se posicionar os aparelhos, ao longo da medição, de modo que estes cobrissem a área toda da maquete sem permanecer muito tempo numa mesma região, para diminuir a interferência da movimentação do sol nos resultados.

Nas medições comparativas entre os DLs, o difusor usado foi o acrílico leitoso.

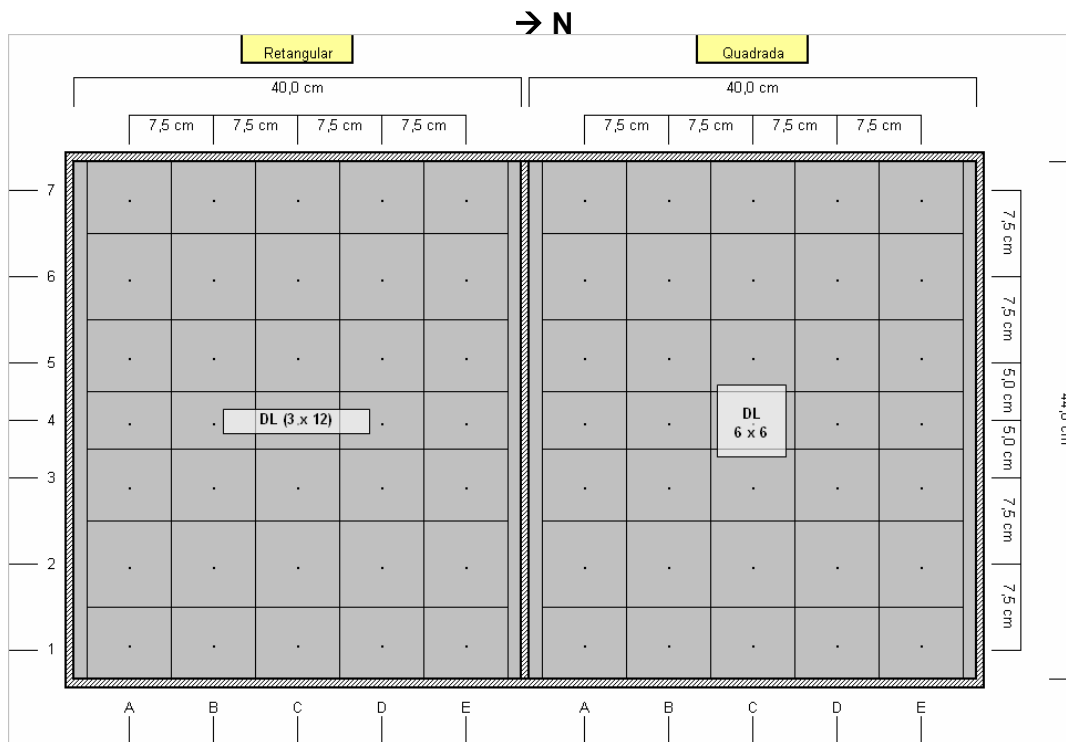


Figura 3.10: Esquema da maquete (ambiente dividido) para comparação entre DLs.

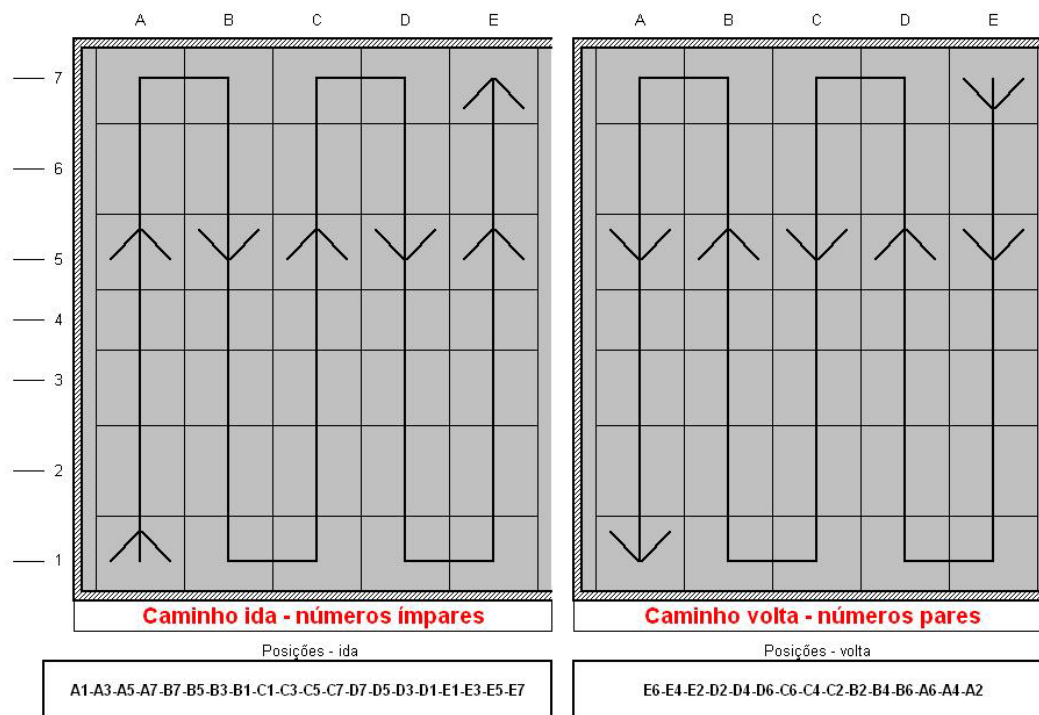


Figura 3.11: Caminho percorrido pelos aparelhos durante as medições.

3.3 MEDIÇÕES PARA ESCOLHA DO MATERIAL DIFUSOR

A primeira dificuldade encontrada na pesquisa foi a obtenção de um elemento difusor adequado. Sabe-se que, em se tendo acesso à tecnologia e a técnicas e materiais avançados, pode-se otimizar a distribuição da luz, além de melhorar certos aspectos da carga térmica recebida e da ventilação, como observado na revisão bibliográfica. Todavia, é necessário salientar que, para a presente pesquisa, procurou-se utilizar um material que tivesse disponibilidade no mercado, que pudesse ser facilmente adquirido, que apresentasse baixo custo e, principalmente, que fosse de fácil incorporação à maquete.

Foram testados e comparados o acrílico leitoso e o vidro jateado, por serem materiais comumente utilizados em luminárias, e também uma película. Para as medições, foi construída uma outra maquete, de dimensões 40x40cm e pé-direito de 26cm, dentro da qual a luz entra somente através de uma abertura zenital vedada com o material a ser testado. As paredes da caixa foram cobertas com papel preto fosco para que a refletância das superfícies internas não interferisse na distribuição da luz. Foi avaliada a distribuição de luz proporcionada pelo material (vidro ou acrílico) através de medições, com o uso dos aparelhos já citados no item 3.1.1.

Durante as primeiras medições, identificou-se a dificuldade na análise dos resultados devido ao uso de somente dois registradores. A dificuldade aconteceu porque poucos pontos poderiam ser medidos simultaneamente e, se se considerasse a relação entre iluminância externa e interna constante em cada ponto, independentemente do tempo, incorrer-se-ia em conclusões feitas com base em hipóteses inadequadas para o céu da região.

Desse modo, prosseguiu-se uma adequação dos métodos utilizados na pesquisa. Realizaram-se as medições para determinar a quantidade da luz disponível (no exterior) que é transmitida através do material para o ambiente e a distribuição dessa. Nas medições, os dois aparelhos foram colocados em posições equidistantes do centro da maquete, de modo a verificar se a distribuição da luz acontece de forma simétrica. Caso o difusor fosse ideal, os aparelhos registrariam valores iguais, o que, no gráfico, seria representado por uma reta com inclinação de 45°.

Os valores das iluminâncias foram registrados simultaneamente em dois pontos equidistantes do centro (exemplo: pontos 1 e 8, 2 e 7, a e h, nas Figuras 3.12 e 3.13).

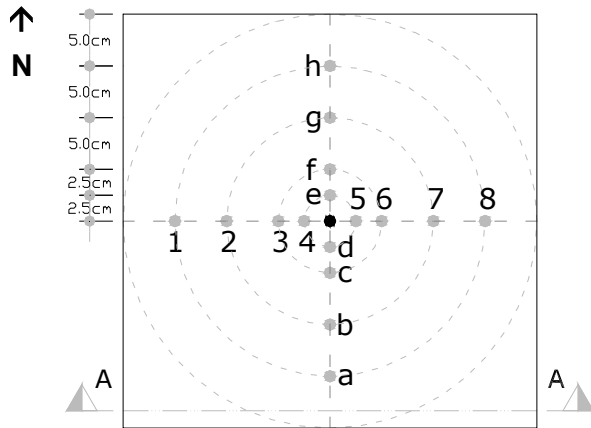


Figura 3.12: Planta da maquete usada para teste do material difusor.

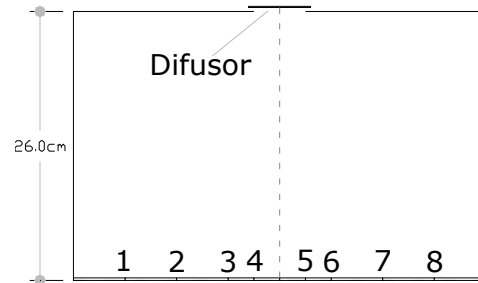


Figura 3.13: Corte A-A da maquete.

Os dados foram representados em gráficos, cujos eixos são compostos pelos valores registrados em cada aparelho. Um material adequado deverá apresentar um gráfico semelhante a uma reta, com inclinação de 45° .

3.4 MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DUTO DE LUZ E JANELA

Com as dificuldades encontradas, optou-se por diminuir o número de variáveis que influenciam no sistema de iluminação através de Dutos de Luz. Com este intento, decidiu-se cobrir internamente as paredes da maquete com papel preto fosco, de modo que a reflexão nas paredes fosse eliminada.

Para fazer a comparação entre os desempenhos dos sistemas de iluminação natural (com janela e com DL mais janela), fizeram-se medições em nove dias diferentes, em Dezembro de 2004, Janeiro e Fevereiro de 2005, meses em que se utilizava o horário de verão. As medições dependeram da ausência de chuva e mau-tempo, da presença de funcionários na obra para acesso ao local de medição e da disponibilidade dos aparelhos, também utilizados em outras pesquisas. O horário de medição, em cada dia, iniciou-se às 8h00min e terminou às 11h00min. Sempre que possível, enquanto o funcionário estivesse na obra, a medição repetia-se uma vez mais e seguia até às 14h00min.

Nas medições, foram verificadas as diferenças entre os níveis de iluminação com e sem DL e o atendimento aos níveis de iluminância recomendados pela norma brasileira para salas de aula. Conforme a NB 57 (ABNT, 1991), o nível de iluminância para salas de aula deve estar entre 200 e 500 lux. Os níveis (mínimos e máximos) de iluminância para salas de aula foram usados para mostrar a melhoria que se consegue com o uso dos DLs, mas a análise pode ser feita para qualquer tipo de ambiente. No caso de ambientes com atividades que exigem maior precisão e produtividade, é necessário um nível maior de iluminância. Nesses casos, pode-se utilizar um ou mais DLs e posicioná-los no ambiente conforme a necessidade.

Os valores adequados de iluminância, para uma sala de aula, segundo a ABNT (1991), foram representados nos mesmos gráficos em que estão os valores das iluminâncias internas, medidas em lux, e da proporção (E/E_{ref}) entre a iluminância de referência (E_{ref}), a um metro da janela, e a iluminância nos outros pontos de medição (E). Os valores constantes na norma foram inseridos nos gráficos para que se possa ter uma melhor idéia do benefício trazido pelo uso do DL e do excesso de luz presente nas regiões próximas à janela.

Nas medições para a obtenção das curvas de iluminâncias, com as parcelas de contribuição da janela e do DL, foram definidos sete pontos (Figuras 3.14 e 3.15), com distância de 10cm entre si, numa linha perpendicular à parede com janela, esta orientada

ao sul. Os aparelhos ficaram a uma altura de 7,5cm do piso. Registrou-se a iluminância de dois em dois minutos, alternando entre o ambiente só com janela e com duto mais janela. Para alternar entre "janela" e "janela mais duto", o duto foi fechado a cada dois intervalos de medição. Para facilitar a compreensão, tem-se o seguinte exemplo:

- **Primeiro valor registrado (8h00min):** duto mais janela. Tem-se a iluminação proporcionada pelo DL e pela janela simultaneamente;
- **Segundo valor registrado (8h02min):** o duto é vedado para não passar luz. Nesta situação, só a janela contribui;
- **Terceiro valor registrado (8h04min):** igual ao primeiro;
- **Quarto valor registrado (8h06min):** igual ao segundo;

Desse modo obtêm-se duas curvas, sendo uma da janela e uma do duto mais a janela. A partir dessas curvas é possível, teoricamente, estimar os valores para um mesmo momento.

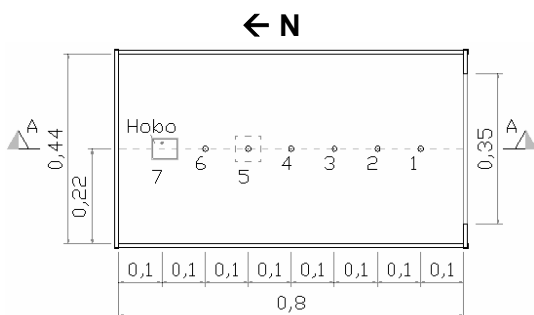


Figura 3.14: Planta da maquete usada.
Medidas em metro.

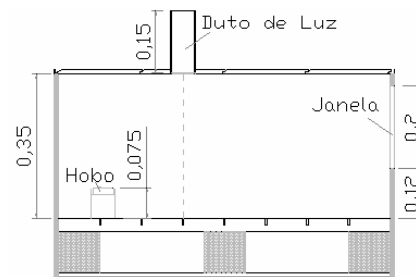


Figura 3.15: Corte A-A da maquete.

Um aparelho registrador permaneceu na posição 1, a dez centímetros da janela, e registrou os valores de iluminância tomados como de referência (E_{ref}) e o outro registrou os valores das iluminâncias (E) nas outras posições (pontos 2 a 7). Em cada ponto, o aparelho permaneceu por um período de 30 minutos. O valor usado para representar cada ponto é a média entre sete valores.

Ao tomar como referência o ponto 1, pode-se fazer a proporção entre os valores obtidos, ao mesmo tempo, neste e em diferentes pontos. O ponto 1 serve como correção

da variação de iluminância do céu, para que se possa fazer uma comparação entre os valores obtidos em tempos diferentes. Esse método foi adotado pelo fato de não se dispor de um número maior de aparelhos para a medição simultânea de vários pontos. O valor estimado das iluminâncias médias é, então, obtido ao multiplicar os fatores (E/E_{ref}) calculados pela média das iluminâncias externas obtidas durante todo o período de medição. Vale lembrar que essa correção adotada não equivale aos valores reais, mas a uma aproximação para possibilitar a análise dos dados.

3.5 ANÁLISE TEÓRICA DA GEOMETRIA DO DUTO DE LUZ

Com a finalidade de obter equações que descrevam o comportamento de Dutos de Luz, fez-se um estudo teórico da transmissão dos raios solares através do duto. Para o estudo, foram considerados aspectos da geometria e refletância da superfície interna do duto, ângulo de incidência dos raios solares e condições de céu na região de São Carlos (SP). Confirmou-se que a luz direta é a principal parcela da luz disponível e tem um comportamento que facilita uma análise teórica. Por isso, o estudo teórico baseou-se nesta parcela.

3.6 ESTIMATIVA DA ECONOMIA DE ENERGIA

A economia de energia foi analisada considerando a redução no consumo de energia com iluminação artificial e, ao usar menos lâmpadas, a diminuição da carga térmica e do uso de condicionamento artificial. Ao mesmo tempo em que o uso do DL diminui a necessidade de iluminação artificial, também traz uma maior carga térmica ao ambiente interno. Este fato também será considerado ao quantificar a possível economia de energia.

Caso o ambiente seja ventilado naturalmente, a carga térmica adicionada pelo DL não influenciará no consumo de energia (mas poderá influenciar no conforto das pessoas) e, neste caso, a economia acontecerá pelo menor uso de iluminação artificial.

Para fazer o balanço das cargas térmicas associadas à iluminação natural e artificial, utilizar-se-á a eficiência luminosa e os níveis de iluminância. Apesar da eficiência luminosa da luz natural ser variável, pode-se assumir um valor médio. PEREIRA (1992) e LAM & LI (1996) apresentam valores para a eficiência luminosa da luz natural sob diversas condições de céu.

3.7 CONDIÇÕES DE CÉU

Embora a norma (ABNT, 1991) faça uma classificação dos tipos de céu em função da percentagem de céu encoberto pelas nuvens, acredita-se que, não só a quantidade, mas, o posicionamento das nuvens seja fator fundamental na classificação das condições de céu. Sendo assim, sugere-se que o céu seja classificado a partir da proporção entre as parcelas de luz difusa e total. Ao fazer a classificação pela proporção entre iluminâncias (devidas à luz difusa e total), o posicionamento das nuvens influencia nos valores obtidos e é, portanto, considerado. Para verificar este fato, tentou-se confrontar as iluminâncias medidas com fotografias tiradas de uma faixa do céu, como explicado mais à frente, no item 5.3.

Em todas as medições foram tomados os valores de iluminâncias exteriores. A caracterização das condições de céu foi feita através das medições da luz total disponível no ambiente externo (com o aparelho sem proteção) e da luz difusa disponível (com o aparelho protegido da radiação direta). O elemento que protege o aparelho contra a radiação direta deveria ser pequeno e esconder apenas o sol, deixando a região circumsolar visível à fotocélula. Essa situação, entretanto, é difícil de se conseguir, visto que é preciso considerar o movimento do sol, e eventos naturais, como um vento forte, podem atrapalhar.

Foram registradas as variações na condição do céu através de fotografias, com câmera digital. A cada intervalo de tempo pré-definido, certas posições foram fotografadas para posterior análise. As iluminâncias externas medidas foram utilizadas para ajudar no entendimento da variação das iluminâncias internas e do comportamento do Duto de Luz e da janela.

As fotografias não foram usadas nos itens anteriores por que através da análise cuidadosa dos gráficos já é possível obter as informações necessárias ao estudo, como pode ser visto no item 4.3. Além disso, a obtenção de fotos é mais trabalhosa e o intervalo de tempo necessário é maior. Entretanto, as imagens obtidas podem ser mais ilustrativas e possibilitar a comparação entre as condições de céu registradas e as de um céu qualquer. Com o equipamento disponível, conseguiu-se registrar somente uma pequena faixa do céu. Na maior parte dos dias de medição foi registrada uma faixa no eixo norte-sul (ver Figura 3.16). No dia 06/12/2004, fotografou-se uma faixa de céu no eixo leste-oeste, respeitando os mesmo ângulos mostrados na Figura 3.16.

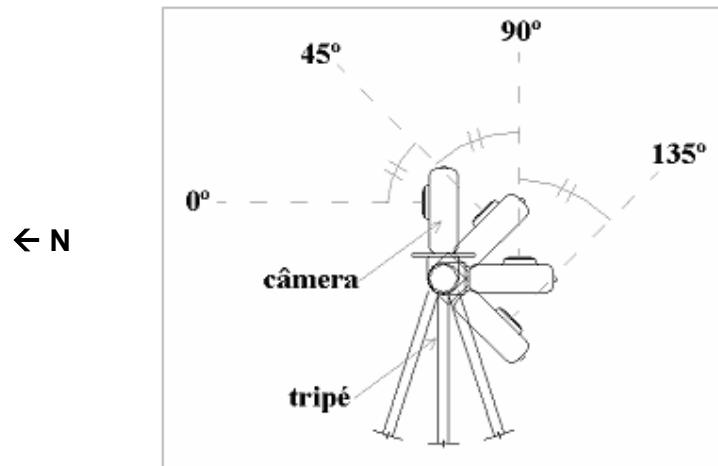


Figura 3.16: Sentidos e ângulos das fotografias do céu.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE

EXPERIMENTAL

4.1 MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DIFERENTES DUTOS DE LUZ

Neste item, apresentam-se os resultados da comparação entre ambientes, da maquete, iluminados através de DLs com diferentes características geométricas.

Os fatores FLT calculados (pela relação entre iluminância interna e externa total) foram resumidos nas Figuras 4.1, 4.3, 4.5 e 4.7. Para elucidar alguns aspectos dos resultados encontrados, as iluminâncias externas no plano horizontal devidas às parcelas total, direta e difusa da luz foram apresentadas, para os dias de medição (Figuras 4.2, 4.4, 4.6 e 4.8). Nos gráficos também há a indicação da condição de céu, que foi identificada através da observação das nuvens.

Os resultados indicam que o DL com seção quadrada, quando comparado ao DL com seção retangular, proporciona um ambiente com níveis de iluminância maiores e uma melhor distribuição da iluminação (Figuras 4.1 e 4.3). A possível razão para o melhor desempenho do DL com seção quadrada é discutida, mais adiante, após a análise teórica, nas conclusões. Pode-se trabalhar com a geometria do duto, caso seja interessante uma maior iluminação em determinada região do ambiente.

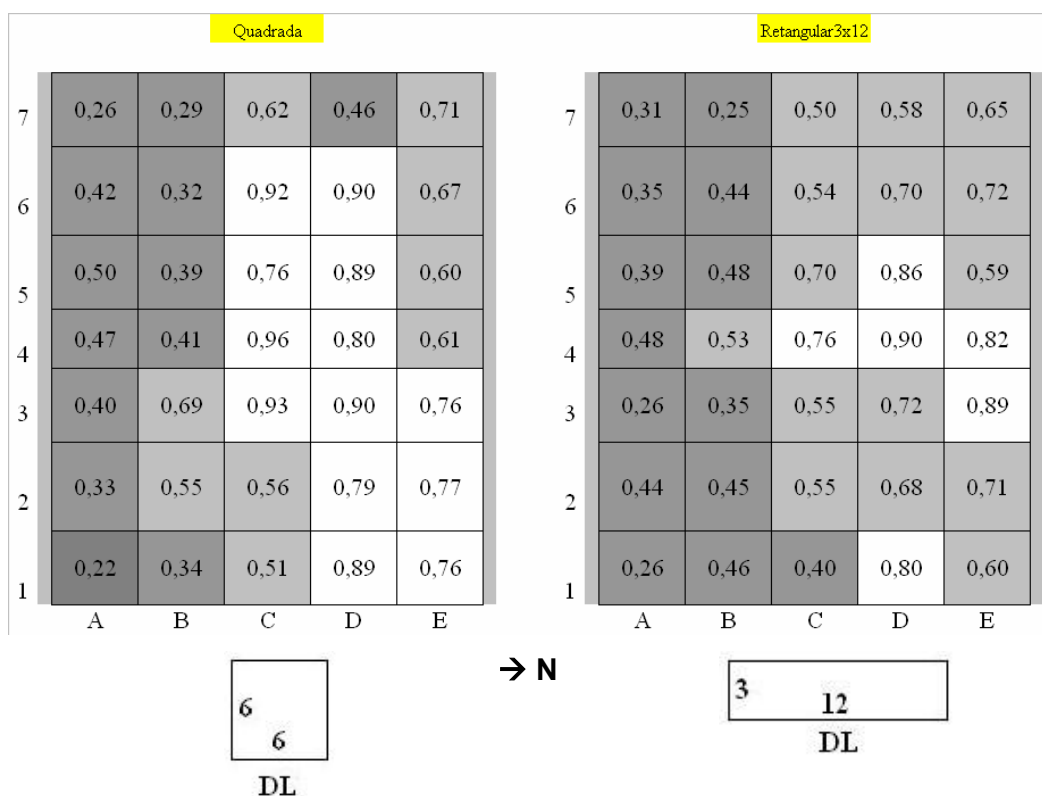


Figura 4.1: FLT registrados com DLs de seção quadrada e retangular (3x12).

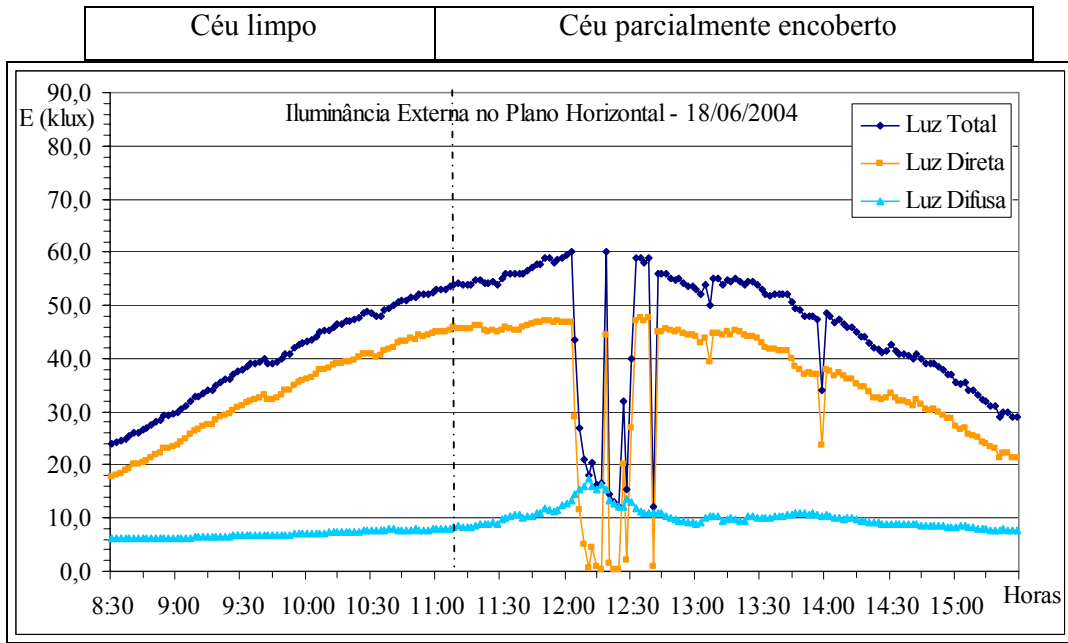


Figura 4.2: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 18/06/04.

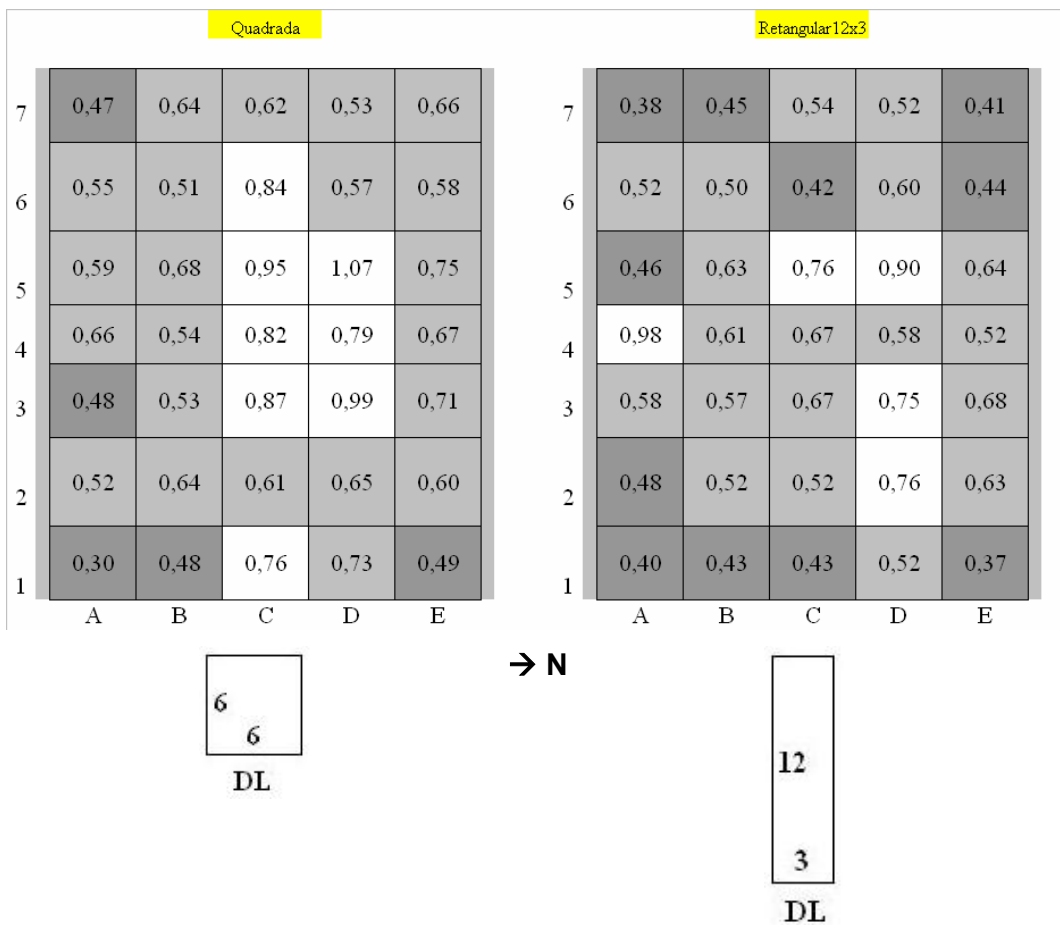


Figura 4.3: FLT registrados com DLs de seção quadrada e retangular (12x3cm).

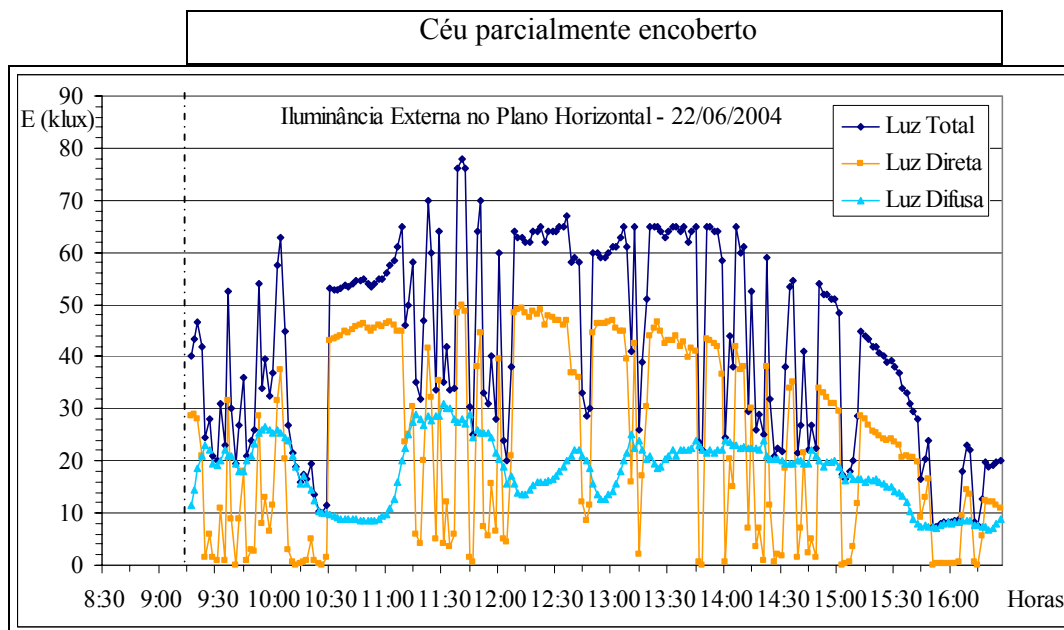


Figura 4.4: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 22/06/04.

O DL com seção quadrada apresentou uma média de iluminância 8,4% maior no dia 18/06/04 e 15,2% maior no dia 22/06/04, em relação ao DL com seção retangular.

No que diz respeito à área da seção do DL, ou de captação da luz, identificou-se que esta tem grande influência na quantidade de luz que chega ao ambiente (Figura 4.7). Nas medições iniciais, a redução do Fator de Luz Total (FLT) médio foi diretamente proporcional à redução da área. O DL com seção quadrada de área 9,0 cm² (3x3 cm), que corresponde a 25% da área do DL de referência (6x6 cm), forneceu um FLT médio 376,5% menor. Tal variação deve-se ao fato de alterar o número de reflexões ao longo do DL e a quantidade de luz captada.

Já a variação de altura testada não teve a mesma influência. Para um aumento de 10 cm (de 15cm para 25 cm) na altura, houve uma redução na média dos fatores da ordem de 16%. Em alguns pontos de medição, a iluminância interna resultante com o DL de maior altura teve um valor maior (ver Figura 4.5). É evidente que este valor depende do caminho que a luz percorre – o número de reflexões e os ângulos com que os raios solares incidem nos espelhos.

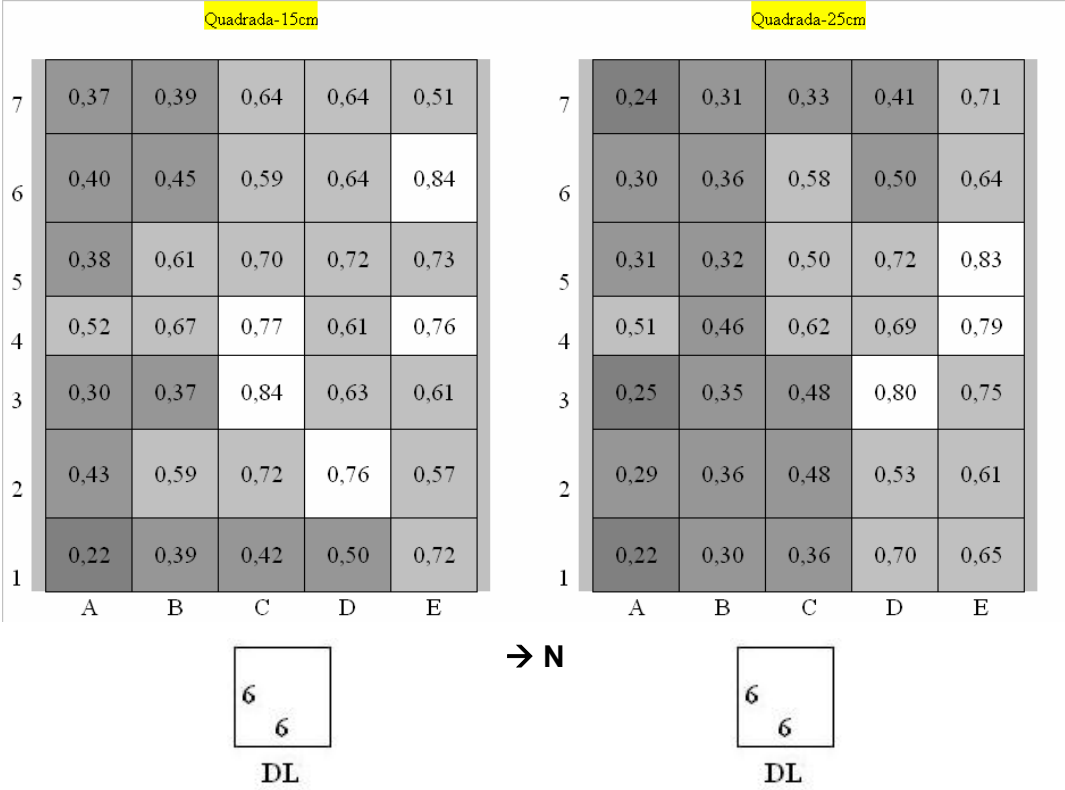


Figura 4.5: FLT registrados com DLs de mesma seção e alturas 15cm e 25cm.

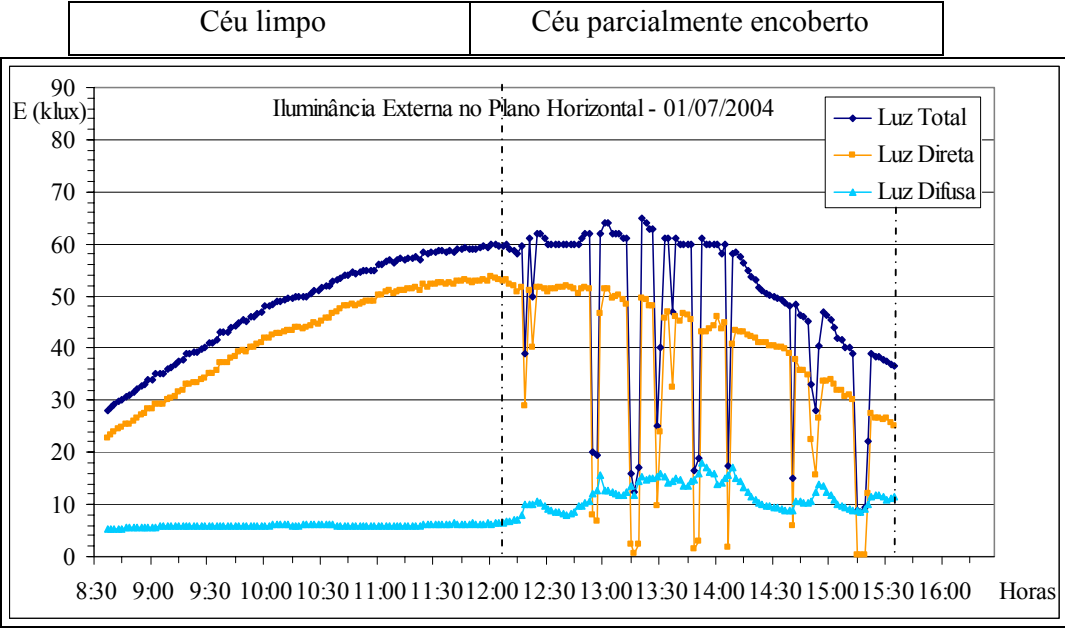


Figura 4.6: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 01/07/04.

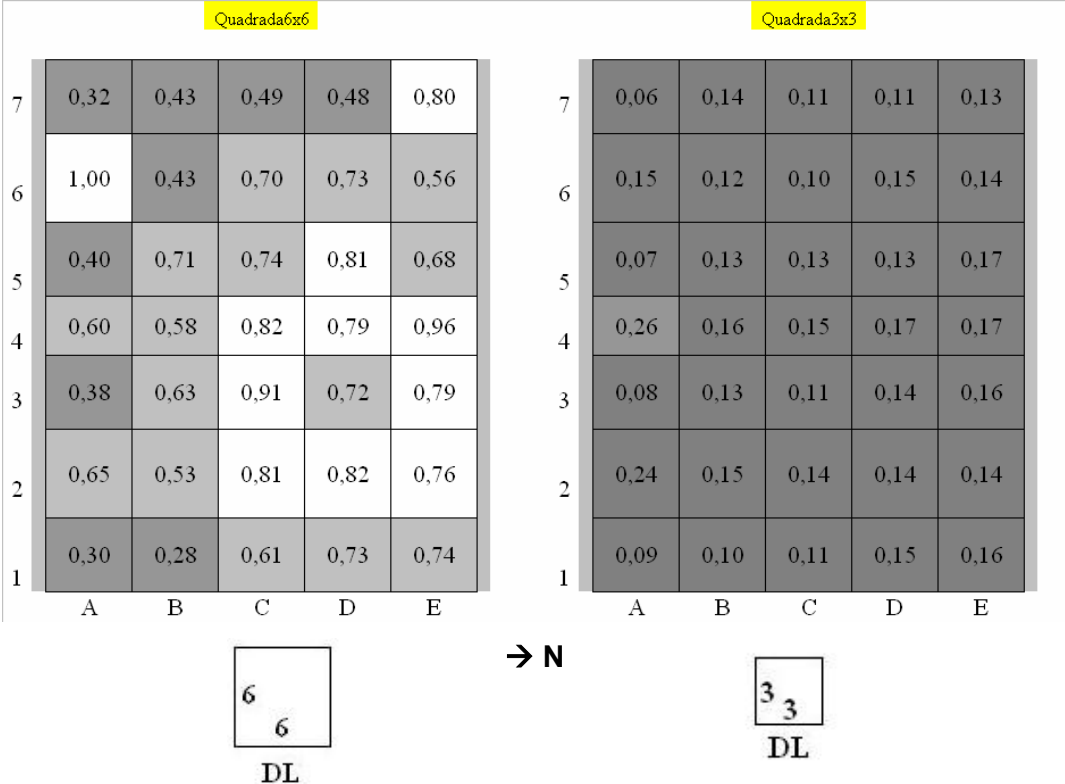


Figura 4.7: FLT registrados com DLs de mesma altura e seções 6x6 e 3x3.

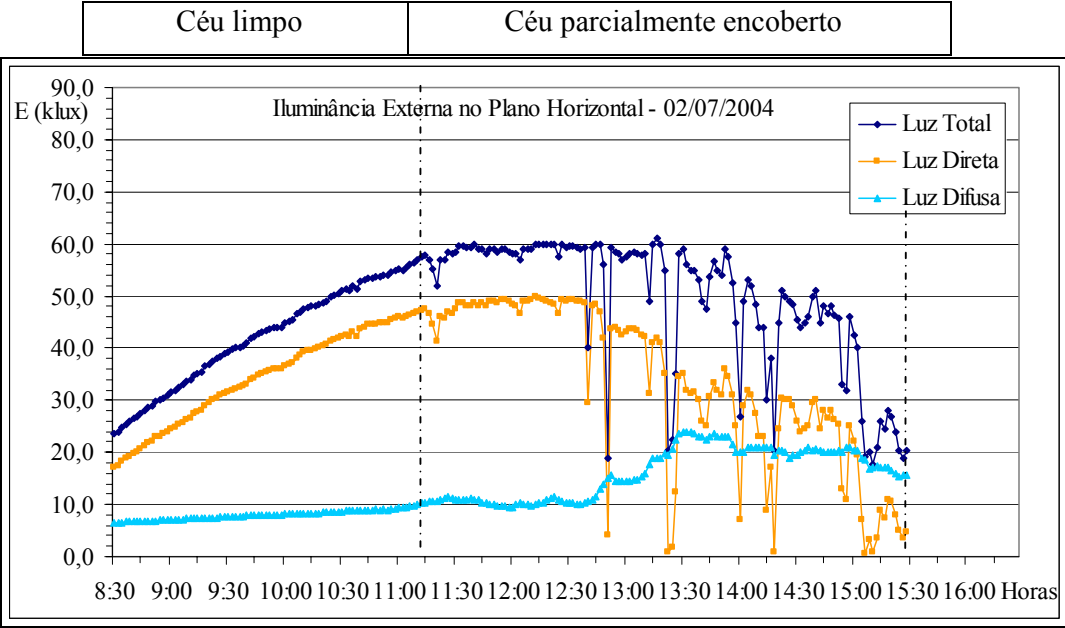


Figura 4.8: Iluminância externa no plano horizontal, registrada em 02/07/04.

4.2 MEDIÇÕES PARA ESCOLHA DO MATERIAL DIFUSOR

O vidro jateado não apresentou um bom comportamento no que diz respeito à distribuição da luz, o que é percebido pelo distanciamento entre as retas do difusor ideal e do vidro. Nota-se também, que os valores medidos em dias diferentes, para o vidro jateado, estão em lados distintos em relação à reta do difusor ideal (Figuras 4.9 e 4.10). Essa disparidade é devida ao fato de que, além do material não distribuir uniformemente a luz, as medições ocorreram em horários distintos. No dia oito, a medição ocorreu à tarde, entre 14h30min e 17h e, no dia onze, entre 8h e 13h. Portanto, a variação na posição do sol determinou a divergência entre a posição das retas. Houve uma diferença entre os níveis de iluminância nos dias mencionados, tanto para o vidro (mais perceptível, quando se comparam as Figuras 4.9 e 4.10) quanto para o acrílico, provavelmente, pelo mesmo motivo.

O acrílico leitoso proporcionou uma melhor distribuição, o que se verifica através da proximidade entre as retas do acrílico e do difusor ideal (ver Figuras 4.11 e 4.12). Entretanto, quando se comparam os níveis de iluminância obtidos com cada material, observa-se que o acrílico perde, absorvendo ou refletindo, grande parte da energia luminosa.

Continua a procura por um material que distribua uniformemente a luz e tenha menos perdas. Ao encontrar esse material, as seções dos dutos poderão ser consideravelmente reduzidas. Para a seqüência da pesquisa, utilizou-se acrílico leitoso, material disponível no mercado e que atende à exigência da distribuição uniforme da luz, embora com grande perda desta. Observa-se que a luz natural na região de São Carlos (SP) está disponível em grande quantidade, com altos níveis de iluminância, e por isso a perda de energia pelo acrílico leitoso não prejudicará a aplicação do DL para prover iluminação ao ambiente interno.

Também foi testada, como material difusor, uma película (*Insufilm* jateado branco) sem obter, no entanto, resultados significativamente melhores (ver Figuras 4.13 e 4.14).

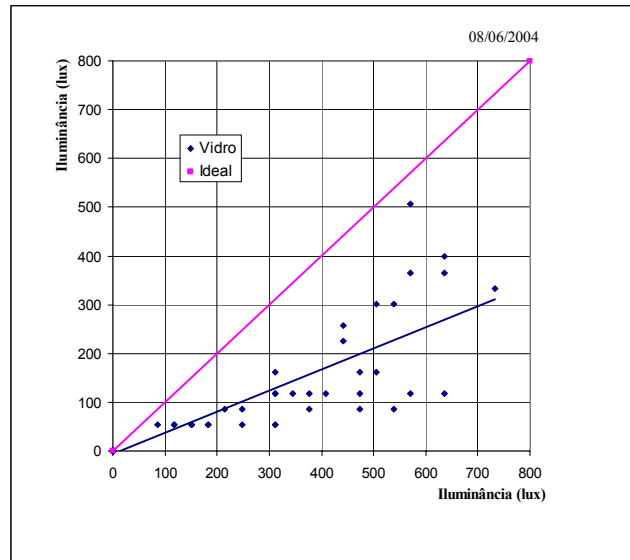


Figura 4.9: Gráfico comparativo entre difusor ideal e vidro jateado (dia 08/06/2004)

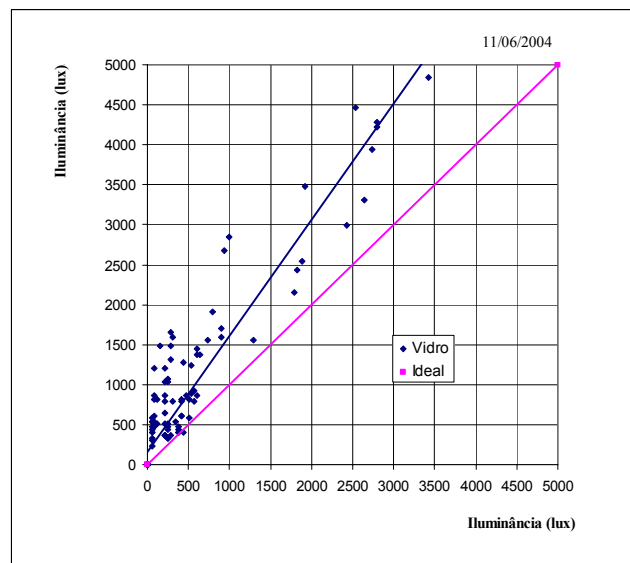


Figura 4.10: Gráfico comparativo entre difusor ideal e vidro jateado (dia 11/06/2004)

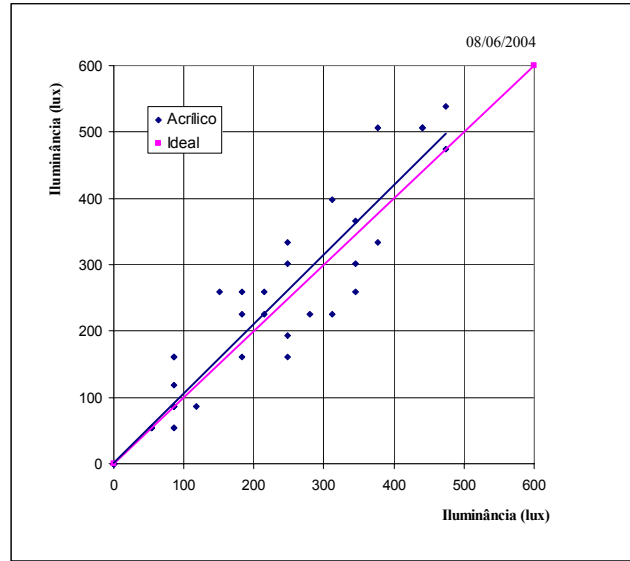


Figura 4.11: Gráfico comparativo entre difusor ideal e acrílico leitoso (dia 08/06/2004)

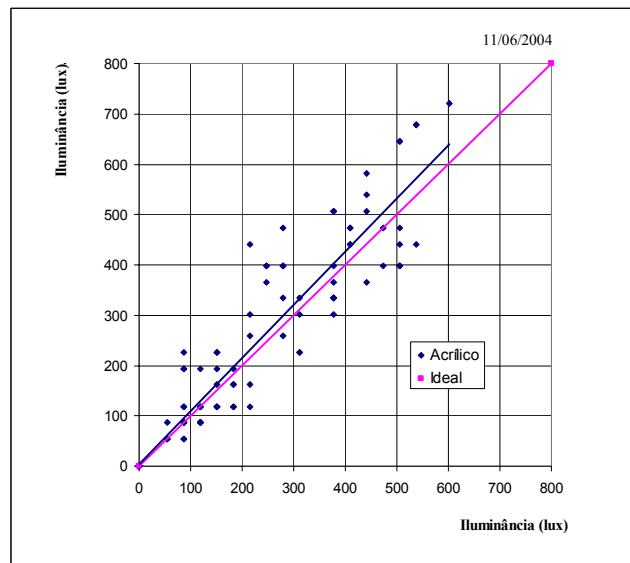


Figura 4.12: Gráfico comparativo entre difusor ideal e acrílico leitoso (dia 11/06/2004)

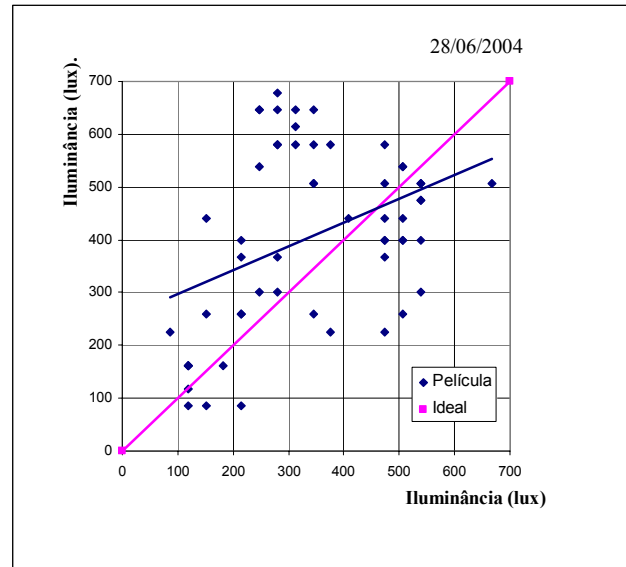


Figura 4.13: Gráfico comparativo entre difusor ideal e película (dia 28/06/2004)

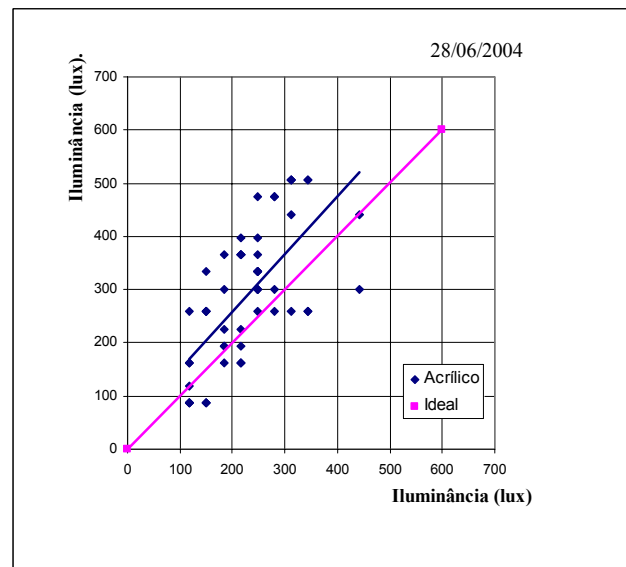


Figura 4.14: Gráfico comparativo entre difusor ideal e acrílico leitoso (dia 28/06/2004)

4.3 MEDIÇÕES COMPARATIVAS ENTRE DUTOS DE LUZ E JANELA

Pelos gráficos obtidos, vê-se que a iluminação fornecida pela abertura lateral não é suficiente para atender aos requisitos da norma nas regiões mais distantes da janela. Entretanto, com o uso do DL, o nível de iluminância passa a atender os requisitos da norma na maioria dos pontos. Em alguns casos, o nível de iluminância com o uso do DL foi cinco vezes maior. As retas horizontais, mostradas nos gráficos, representam os limites da norma.

Nos gráficos obtidos para os dias 02/12 e 06/12/2004 (Figuras 4.15 e 4.16), observa-se que o nível de iluminância aumenta, com o uso do DL, a partir do ponto 3. No dia 02/12, há um excesso de luz e o posicionamento do DL poderia ser melhorado. Já no dia 06/12 seria necessário um redimensionamento do sistema de iluminação natural – a janela e o próprio DL – visto que na maior parte dos pontos há um excesso de luz.

O uso do DL proporcionou maiores níveis de iluminância no dia 06/12 por que, neste dia, as nuvens não estavam na região do sol, ou seja, não encobriam o sol, permitindo a passagem da luz direta (Figura 4.18). No dia 02/12, as nuvens transitaram na região do sol diminuindo a passagem da luz direta (Figura 4.17).

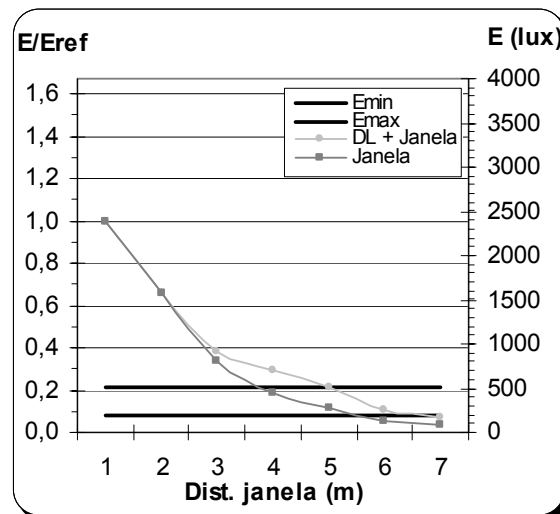


Figura 4.15: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 02/12/2004, 8 às 11h.

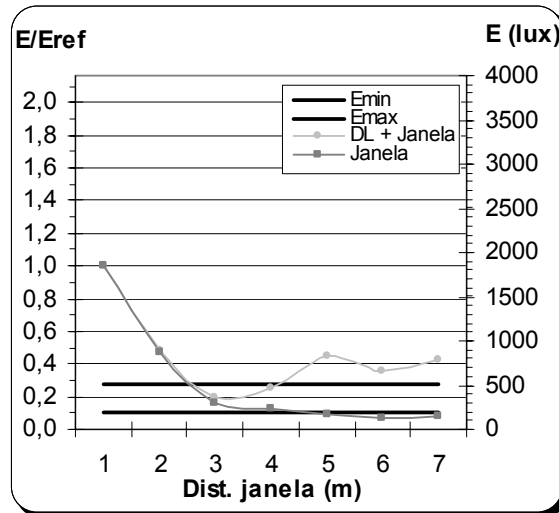


Figura 4.16: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 06/12/2004, 8 às 11h.

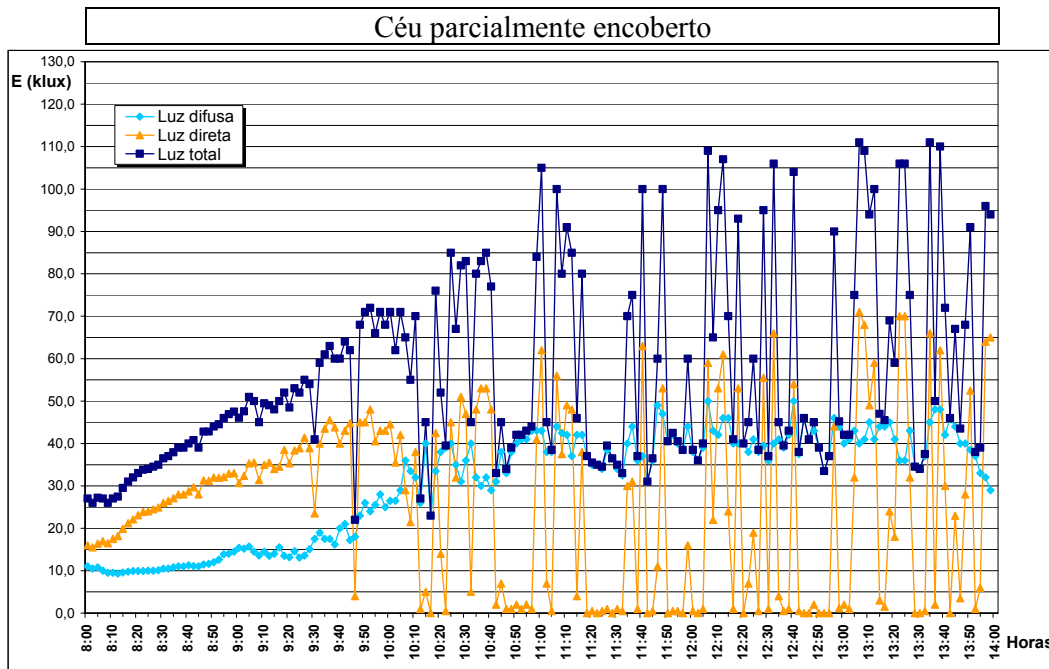


Figura 4.17: Iluminâncias externas no plano horizontal – 02/12/2004.

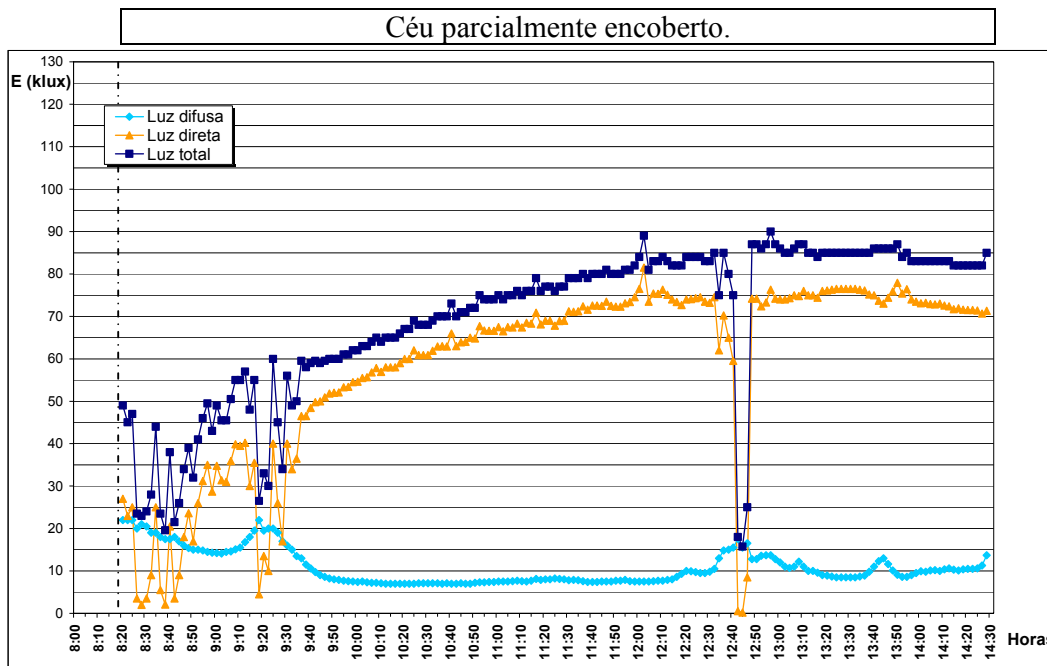


Figura 4.18: Iluminâncias externas no plano horizontal – 06/12/2004.

Pela análise dos gráficos do dia 13/01 (ver Figuras 4.19 e 4.20), observa-se que o nível de iluminância é melhorado, ao usar o DL, nos pontos 4, 5 e 6. No ponto 3, ao se somarem as iluminâncias devidas à janela e ao DL, pode haver luz em excesso, e no ponto 7, mesmo com o DL, a iluminação é insuficiente. Uma mudança na posição do DL, aproximando-o mais do fundo do ambiente, pode melhorar a iluminância nos pontos 3 e 7. Os diferentes níveis de iluminância (ver Figuras 4.19 e 4.20) devem-se ao movimento relativo do sol e às mudanças nas condições de céu, vistas na Figura 4.21.

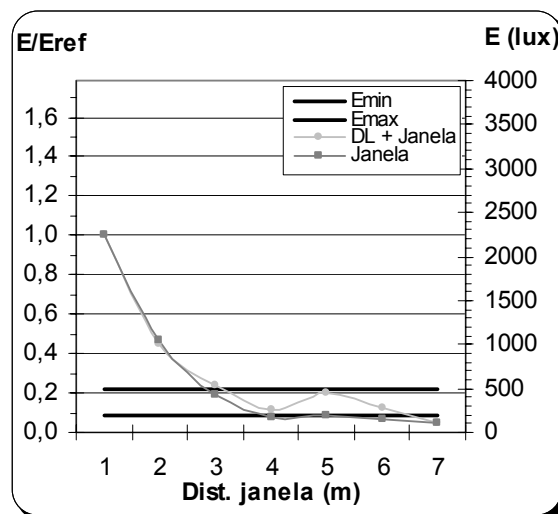


Figura 4.19: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 13/01/2005, 8 às 11h.

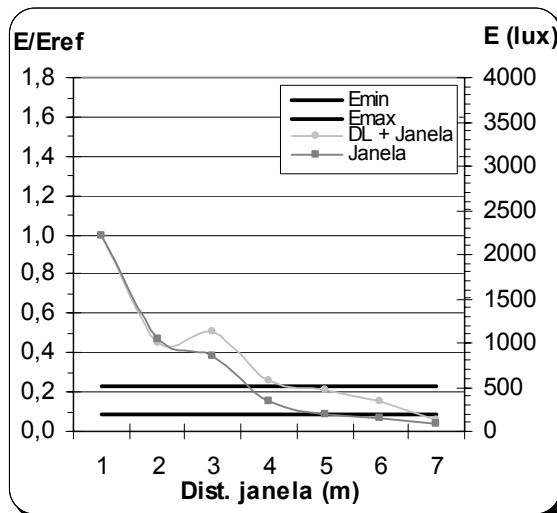


Figura 4.20: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 13/01/2005, 11 às 14h.

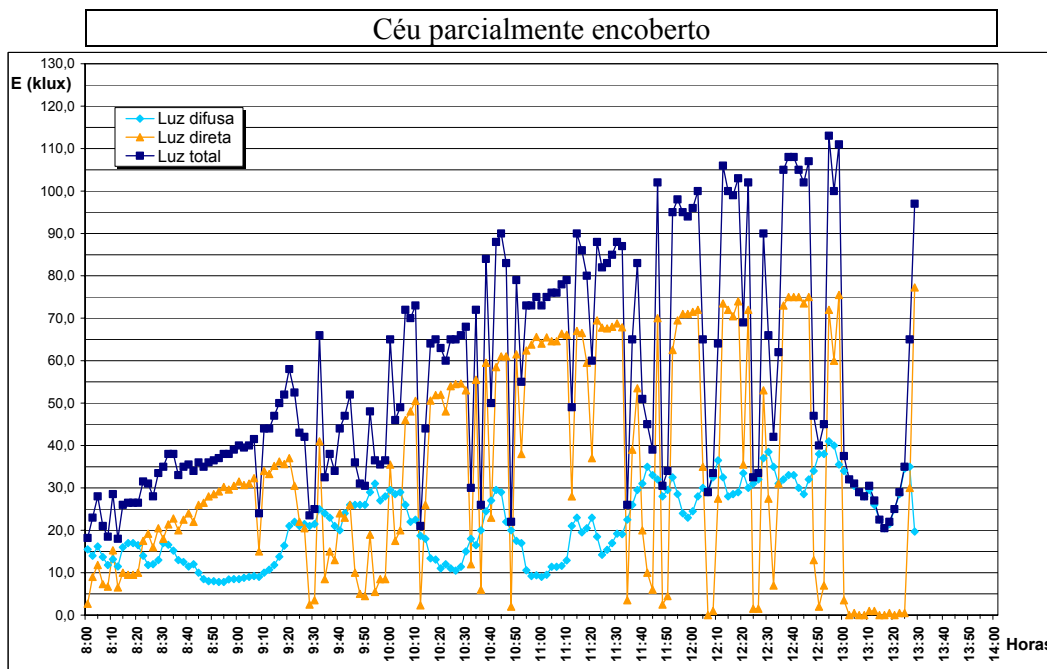


Figura 4.21: Iluminâncias externas no plano horizontal – 13/01/2005.

Nos gráficos do dia 31 (ver Figuras 4.22 e 4.23), vê-se que o nível de iluminância aumenta, com o uso do DL, na região entre os pontos 3 e 7. Com exceção do ponto 3, que já atendia aos requisitos da norma, nos outros pontos o uso do DL permitiu que se atingisse um nível adequado de iluminação.

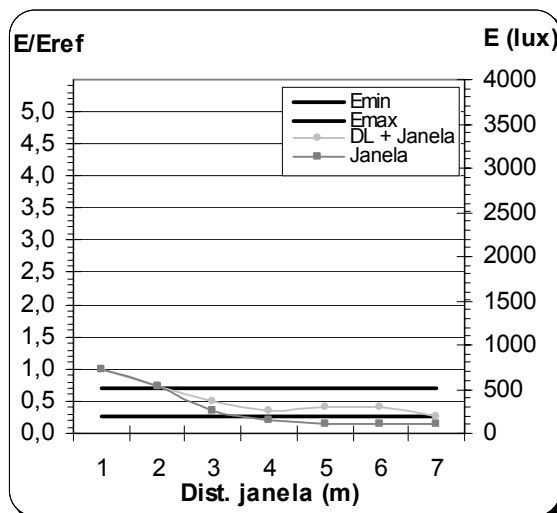


Figura 4.22: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 31/01/2005, 8 às 11h.

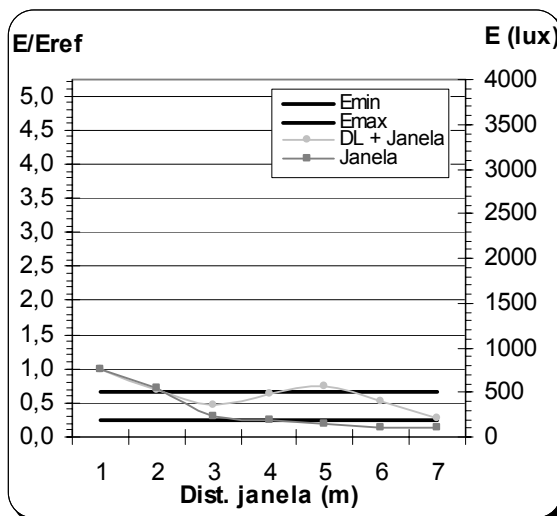


Figura 4.23: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 31/01/2005, 11 às 14h.

A diferença entre os níveis de iluminância num mesmo dia (ver Figuras 4.22 e 4.23) deve-se ao movimento relativo do sol. O céu apresentou-se limpo durante o período de medição (ver Figura 4.24).

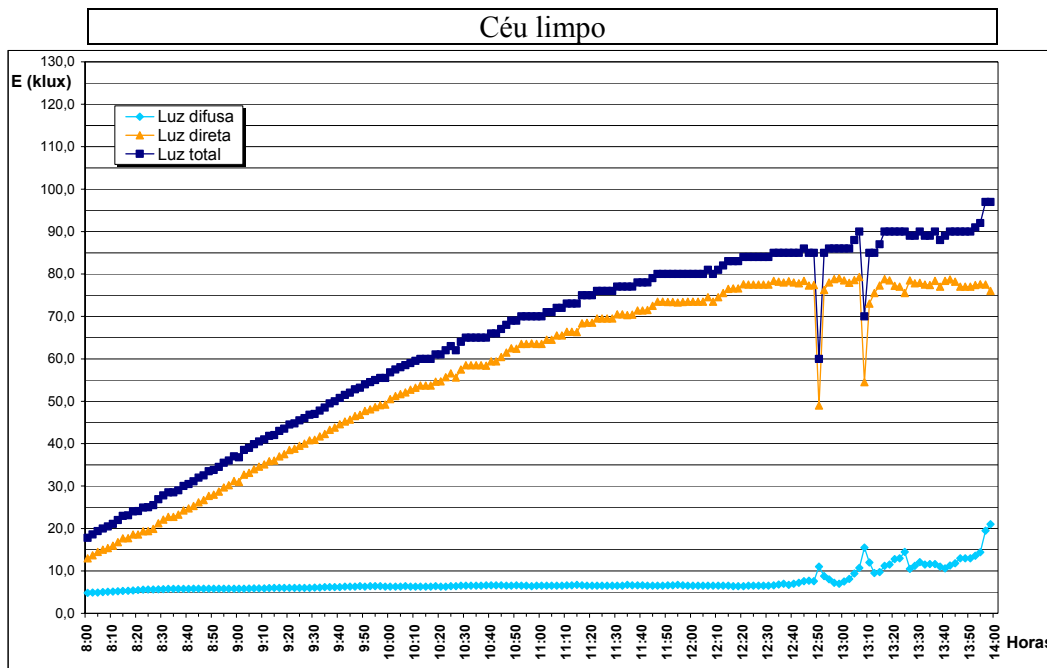


Figura 4.24: Iluminâncias externas no plano horizontal – 31/01/2005.

No dia 01/02, a iluminação através da janela foi insuficiente nos pontos 5 a 7 (ver Figura 4.25). Nesses pontos, o nível de iluminância, com o DL, passa a atender aos requisitos da norma. O céu estava limpo e o período de medição foi entre as 8h e 11h (ver Figura 4.26). Observa-se que no gráfico da Figura 4.26, a partir das 11h, não há dado algum. Isso se deve ao fato de que os gráficos de iluminância exterior de todos os dias foram representados com o mesmo intervalo nos eixos, para facilitar a comparação.

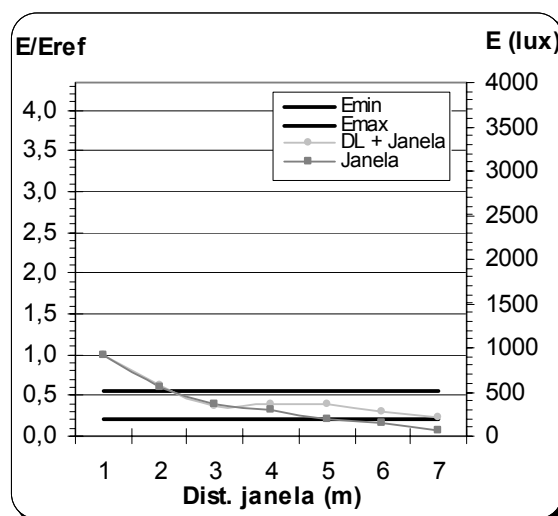


Figura 4.25: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 01/02/2005, 8 às 11h.

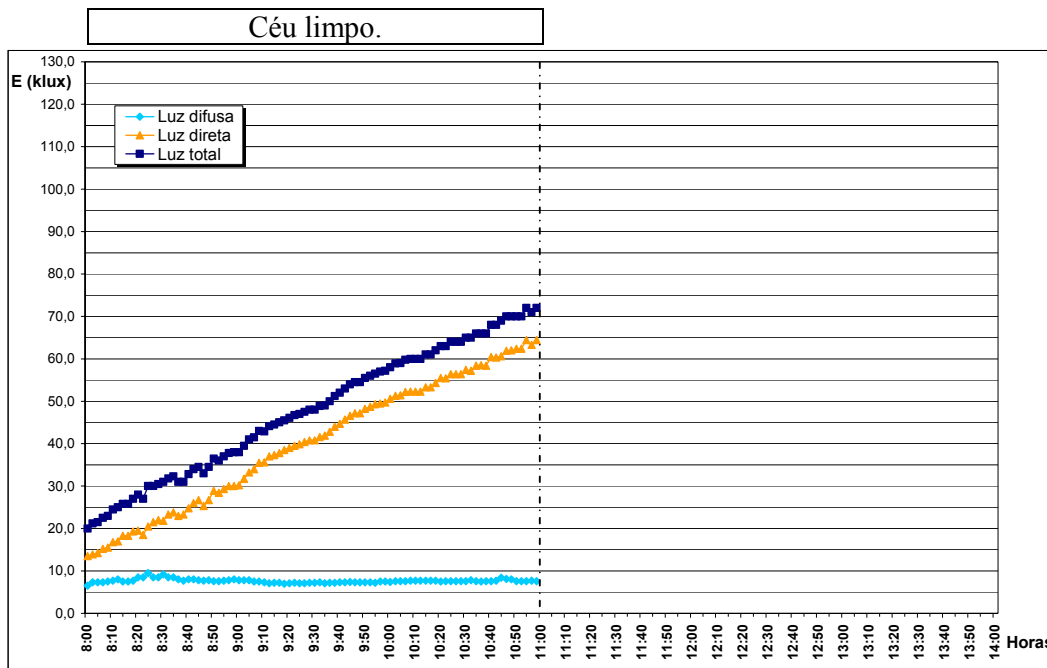


Figura 4.26: Iluminâncias externas no plano horizontal – 01/02/2005.

O dia 03/02 mostrou uma característica raramente encontrada nos dias de medição, o céu encoberto (ver Figura 4.29). A janela apresenta maior eficiência quando está sob esse tipo de céu, e isso pode trazer um excesso de luz nas regiões próximas à abertura lateral, o que é comprovado com os altos valores obtidos, principalmente, nos pontos 1, 2 e 3 (ver Figuras 4.27 e 4.28). Nesse caso, uma diminuição na área da janela e uma mudança na posição do DL podem melhorar a distribuição de iluminâncias.

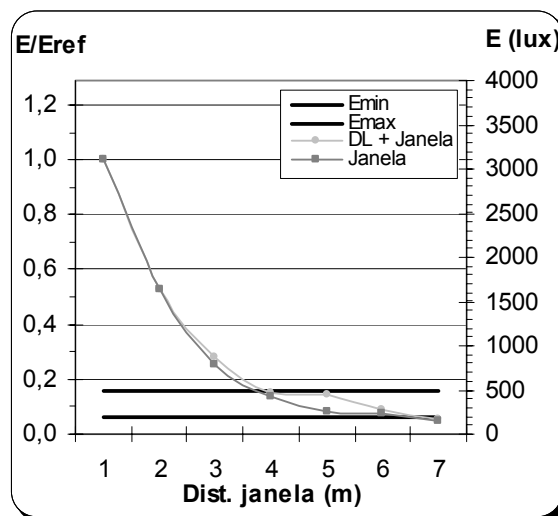


Figura 4.27: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 03/02/2005, 8 às 11h.

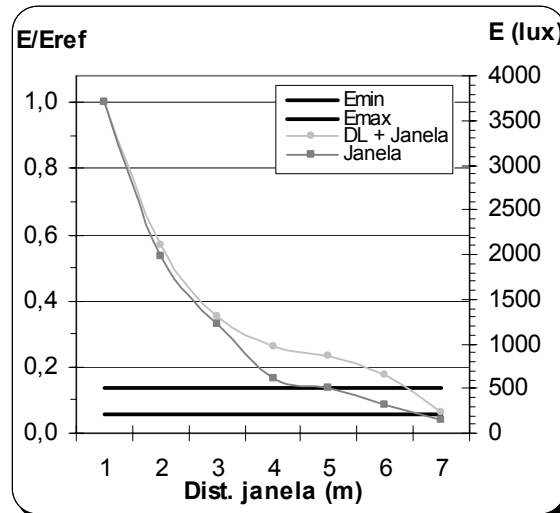


Figura 4.28: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 03/02/2005, 11 às 14h.

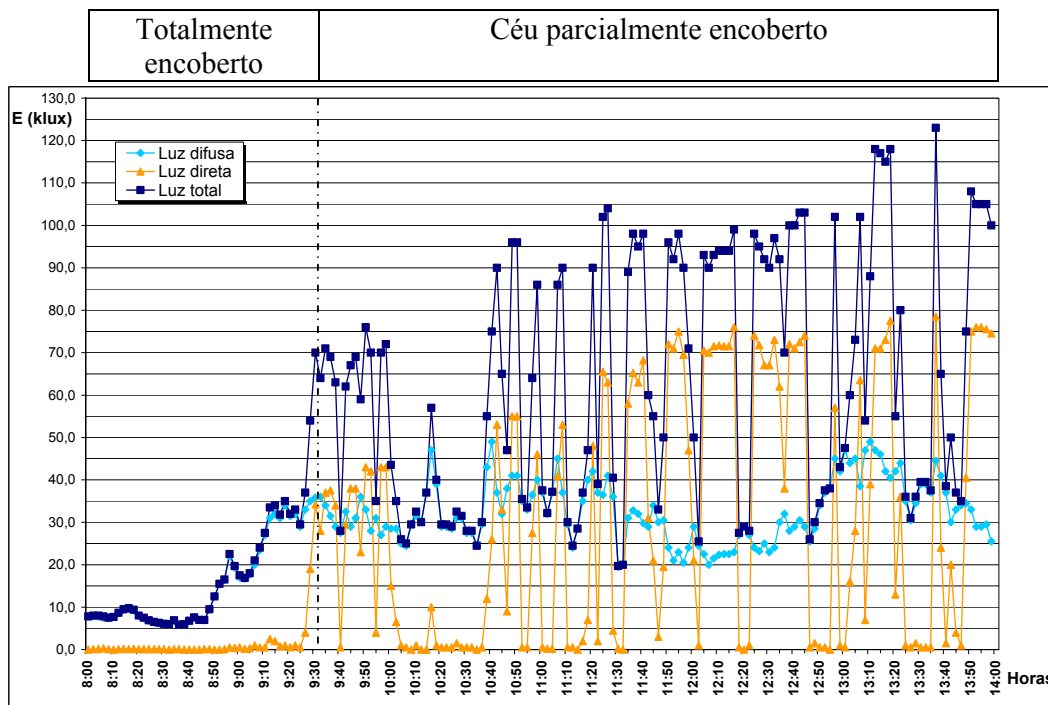


Figura 4.29: Iluminâncias externas no plano horizontal – 03/02/2005.

Os valores de iluminâncias obtidos nos dias 04 e 10/02 apresentam a mesma ordem de grandeza (ver Figuras 4.30 e 4.31) devido à condição de céu parcialmente encoberto, presente nos dois dias, até certo horário (dez horas). A partir desse horário, o céu fica limpo no dia dez e uma diferença nas iluminâncias internas é percebida nos pontos de 4 à 7, pois a medição nesses pontos ocorreu exatamente a partir do momento em que as condições de céu começam a diferenciar-se (ver Figuras 4.32 e 4.33). No dia

quatro, a posição de uso do DL não permitiu que este contribuisse de forma significativa na iluminação interna. Já no dia 10, a contribuição foi adequada e fez com que as iluminâncias nos pontos 5, 6 e 7 passassem a atender os níveis especificados na norma.

Como fora explicado para o gráfico da Figura 4.26, também os gráficos das Figuras 4.32 e 4.33 possuem uma região onde não há dado algum e isso se deve ao fato de que os gráficos de iluminância exterior de todos os dias foram representados com o mesmo intervalo tanto no eixo x quanto no eixo y, para facilitar uma possível comparação.

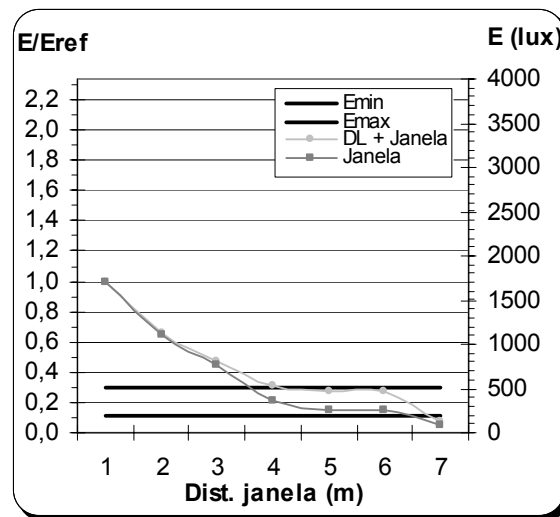


Figura 4.30: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 04/02/2005, 8 às 11h.

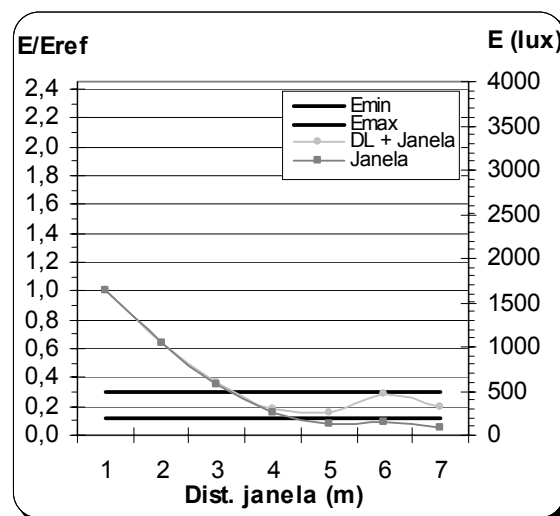


Figura 4.31: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 10/02/2005, 8 às 11h.

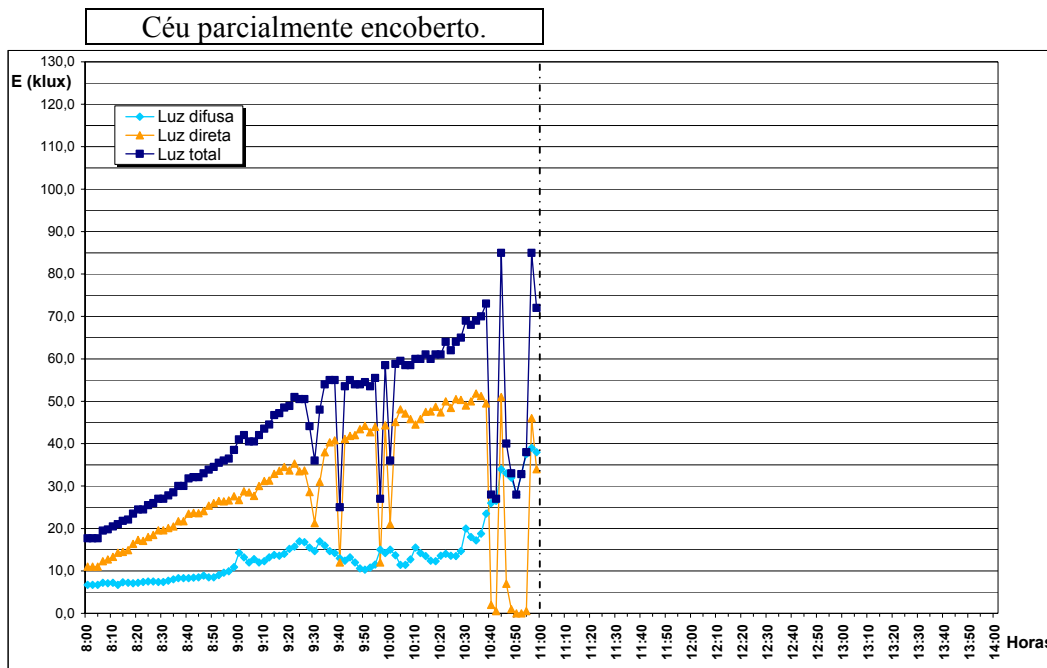


Figura 4.32: Iluminâncias externas no plano horizontal – 04/02/2005.

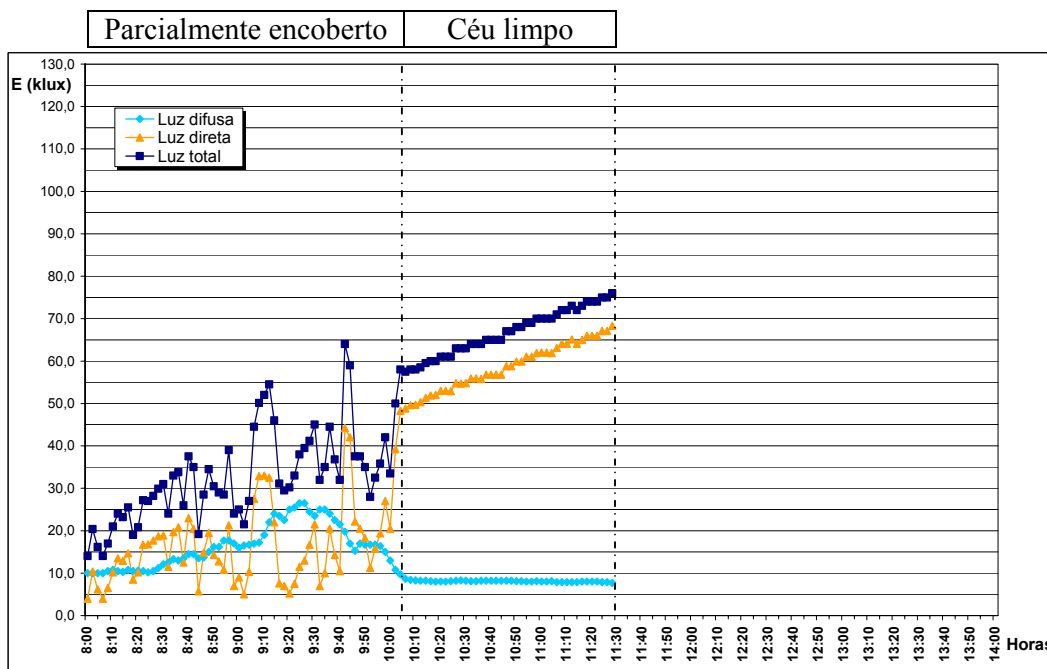


Figura 4.33: Iluminâncias externas no plano horizontal – 10/02/2005.

No dia 10, como o operário permaneceu na obra por mais tempo, as medições ocorreram durante um período um pouco maior do que nos dias 1 e 4/02.

Na Figura 4.33 vê-se que há uma clara diferença no comportamento do gráfico para distintas condições de céu.

No dia 11/02, nota-se que há uma diferença na ordem de grandeza das iluminâncias registradas nas duas medições (ver Figuras 4.34 e 4.35), o que ocorre pela influência das condições de céu (ver Figura 4.36). No período da segunda medição (10h30min às 13h30min), as nuvens que transitavam pela região do sol proporcionaram uma luz difusa com altos índices de iluminância e a iluminação lateral teve seu potencial ampliado. Esse aumento nos níveis de iluminância não é bom por que há um excesso de luz (mais de 3000 lux) nas regiões próximas à janela.

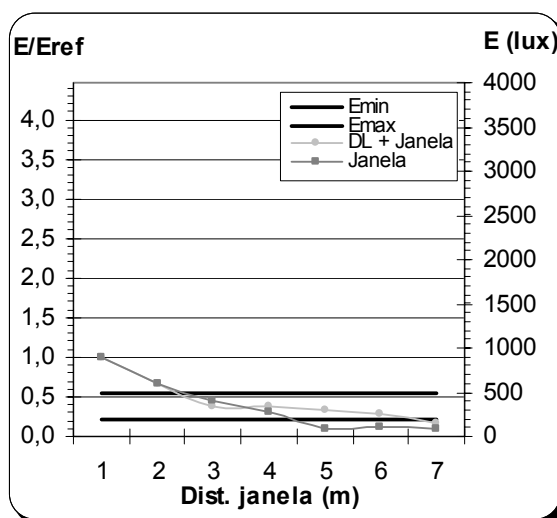


Figura 4.34: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 11/02/2005, 8 às 11h.

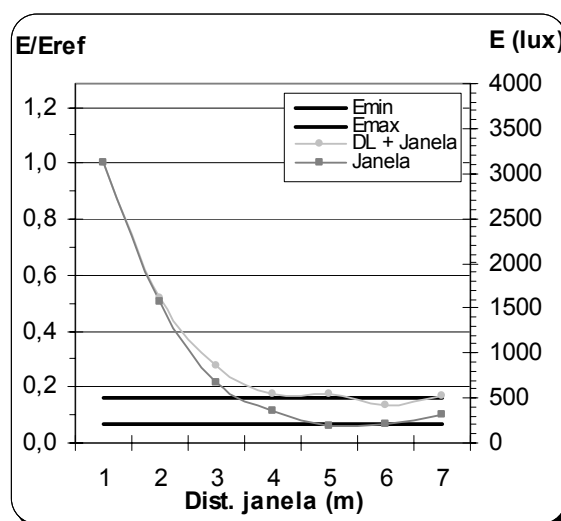


Figura 4.35: Níveis de iluminância em relação à distância da janela – 11/02/2005, 10h30min às 13h30min.

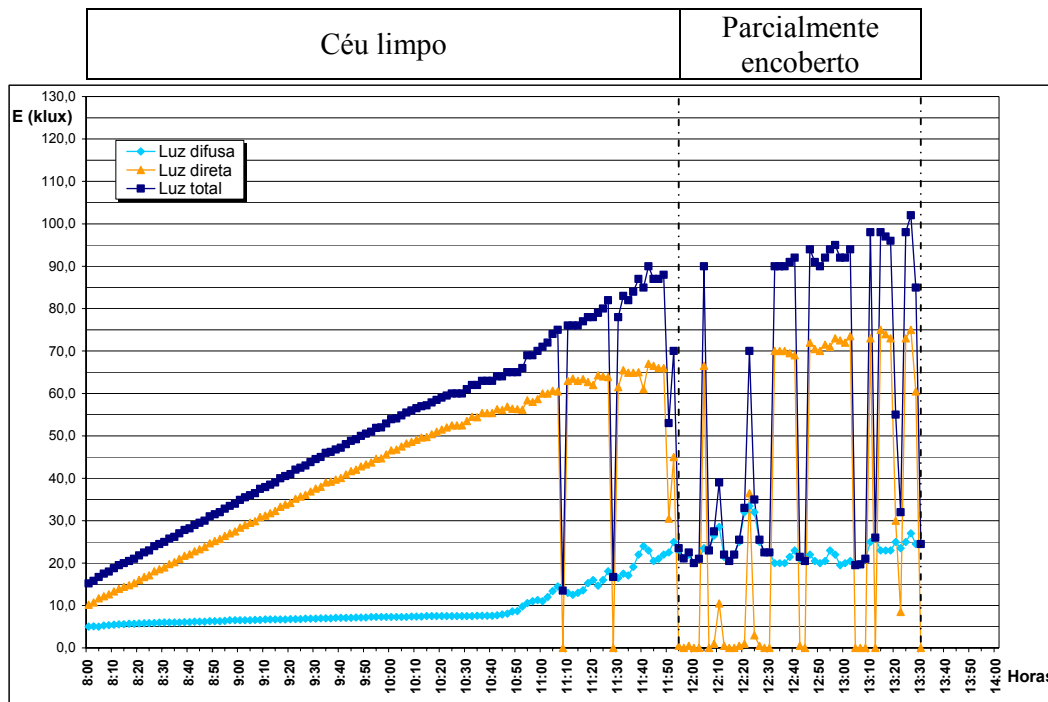


Figura 4.36: Iluminâncias externas no plano horizontal – 11/02/2005.

Observa-se que um sistema de iluminação natural composto por janela lateral e Duto de Luz pode ter um comportamento muito bom sob as diversas condições de céu, porque quando o céu está encoberto e o DL não capta a luz direta, a janela tem sua eficiência aumentada. Do mesmo modo, com o céu limpo, quando a eficiência da janela diminui o DL consegue captar a luz direta e proporcionar melhor iluminação ao ambiente.

Nota-se claramente, em todas as medições, que há um aumento dos níveis de iluminância nas regiões próximas ao DL. Esse aumento proporciona uma distribuição mais adequada da luz no ambiente, que pode ainda ser melhorada ao tornar a iluminação do fundo do ambiente menos dependente da janela e possibilitar, assim, a diminuição da abertura e, conseqüentemente, o ofuscamento.

Vê-se que o DL proporciona uma grande elevação do nível de iluminâncias aumentando, em alguns casos, em mais de 400% (dados em azul, na Tabela 4.1) a iluminância presente no ambiente.

Mesmo com a correção proposta nesse estudo, em certos pontos e horários a Tabela 4.1 mostra uma diminuição dos níveis de iluminância com o uso do DL. Essa diminuição (observada nos valores em vermelho, na Tabela 4.1) deve-se provavelmente

à movimentação das nuvens, que influencia nas condições de céu e na iluminação interna.

Tabela 4.1 – Acréscimo (em %) no nível de iluminâncias, devido ao uso do DL.

Distância da janela (m)		Datas								
		2/12/04	6/12/04	13/1/05	31/1/05	1/2/05	3/2/05	4/2/05	10/2/05	11/2/05
8:00 às 11:00	1									
	2	0,2	2,3	-3,7	0,3	4,3	0,8	0,8	-0,9	-0,3
	3	13,0	22,0	29,4	36,3	-6,5	10,5	4,5	5,2	-11,9
	4	58,8	98,2	45,9	68,9	22,5	7,6	48,1	13,9	25,6
	5	90,3	402,8	134,2	196,0	89,6	72,9	74,0	94,6	225,8
	6	81,4	404,3	90,0	195,5	100,8	16,6	81,6	220,9	148,3
	7	75,6	444,2	1,2	90,0	233,1	25,9	51,0	242,9	67,1
11:00 às 14:00	1									
	2	-	-	-3,7	-3,9	-	6,7	-	-	1,9
	3	-	-	31,0	46,6	-	6,4	-	-	28,7
	4	-	-	64,3	149,5	-	58,4	-	-	55,4
	5	-	-	136,9	263,0	-	72,2	-	-	200,2
	6	-	-	127,7	309,4	-	110,1	-	-	107,7
	7	-	-	64,4	102,7	-	49,9	-	-	67,1

CAPÍTULO 5

ANÁLISE TEÓRICA

5.1 ESTUDO TEÓRICO SIMPLIFICADO DO DUTO DE LUZ

A luz natural é composta por duas parcelas: a luz direta – provinda diretamente do sol, e a luz difusa – que provém do céu, resultante da refração dos raios de sol ao passar pelas nuvens ou da reflexão dos mesmos na abóbada celeste. Nas medições realizadas, a parcela da luz direta foi, em média, muito superior à difusa (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Médias das iluminâncias externas obtidas na cidade de São Carlos.

Data	Média das iluminância (lux)			%	
	Luz Total	Luz Direta	Luz Difusa	Luz Direta	Luz Difusa
04/05/04	48219	27947	20272	58,0	42,0
12/05/04	75952	68367	7585	90,0	10,0
27/05/04	72380	48887	23493	67,5	32,5
07/06/04	71860	63668	8192	88,6	11,4
11/06/04	73534	56962	16572	77,5	22,5
16/06/04	53009	45869	7140	86,5	13,5
18/06/04	46379	39452	6927	85,1	14,9
22/06/04	53281	36710	16571	68,9	31,1
23/06/04	48931	39907	9024	81,6	18,4
24/06/04	51301	37911	13391	73,9	26,1
29/06/04	52487	37287	15200	71,0	29,0
01/07/04	49521	43626	5894	88,1	11,9
02/07/04	48983	41085	7897	83,9	16,1
02/12/04	49804	28766	21039	57,8	42,2
06/12/04	53914	41588	12326	77,1	22,9
13/01/05	44647	27636	17011	61,9	38,1
31/01/05	45995	39975	6021	86,9	13,1
01/02/05	47737	40102	7634	84,0	16,0
03/02/05	33617	9664	23952	28,8	71,2
04/02/05	43811	36177	7634	82,6	17,4
10/02/05	42173	28336	13838	67,2	32,8
11/02/05	43240	36305	6935	84,0	16,0
Médias	52308	39828	12480	75,0	25,0

A luz direta atinge uma superfície com um certo ângulo de incidência, definido pela altura angular do sol e pela orientação da superfície, e a luz difusa atinge uma superfície com diferentes ângulos de incidência. Ao apreciar essas características, vê-se que, num estudo simplificado, é mais fácil trabalhar somente com a luz direta, e considerar a parcela difusa como uma porcentagem da direta, em função do tipo de céu.

Apesar da simplificação, o estudo tem sua importância, pois, em São Carlos, tem-se, na maior parte do ano, o céu alternando entre céu limpo e céu parcialmente encoberto, ou seja, a maior quantidade de energia é fornecida pela luz direta (Figuras 5.1 e 5.2).

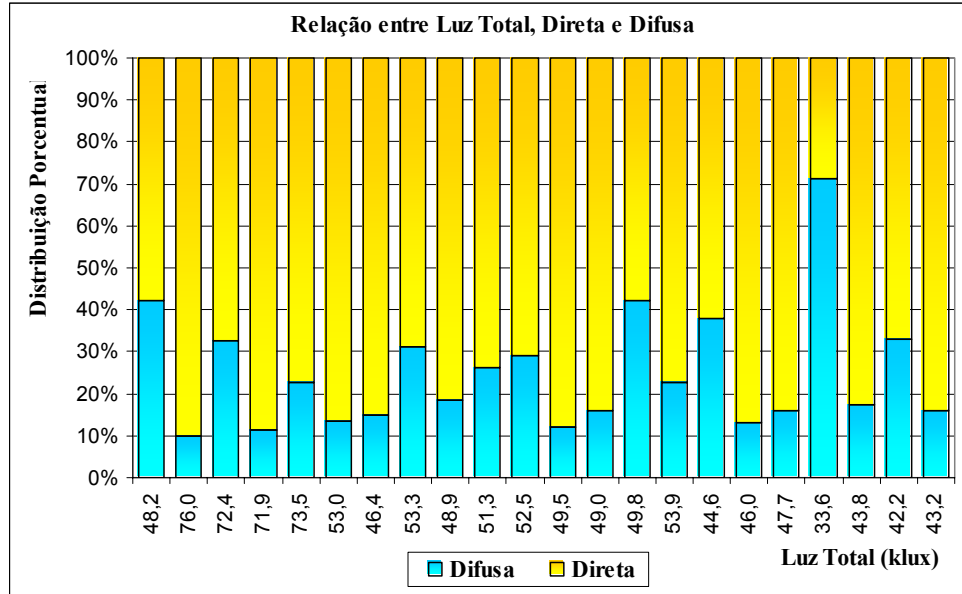


Figura 5.1: Distribuição percentual das parcelas direta e difusa da luz.

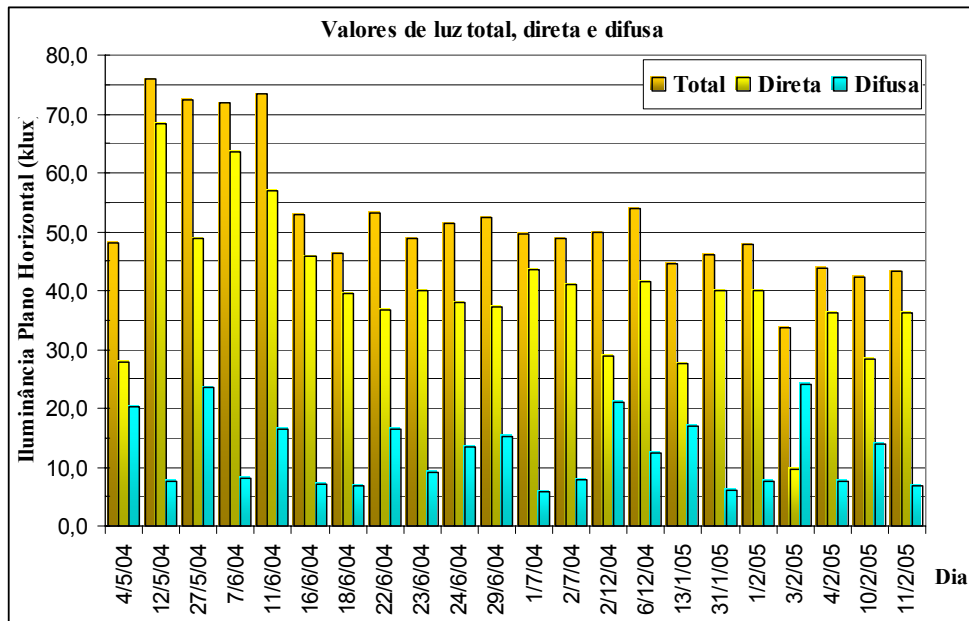


Figura 5.2: Iluminâncias externas obtidas para as parcelas direta, difusa e total da luz.

Na análise simplificada, ao considerar somente a luz direta, ao meio dia, quando o sol está com sua maior altura angular (que varia aproximadamente entre 45 e 90°, para a região), posição que fornece maior quantidade de energia a Terra, pôde-se ter uma idéia de certos aspectos que influenciam a captação e condução da luz através do DL.

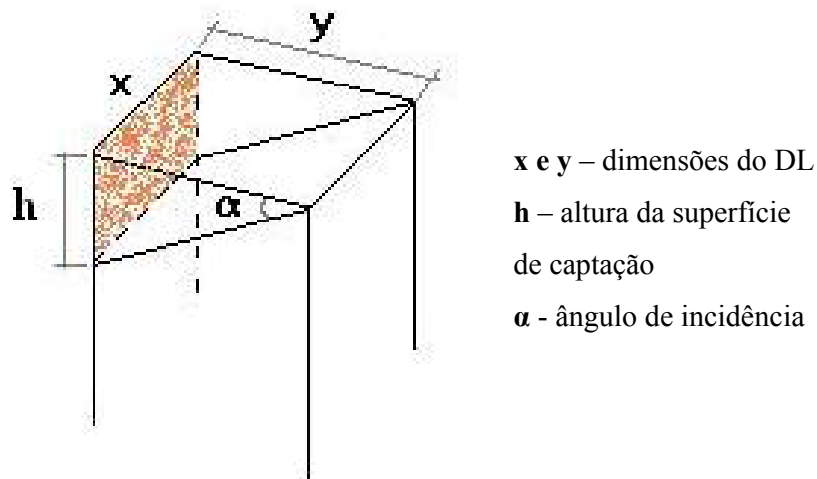


Figura 5.3: Modelo do duto para estudo teórico.

Ao observar a Figura 5.3, e sendo A_s a área da seção de dimensões x e y , α o ângulo de incidência, h a altura da superfície de captação no eixo leste-oeste, A_c a área de captação, tem-se que:

$$\begin{aligned}
 A_c &= h \cdot x, & h &= y \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \\
 A_c &= y \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot x \\
 A_c &= (x \cdot y) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)
 \end{aligned}$$

$$A_c = A_s \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$$

[Eq. 5.1]

Pela Equação 5.1, nota-se que a quantidade de luz recebida depende da área da seção do DL e do ângulo de incidência dos raios solares. Portanto, não varia entre DLs com seções diferentes de mesma área. Entretanto, o caminho percorrido pelo raio até chegar à saída do duto (ponto de entrada da luz no ambiente) depende do ângulo de incidência e da geometria do duto, como se mostra na Figura 5.4. Assim sendo, apesar de dutos de

geometrias diferentes receberem a mesma quantidade de energia se tiverem a mesma área, cada geometria pode resultar num caminho distinto do raio, com maior ou menor número de reflexões. A partir da Figura 5.4, percebe-se que ao dividir H por h tem-se o número de reflexões, conforme Equação 5.2.

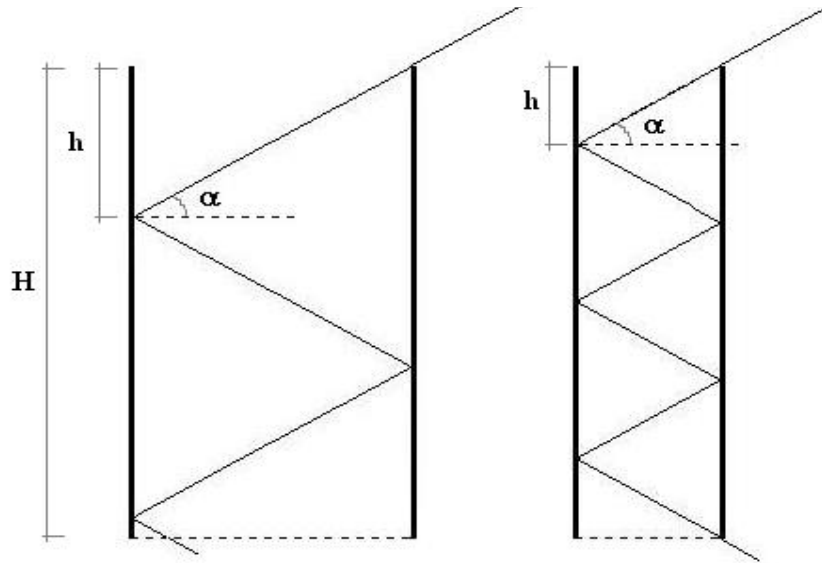


Figura 5.4: Caminho percorrido no duto por um raio solar.

$$NR = (H/h)$$

[Eq. 5.2]

Onde NR representa o número de reflexões e H, a altura do duto.

O número de reflexões, juntamente com a refletância da superfície interna, é o fator que determina a quantidade de energia que chegará ao final do duto. A variação entre a energia que atinge o duto (E_o) e a energia que chega ao final do mesmo, pode ser definida pela Equação 5.3.

$$E/E_o = \text{Ref}^{NR}$$

[Eq. 5.3]

Onde E é a energia na saída do DL; E_o é a energia inicial que chega ao duto; e Ref é a refletância das superfícies internas do duto.

As equações encontradas até aqui apresentam falhas. A primeira falha identificada foi a existência de valores de energia total final (calculada com o auxílio

das equações) maiores que a energia inicial disponível (E_0). Isto não é possível por que, mesmo que não haja reflexão alguma, a energia final é sempre menor ou igual à energia inicial. Para corrigir o erro, fez-se necessário o uso de uma equação diferente no caso de haver uma parcela da energia que chega diretamente à saída do DL, sem ser refletida.

Outro erro, causado pela simplificação do estudo inicial, é que não foi considerado que, para uma área de captação, pode haver parcelas de energia com números diferentes de reflexões (ver Figura 5.5).

Ao considerar a reflexão de um feixe de raios, e não mais de um raio isolado, tem-se que o número de reflexões pode não ser o mesmo para todos os raios. Deve-se separar a energia em duas parcelas, as quais terão, respectivamente, NR1 e NR2 como número de reflexões.

Quando a declinação do sol é tal que uma parte dos raios solares não sofre reflexão alguma, é necessário adequar a equação. A altura da superfície de captação (h) não pode ser maior que a altura do DL (H) e é essa situação (h maior que H) que indica que certa parcela dos raios não sofre reflexão e chega diretamente à saída do duto.

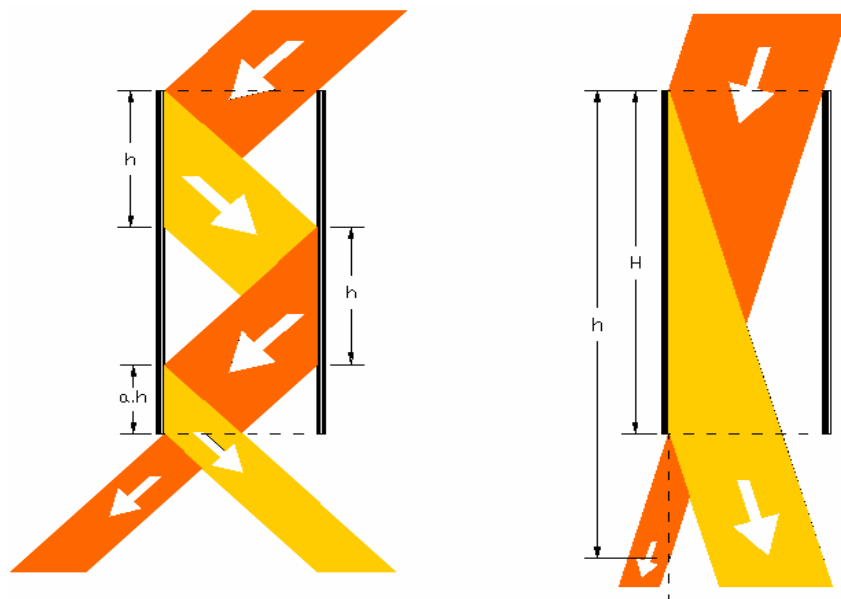


Figura 5.5: Caminho percorrido no duto pela luz direta.

Para atender às correções, ajustou-se a equação e se obteve o seguinte:

Para $h < H$, tem-se:

$$\rightarrow E/E_0 = a.\text{Ref}^{\text{NR1}} + b.\text{Ref}^{\text{NR2}}$$

[Eq. 5.4a]

Para $h > H$, tem-se:

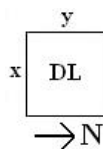
$$\rightarrow E/E_o = \text{Ref.}(H/h) + (h - H)/h \quad [\text{Eq. 5.4b}]$$

Onde NR1 o número inteiro de reflexões, arredondado para baixo; NR2 o número inteiro de reflexões arredondado para cima; b é a parte decimal do número exato de reflexões e; a é igual a 1 menos b.

Apresentam-se, nas planilhas das Tabelas 5.2 a 5.5, alguns cálculos da energia total. Utilizou-se refletância de 95% - referente ao espelho comum – e a iluminância externa disponível de 40000 lux, aproximadamente o valor obtido na Tabela 5.1.

Na Tabela 5.2, o ângulo de incidência é 45° , usa-se a mesma área do DL (0,36 m^2) e variam as dimensões. Quanto maior a dimensão y, maior é a energia total.

Tabela 5.2 – Cálculo da energia total na saída do DL. Área da seção = 0,36 e $\alpha=45^\circ$.



As (m^2)	x (m)	y (m)	H (m)	α ($^\circ$)	h (m)	Ac (m^2)	NR	E/Eo	Etotal (lux)
0,36	1,00	0,36	1,50	45	0,36	0,36	4,17	0,815	11631
-	0,90	0,40	-	-	0,40	0,36	3,75	0,815	11883
-	0,80	0,45	-	-	0,45	0,36	3,33	0,857	12140
-	0,70	0,51	-	-	0,51	0,36	2,92	0,857	12400
-	0,60	0,60	-	-	0,60	0,36	2,50	0,857	12671
-	0,50	0,72	-	-	0,72	0,36	2,08	0,903	12942
-	0,40	0,90	-	-	0,90	0,36	1,67	0,903	13224
-	0,30	1,20	-	-	1,20	0,36	1,25	0,950	13509
-	0,25	1,44	-	-	1,44	0,36	1,04	0,950	13652

A energia total, para uma área igual à metade da área do DL da Tabela 5.2, é apresentada na Tabela 5.3. Nota-se que a área tem grande influência na quantidade de energia que atinge a saída do duto. Isso ocorre, teoricamente, porque a diminuição da área do duto diminui a área de captação e aumenta o número de reflexões.

Tabela 5.3 – Cálculo da energia total na saída do DL. Área da seção = 0,18 e $\alpha=45^\circ$.

As (m ²)	x (m)	y (m)	H (m)	α (°)	H (m)	Ac (m ²)	NR	E/Eo	Etotal (lux)
0,18	1,00	0,18	1,50	45	0,18	0,18	8,33	0,663	4697
-	0,90	0,20	-	-	0,20	0,18	7,50	0,663	4902
-	0,80	0,23	-	-	0,23	0,18	6,67	0,698	5116
-	0,70	0,26	-	-	0,26	0,18	5,83	0,735	5339
-	0,60	0,30	-	-	0,30	0,18	5,00	0,774	5571
-	0,50	0,36	-	-	0,36	0,18	4,17	0,815	5816
-	0,40	0,45	-	-	0,45	0,18	3,33	0,857	6070
-	0,30	0,60	-	-	0,60	0,18	2,50	0,857	6336
-	0,25	0,72	-	-	0,72	0,18	2,08	0,903	6471

Os dados das Tabelas 5.2 e 5.3 estão reunidos na Figura 5.6, onde é possível observar que o comportamento das linhas aproxima-se de uma equação do segundo grau, que permite obter, com boa aproximação, uma equação da influência das dimensões do DL na condução da luz (ver Figura 5.6).

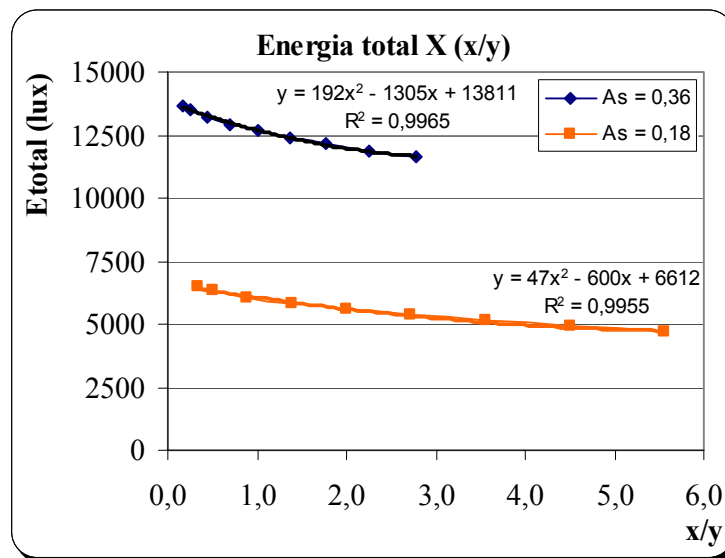


Figura 5.6: Energia Total em função da relação x/y, para áreas do DL de 0,18m² e 0,36 m².

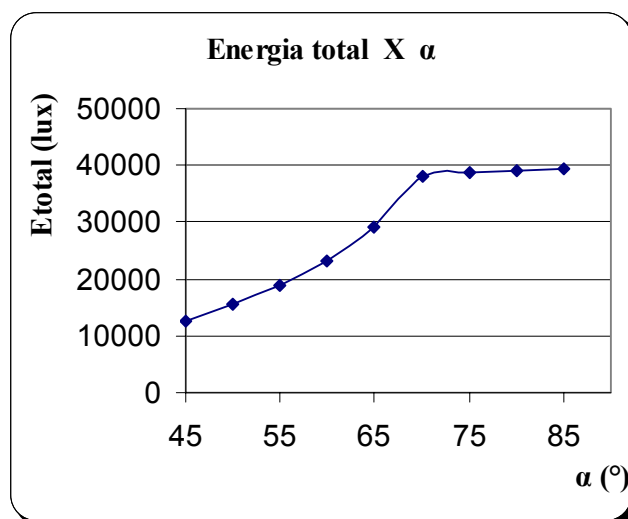
Pela Tabela 5.4, percebe-se que a energia total aumenta conforme aumenta o ângulo de incidência (ver Figura 5.7). Como já é sabido, o ângulo de incidência dos raios depende da altura angular do sol e da orientação do DL.

Tabela 5.4 – Cálculo da energia na saída do DL. Área da seção=0,36 e α variando.

As (m ²)	X (m)	y (m)	H (m)	α (°)	h (m)	Ac (m ²)	NR	E/Eo	Etotal (lux)
0,36	0,60	0,60	1,50	45	0,60	0,36	2,50	0,880	12671
-	-	-	-	50	0,72	0,43	2,10	0,898	15412
-	-	-	-	55	0,86	0,51	1,75	0,914	18804
-	-	-	-	60	1,04	0,62	1,44	0,929	23169
-	-	-	-	65	1,29	0,77	1,17	0,942	29094
-	-	-	-	70	1,65	0,99	0,91	0,954	38180
-	-	-	-	75	2,24	1,34	0,67	0,966	38660
-	-	-	-	80	3,40	2,04	0,44	0,978	39118
-	-	-	-	85	6,86	4,11	0,22	0,989	39563

Tabela 5.5 – Cálculo da energia na saída do DL. Área da seção=0,36 e H variando.

As (m ²)	x (m)	y (m)	H (m)	α (°)	h (m)	Ac (m ²)	NR	E/Eo	Etotal (lux)
0,36	0,60	0,60	1,50	45	1,20	0,36	2,50	0,880	12671
-	-	-	2,00	-	1,20	0,36	3,33	0,843	12140
-	-	-	2,50	-	1,20	0,36	4,17	0,808	11631
-	-	-	3,00	-	1,20	0,36	5,00	0,774	11142
-	-	-	3,50	-	1,20	0,36	5,83	0,741	10678
-	-	-	4,00	-	1,20	0,36	6,67	0,710	10232
-	-	-	4,50	-	1,20	0,36	7,50	0,681	9805
-	-	-	5,00	-	1,20	0,36	8,33	0,652	9394
-	-	-	5,50	-	1,20	0,36	9,17	0,625	9000

**Figura 5.7:** Energia Total em função de α .

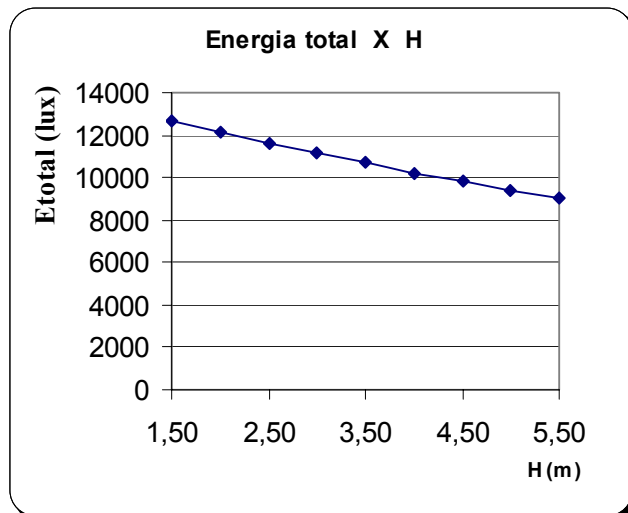


Figura 5.8: Energia em função da altura do DL.

Da Tabela 5.5 e Figura 5.8, observa-se a influência da altura (H) na energia total. A altura influencia no número das reflexões, que determina a perda de energia no DL.

Para melhor entender a influência do ângulo de incidência na energia transmitida no DL, fez-se este variar de 1 a 89°, e percebeu-se que o gráfico (Figura 5.9) tem uma mudança de comportamento quando α está próximo a 70° (para esta geometria de DL). Ao analisar a razão da mudança, chega-se à conclusão que essa ocorre quando uma parte da luz passa a não sofrer reflexão, e a perda de energia por reflexão é diminuída.

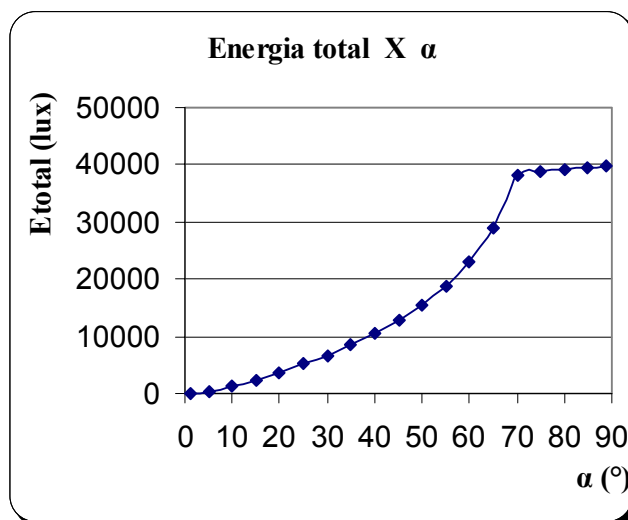


Figura 5.9: Energia total em função de α , para α variando de 1 a 89°.

Considerando as equações apresentadas, a influência da geometria do duto na quantidade de luz que chega ao ambiente interno aumenta conforme aumenta a declinação do sol. Uma maior declinação solar, resulta num menor ângulo de incidência e, portanto, num maior número de reflexões. Sendo assim, a geometria poderá contribuir para a redução do número de reflexões.

Para dutos de mesma área, a melhor opção seria, com as simplificações feitas, ter uma maior dimensão perpendicular ao eixo leste-oeste, o que diminuiria o número de reflexões e, conseqüentemente, a perda da energia luminosa.

Pode-se melhorar a captação da luz com o aumento da altura do DL em uma de suas faces, o que proporcionaria uma maior área de captação, ou com a utilização de elementos externos ao DL que redirecionem os raios solares e diminuam o número de reflexões (ver Figura 5.10).

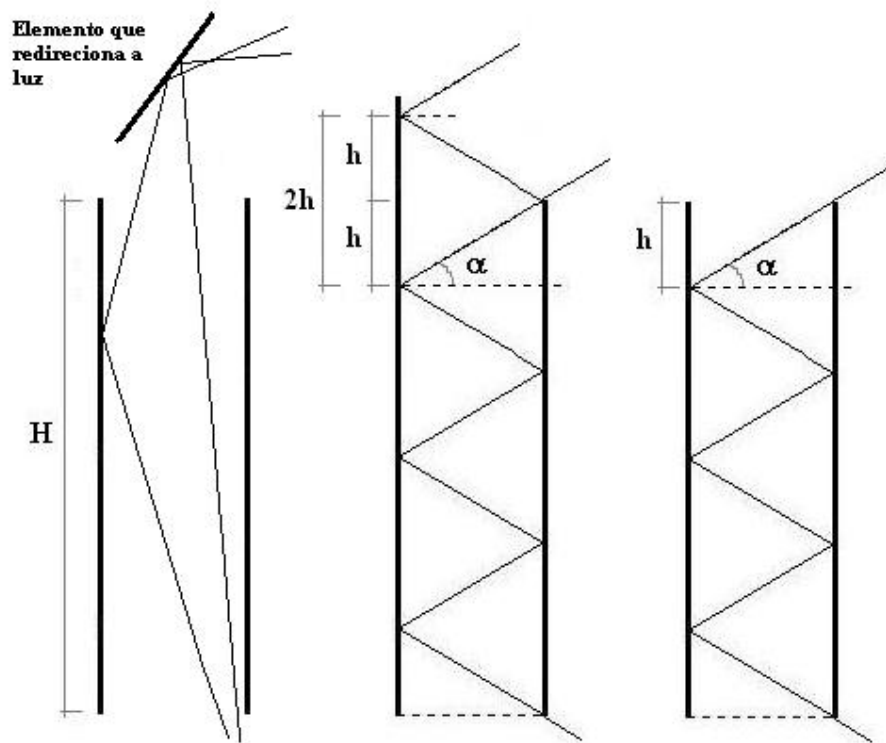


Figura 5.10: Técnicas que melhoram a captação e transmissão da luz no duto.

Quando se utilizam elementos para melhorar a captação, é necessário observar que o sol percorre diferentes regiões do céu em diferentes épocas do ano. Assim, estes

elementos devem ter uma flexibilidade quanto ao seu posicionamento para que se possa aproveitar da melhor maneira, em cada época, a luz natural.

Há a possibilidade ainda de se usar dois ou mais elementos simultaneamente. Por exemplo, podem-se usar os dois elementos mostrados na Figura 5.10, um para reduzir o número de reflexões e o outro para aumentar a área de captação.

5.2 – ANÁLISE DA PERSPECTIVA DE ECONOMIA DE ENERGIA

Ao assumir uma eficiência luminosa da luz natural de 100 lm/W, num ponto onde a iluminância é de 250 lux (lm/m²) a carga térmica será: 250 lm/m² / 100 lm/W = 2,50 W/m².

Fez-se esse cálculo para todos os pontos de medição, somente com a contribuição da janela e com o acréscimo devido ao duto.

Para um valor qualquer de iluminância, a carga térmica num ponto pode ser calculada conforme a equação 5.5.

$$\text{Carga térmica (W/m}^2\text{)} = \text{Iluminância (lm/m}^2\text{)} / \text{Ef. luminosa (lm/W)} \quad [\text{Eq. 5.5}]$$

Nos pontos onde a iluminação natural não supre a necessidade do ambiente, faz-se necessária uma complementação através de iluminação artificial. Desse modo, o acréscimo na carga térmica devido à iluminação elétrica pode ser calculado usando a eficiência luminosa das lâmpadas e a “quantidade” de iluminância necessária para que se atinja um nível adequado de iluminação (ver equação 5.6).

$$\text{Carga adicional (W/m}^2\text{)} = \Delta \text{Iluminância (lm/m}^2\text{)} / \text{Ef. Luminosa}_1 \text{ (lm/W)} \quad [\text{Eq. 5.6}]$$

Onde Δ Iluminância é a diferença entre a iluminância desejada e a iluminância medida, quando esta é menor que a desejada, e Ef. luminosa₁ é a eficiência luminosa das lâmpadas.

A carga térmica total introduzida no ambiente é encontrada através da soma entre a carga térmica proporcionada pela iluminação natural e a carga adicional produzida pelas lâmpadas, conforme equação 5.7.

$$\text{Carga total (W/m}^2\text{)} = \text{Carga térmica (W/m}^2\text{)} + \text{Carga adicional (W/m}^2\text{)} \quad [\text{Eq. 5.7}]$$

Por fim, para saber qual a variação da carga térmica devida ao uso do DL, calculam-se as cargas térmicas totais com o uso de janela e de janela mais DL. A diferença entre esses dois valores é a variação causada pelo uso do duto.

A economia com energia elétrica do acendimento das lâmpadas é encontrada ao se comparar as cargas adicionais com e sem o DL. A eficiência luminosa utilizada para as lâmpadas foi de 50 lm/W, que corresponde às lâmpadas incandescentes.

A variação final na carga térmica é a soma da variação causada pela carga térmica introduzida com o uso do DL e da variação resultante da diminuição do acendimento de lâmpadas. As planilhas de cálculo das variações na carga térmica estão apresentadas no ANEXO I.

Os resultados indicam uma diminuição da carga térmica, com o uso do DL, nos dias de céu limpo, como no dia 31/01/2005, no qual a redução total da carga térmica foi de 5,96 W/m². Nas Figuras 5.11 e 5.12, as colunas representam o aumento de carga térmica causado pelo DL e a diminuição causada pela redução do uso de lâmpadas. A linha vermelha mostra a variação total da carga térmica. Vê-se que, na maior parte dos pontos, no dia 31/01, há uma redução da carga térmica total introduzida no ambiente. Nestes dias, com uma menor eficiência da iluminação através da janela, seria necessário um maior número de lâmpadas acesas no ambiente. Por outro lado, o resultado no dia 03/02/2005 (ver Figuras 5.13 e 5.14), com céu encoberto, indica um aumento de 13,61 W/m² na carga térmica total provocado pelo uso do DL. Neste dia, percebe-se um aumento da carga térmica em quase todos os pontos, principalmente na medição realizada entre 8h e 11h. Em dias de céu encoberto a iluminação lateral é mais eficiente e o DL altera muito pouco o número de lâmpadas que precisam ser acesas. Um estudo mais detalhado do dimensionamento da janela e do posicionamento do duto pode melhorar a eficiência do sistema de iluminação natural.

Se o ambiente for artificialmente condicionado, um aumento na carga térmica significa aumento no consumo de energia. A variação no consumo de energia depende da potência do aparelho condicionador, da variação da carga térmica e do tempo que o aparelho permanece ligado para manter a temperatura desejada.

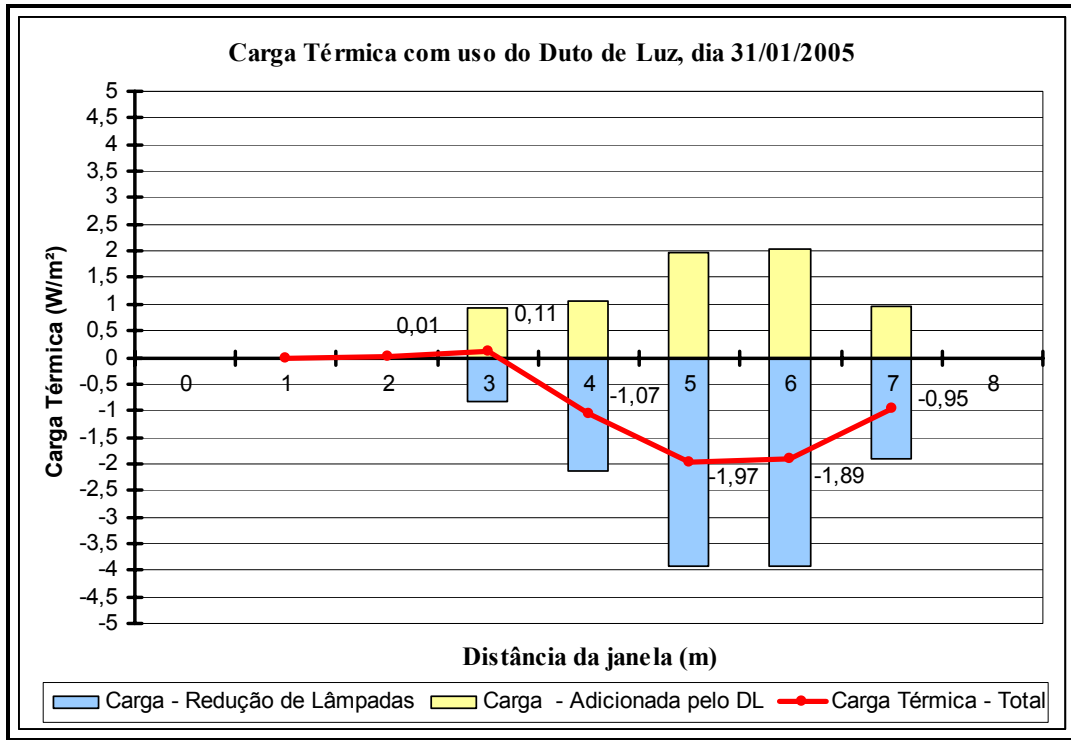


Figura 5.11: Variação da carga térmica com o uso do DL, 8h às 11h.

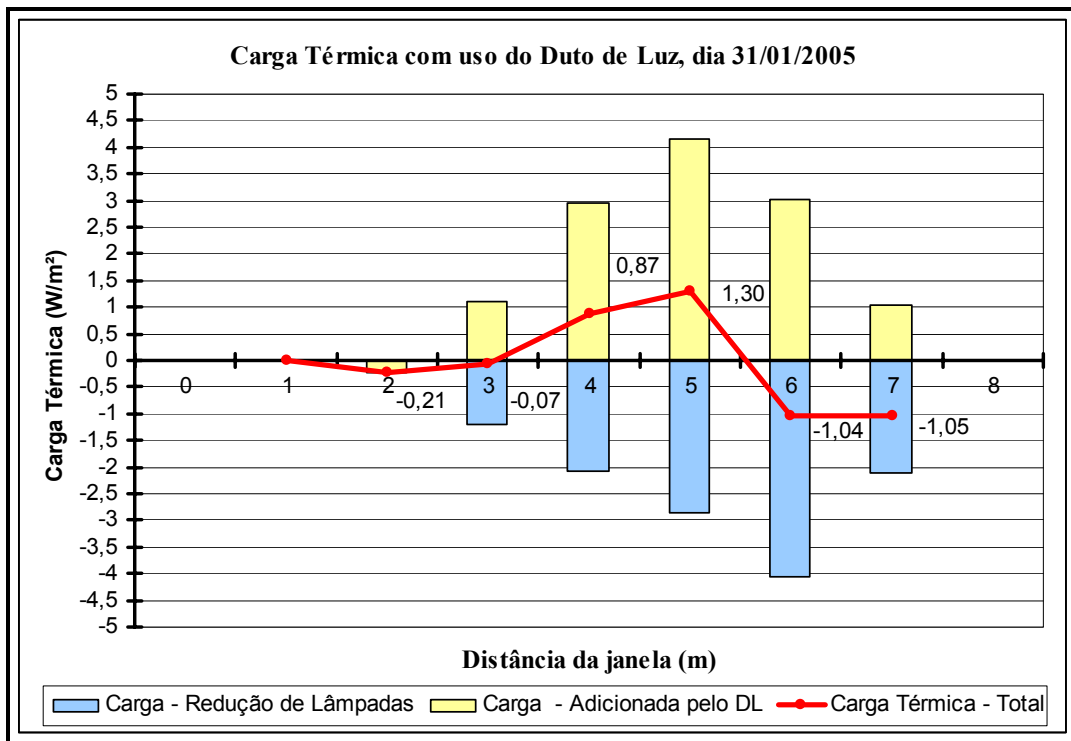


Figura 5.12: Variação da carga térmica com o uso do DL, 11h às 14h.

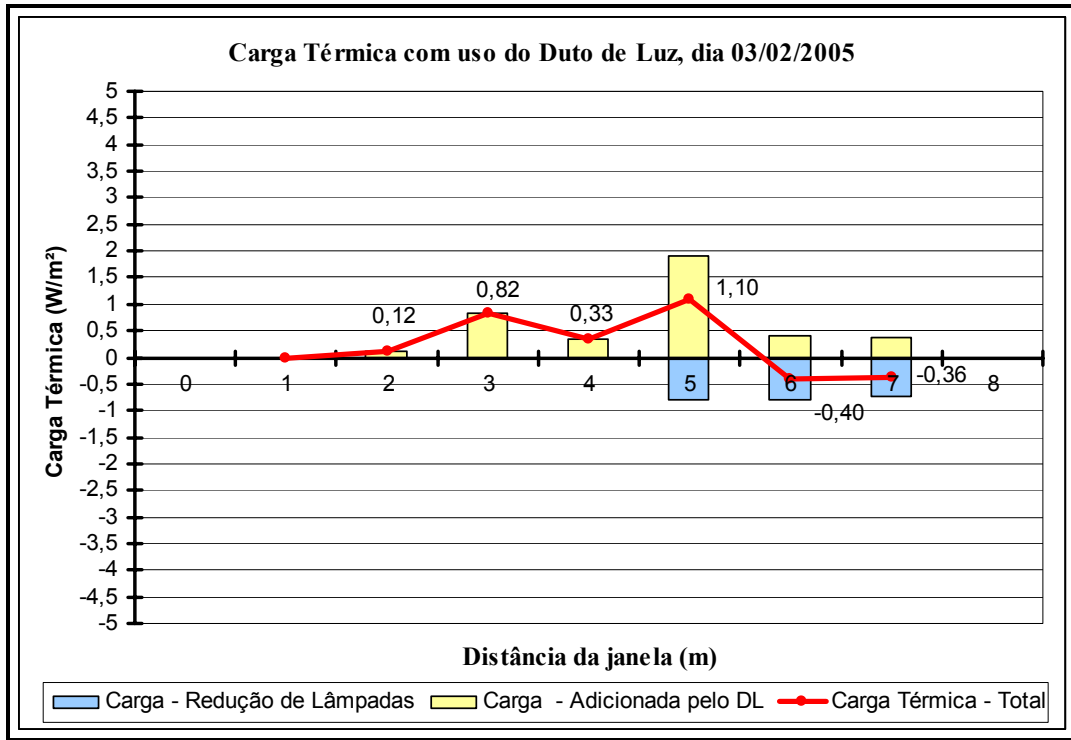


Figura 5.13: Variação da carga térmica com o uso do DL, 8h às 11h.

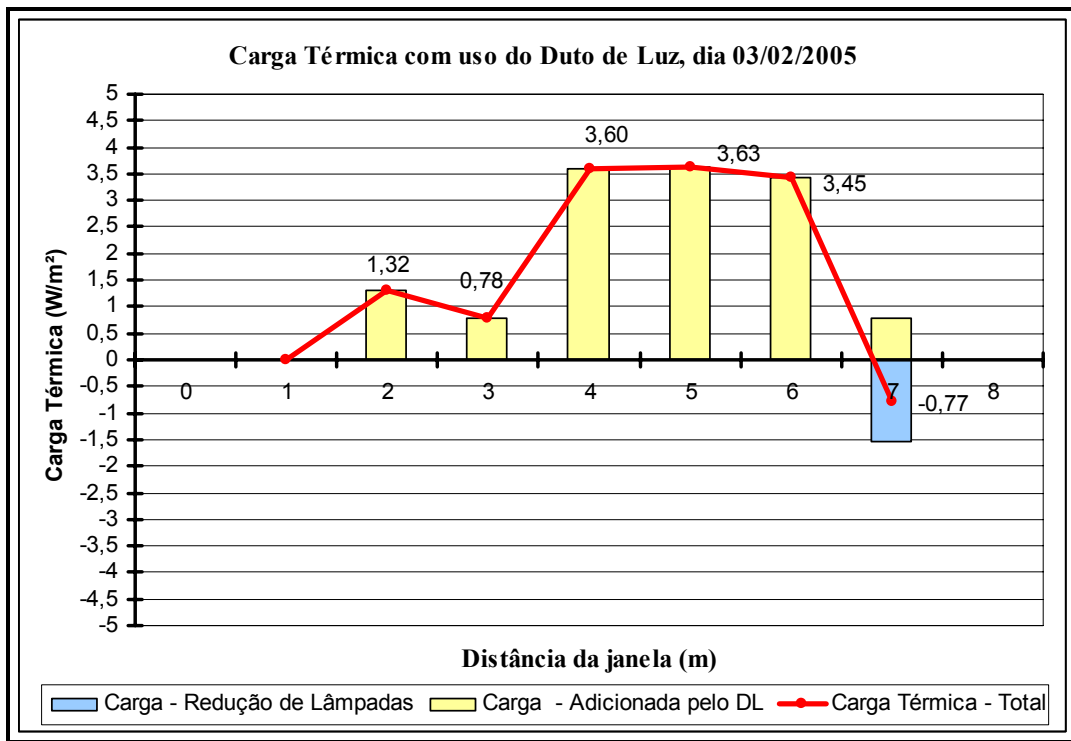


Figura 5.14: Variação da carga térmica com o uso do DL, 11h às 14h.

5.3 – CONDIÇÕES DE CÉU

Ao analisar as fotografias feitas durante as medições e os valores de iluminância medidos, podem ser observados certos aspectos com relação à validade de uma maneira diferente de classificar os tipos de céu.

Sugere-se aqui que o céu seja classificado através da proporção entre as iluminâncias devidas à luz difusa (E_{dif}) e luz total (E_{tot}). A vantagem de usar a classificação proposta é que o posicionamento das nuvens passa a ser considerado nas condições de céu registradas. Quando se classifica o céu através da percentagem de cobertura de nuvens, como o sugerido na norma brasileira, não se considera a posição dessas. Deste modo, uma certa quantidade de nuvens leva à mesma classificação do céu, mesmo que estas estejam posicionadas em diferentes regiões do céu e resultem em diferentes relações entre luz total, direta e difusa.

A relação entre a classificação pela cobertura de nuvens e a sugerida está na limpidez do céu, que é diretamente proporcional à quantidade de luz direta e inversamente proporcional à quantidade de luz difusa.

Quanto maior a quantidade e a espessura das nuvens no céu, mais encoberto ele estará e maior será a proporção de luz difusa em relação à total (E_{dif}/E_{tot}).

Ao observar as fotografias das Figuras 5.15 a 5.17, vê-se que a presença de nuvens influencia diretamente a relação E_{dif}/E_{tot} . Acredita-se que a região próxima ao sol seja de grande importância na definição da quantidade de cada parcela da luz e que, neste caso, para registrar as condições de céu através de fotos, estas devem ser do eixo Leste-Oeste, o qual o sol percorre em seu movimento relativo. Chegou-se a esta definição após fotografar-se o eixo Norte-Sul em vários dias de medição e não se observar uma relação entre as fotos e a proporção E_{dif}/E_{tot} , para esse eixo.

Infelizmente não foram obtidas fotografias do eixo Leste-Oeste em outros dias, para ilustrar melhor a relação entre a proporção E_{dif}/E_{tot} e a limpidez do céu. No entanto, a existência de uma relação é provável e pode ser vista ao analisar os gráficos das Figuras 5.18 e 5.19.






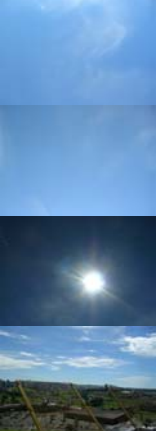
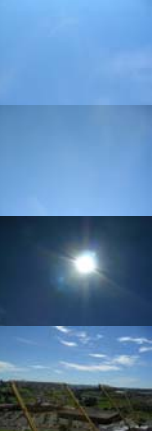
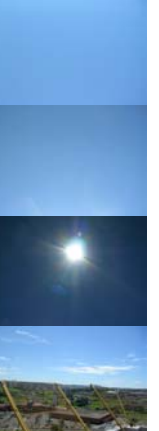
08h20min	08h30min	08h50min	09h10min
Edif = 22,0 klux Etot = 49,0 klux Edif/Etot = 0,45	Edif = 20,5 klux Etot = 24,0 klux Edif/Etot = 0,85	Edif = 15,0 klux Etot = 32,0 klux Edif/Etot = 0,47	Edif = 15,5 klux Etot = 55,0 klux Edif/Etot = 0,28
			
09h30min	09h50min	10h10min	10h30min
Edif = 16,0 klux Etot = 56,0 klux Edif/Etot = 0,29	Edif = 8,0 klux Etot = 60,0 klux Edif/Etot = 0,13	Edif = 7,1 klux Etot = 64,0 klux Edif/Etot = 0,11	Edif = 7,1 klux Etot = 68,0 klux Edif/Etot = 0,10
			

Figura 5.15: Fotos do céu, no eixo Leste-Oeste – 06/12/2004.

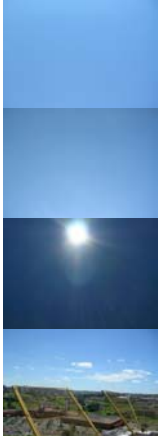

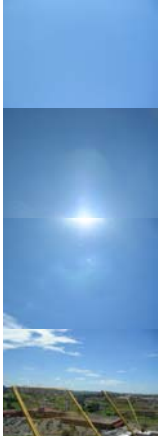
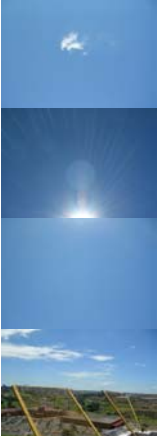
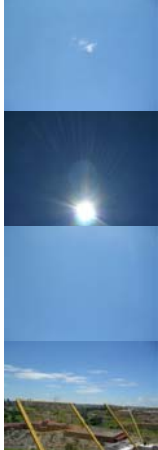
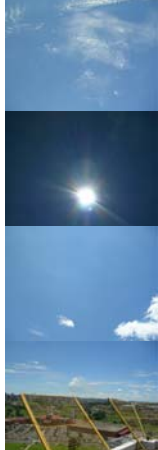

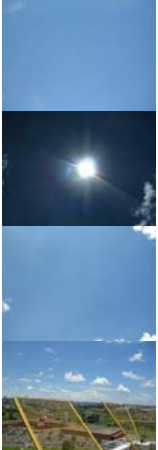
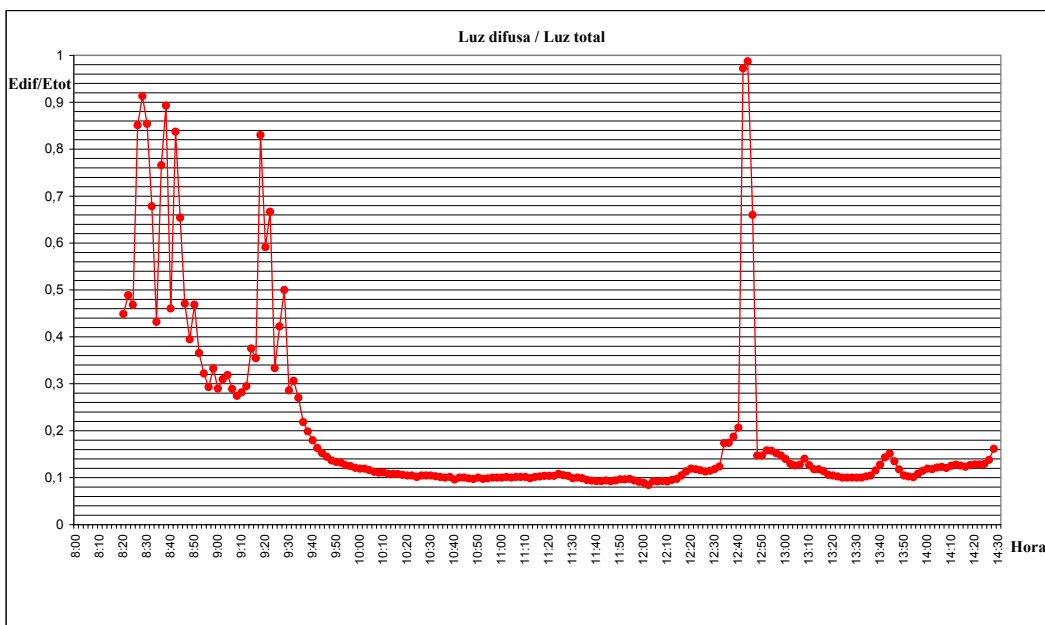
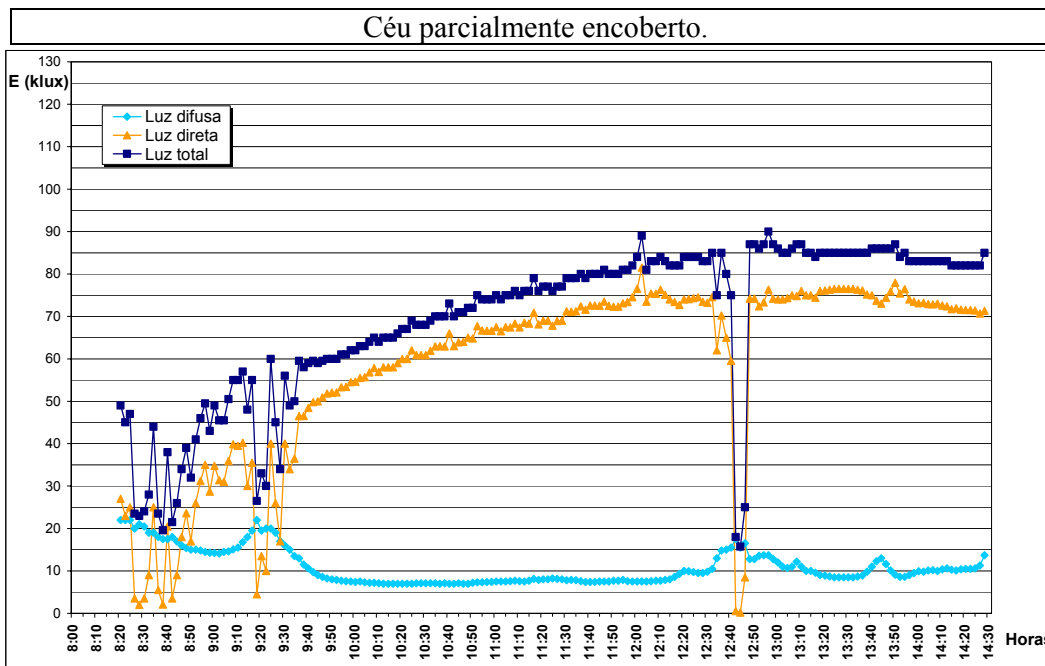
10h50min	11h10min	11h30min	11h50min
Edif = 7,2 klux Etot = 72,0 klux Edif/Etot = 0,10	Edif = 7,6 klux Etot = 75,0 klux Edif/Etot = 0,10	Edif = 7,8 klux Etot = 79,0 klux Edif/Etot = 0,10	Edif = 7,7 klux Etot = 80,0 klux Edif/Etot = 0,10
			
12h10min	12h30min	12h50min	13h10min
Edif = 7,7 klux Etot = 84,0 klux Edif/Etot = 0,09	Edif = 9,8 klux Etot = 83,0 klux Edif/Etot = 0,12	Edif = 12,8 klux Etot = 87,0 klux Edif/Etot = 0,15	Edif = 11,0 klux Etot = 87,0 klux Edif/Etot = 0,13
			

Figura 5.16: Fotos do céu, no eixo Leste-Oeste – 06/12/2004
(continuação).

Ao se observar a Figura 5.18, vê-se que no período entre 8h20min (início das medições) e 9h30min, o céu está mais encoberto que no restante do dia. Esse fato pode ser observado também pelo gráfico da Figura 5.19, lembrando que a limpidez do céu é inversamente proporcional à relação entre luz difusa e total (Edif/Etot). Pela observação das fotografias obtidas no momento inicial da medição (ver Figura 5.15), nota-se que realmente, neste horário, há um maior número de nuvens que encobrem o céu.



Não foi realizada uma análise mais profunda do método para registrar as condições do céu, visto que este tema foge ao escopo do presente trabalho, sendo, entretanto, interessante para um estudo de doutoramento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram realizadas medições comparativas entre DLs com diferentes características geométricas e superfícies internas de espelho comum. Também foram feitos testes para se encontrar um material difusor adequado. Para isto, foram analisados vidro jateado, acrílico leitoso e uma película. Em seguida, os desempenhos de sistemas de iluminação através de janela lateral e através de Dutos de Luz foram avaliados e comparados.

Paralelamente à análise experimental, fez-se um estudo teórico da condução da luz no duto, obtendo uma equação simplificada para o cálculo da energia transmitida. Para a avaliação da possível economia de energia, foi estimada a variação que ocorre na carga térmica quando o DL é adicionado ao sistema de iluminação natural. Por fim, foram discutidas as condições de céu encontradas nos dias de medição e a influência dessas na iluminação interna.

Atendendo às necessidades surgidas, certas questões foram incorporadas ao estudo. Para a investigação destas questões, foi necessária uma atualização bibliográfica. Dentre os assuntos discutidos estão o elemento difusor, o estudo teórico das reflexões no DL e as condições de clima e de céu.

Neste âmbito, apresentam-se, a seguir, as conclusões para os assuntos abordados nesta pesquisa.

Há uma extensa gama de materiais e arranjos que usam a geometria e as propriedades óticas conhecidas para resolver a questão da distribuição da luz. Não obstante, grande parte dessa tecnologia não é acessível, o que restringe sua aplicação nesta pesquisa. Assim, o elemento difusor utilizado foi o acrílico leitoso, por apresentar, dentre os materiais disponíveis, as características necessárias ao uso pretendido aliadas a um custo relativamente baixo.

Todos os materiais aplicados, tanto no difusor quanto no duto ou nas paredes, interferem no desempenho do sistema como um todo. Para o componente do sistema que transmite a luz (o duto propriamente dito), é necessário um estudo teórico baseado nas leis da reflexão, na geometria dos elementos, no movimento relativo do sol e nas condições de céu. O estudo simplificado foi realizado e se puderam obter algumas conclusões e fazer comparações com os dados experimentais.

As conclusões, acerca das características do DL e da iluminação no ambiente interno apresentadas aqui, são baseadas em resultados obtidos para a região onde se realizou o estudo. Deve-se ter cuidado ao generalizar essas informações.

Como resultado destas comparações, tem-se que, experimentalmente, o DL com seção quadrada teve melhor desempenho em relação aos DLs com seção retangular. Tal verificação contraria o demonstrado na teoria, mas, ao considerar o movimento do sol durante o dia, o estudo torna-se mais complexo e a área de captação pode estar em duas faces do duto.

Numa primeira análise, se a mesma demonstração feita anteriormente for aplicada à outra face do duto, teremos que, para horários com baixa altura solar, a outra dimensão (que não aquela da demonstração anterior) terá maior participação na determinação da quantidade de energia total. Desse modo, ao longo de um dia, as duas dimensões (x e y, na demonstração) poderiam ter influências equivalentes na energia total resultante, e o DL com seção quadrada, então, teria um melhor desempenho, como o acontecido na medição.

As variações, na energia total, encontradas para DLs com comprimentos e áreas da seção diferentes têm certa relação com os cálculos feitos como exemplo, nas planilhas apresentadas no estudo teórico. A diminuição da área provoca grande queda da energia total, visto que há uma diminuição da área de captação e um aumento do número de reflexões. Quando se aumenta o comprimento do duto também há um aumento do número de reflexões e, portanto, uma maior perda de energia. Experimentalmente, a diferença (quando o comprimento varia de 15cm para 25 cm) nas energias totais foi de cerca de 16%. Usando as equações demonstradas teoricamente, chega-se a um valor de 8%. A diferença entre o valor teórico e experimental é esperada, pois, para a demonstração teórica, foram adotados valores médios de iluminância e participação somente da luz direta.

Pode-se melhorar a captação e condução da luz com elementos relativamente simples como uma altura adicional em uma das faces do DL ou elementos externos ao duto que redirecionem os raios solares.

Considerou-se, no estudo teórico, somente a parcela da luz direta, que constitui a maior parcela da energia luminosa recebida. Esse fato foi também verificado com os valores obtidos nas medições.

A parcela da luz difusa pode ser incluída no estudo como uma porcentagem da luz direta, e a relação entre as parcelas a ser utilizada depende das condições de céu predominantes em cada região.

Foram realizadas medições para comparar os desempenhos dos sistemas de iluminação natural. Utilizou-se um método alternativo para a análise dos dados obtidos, a fim de compensar o pequeno número de aparelhos disponíveis.

Com os resultados obtidos nas medições, verificou-se que o uso de Dutos de Luz pode proporcionar uma melhora na distribuição e nos níveis das iluminâncias no ambiente interno. Constatou-se também que, ao usar o DL, cria-se a possibilidade de diminuir a área da janela sem prejudicar a iluminação nas regiões distantes da abertura. Isso diminuiria o ofuscamento nos pontos próximos à janela, enquanto que o DL supriria a necessidade dos pontos do fundo do ambiente.

Notou-se que a eficiência da iluminação através da janela aumenta em dias com céu encoberto e que a iluminação através do DL, ao contrário, tem uma maior eficiência em dias de céu limpo, quando pode utilizar-se da luz direta. Este fato pode ser um indício do benefício que se tem ao trabalhar com DL e janela simultaneamente. Ao usar os dois elementos (DL e janela) num mesmo sistema de iluminação natural, tem-se, para qualquer tipo de céu, uma iluminação que pode atender os requisitos das atividades no interior do ambiente.

Ao mesmo tempo em que o DL propicia um maior nível de iluminâncias, também traz consigo certa carga térmica. Desse modo, o potencial de economia de energia depende primeiramente se o ambiente é condicionado natural ou artificialmente. Se o ambiente for condicionado naturalmente, a carga térmica introduzida pelo DL não provocará um aumento no gasto de energia. Nesse tipo de ambiente, deve-se verificar se o conforto das pessoas é atendido, avaliando a variação na carga térmica trazida pelo DL e pela diminuição do uso de lâmpadas. Caso o ambiente seja artificialmente condicionado, uma variação na carga térmica significa que o consumo de energia será alterado também.

Com o auxílio de planilhas (ANEXO I), observou-se que, em dias de céu limpo, o uso do DL causou uma diminuição na carga térmica, sendo o fator determinante a redução da carga térmica pelo não uso de lâmpadas. A maior redução na carga térmica ocorreu no dia 31/01/2005, e foi de 5,96 W/m².

Nos dias com céu parcialmente encoberto, notou-se um aumento na carga térmica provocado pelo DL, o que traria um maior consumo de energia. Isso ocorreu porque nesses dias a iluminação provida pela janela tem altos níveis de iluminância na

maior parte do ambiente e, nesse caso, o uso do DL não implica na diminuição do uso de lâmpadas. Um reposicionamento do DL, de modo que este atendesse a regiões mais distantes da janela, poderia melhorar a iluminação e diminuir o consumo de energia.

No dia com céu totalmente encoberto (03/02/2005), foi verificado um grande aumento da carga térmica, de $13,61 \text{ W/m}^2$, pelos mesmos motivos explicados no parágrafo anterior. O aumento expressivo da carga térmica nesse dia reforça os argumentos.

Não se chegou a um valor exato da economia de energia, mas com a variação estimada na carga térmica é possível, usando as características dos aparelhos condicionadores, calcular esta economia.

Durante as medições, registrou-se a condição de céu por meio de fotografias, em intervalos regulares de tempo. No entanto, as medidas de iluminância para a luz difusa e luz total (que permitem o cálculo da luz direta) mostraram-se como bons indicadores da condição do céu, permitindo a análise através dos gráficos, e foi dispensado o uso das fotografias. Caso se conseguisse fotografar a cada medição (de dois em dois minutos) e uma faixa maior de céu, poder-se-ia ilustrar situações quando ocorre uma mudança brusca no valor da iluminância e representar efetivamente o tipo de céu. Isto foi inviável pelo número de fotos que seriam armazenadas e pelo pequeno intervalo de tempo entre as medições.

Mesmo com registros fotográficos de uma pequena faixa do céu, percebeu-se que, com fotos do eixo Leste-Oeste, pode-se conseguir uma relação entre a condição de céu, a faixa de céu fotografada e a proporção entre luz difusa e total. Sugeriu-se um novo método para classificar os tipos de céu, o qual será tema de futuros estudos.

Dificuldades encontradas durante este estudo limitaram a obtenção de um modelo matemático mais sofisticado e de uma avaliação mais específica das condições de céu e sua influência na iluminação interna de ambientes. A variação na carga térmica provocada pelo uso do DL foi apenas estimada teoricamente. Por esses motivos, sugere-se, para futuros trabalhos:

- Iniciar a avaliação do desempenho do Duto de Luz a partir de um sistema com menos variáveis, a fim de estudar a influência de cada variável na captação, transmissão e distribuição da luz ao ambiente interno;
- Realizar um registro das condições de céu – seja com o auxílio de fotografias, filmagem, ou somente com a medição de iluminâncias – com equipamento que permita obter o valor das iluminâncias internas (em vários pontos) e externas (total e difusa) simultaneamente;
- Analisar o desempenho de Dutos de Luz, quanto à iluminação e carga térmica, em ambientes reais.

**REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NB 57 – Iluminância de interiores**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 13 p. 1991.
- _____. Iluminação Natural, Parte 2: **Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural**. Projeto 02:135.02-002. Comitê Brasileiro da Construção Civil. Comissão de Estudo de Iluminação Natural de Edificações. ABNT. Junho de 1999a.
- _____. Iluminação Natural, Parte 4: **Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações**. Projeto 02:135.02-004. Comitê Brasileiro da Construção Civil. Comissão de Estudo de Iluminação Natural de Edificações. ABNT. Junho de 1999b.
- AYERS, S.F.; CARTER, D.J. Remote source electric lighting systems: A review. **Lighting Research and Technology**. Great Britain. The Chartered Institution of Building Services Engineers, v. 27, n. 1, p. 1-15, 1995.
- BEGEMANN, S.H.A.; VAN DEN BELD, G.J.; TENNER, A.D. Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses. **Industrial Ergonomics**, v.20, p. 231-239, 1997.
- BOYCE, P.; HUNTER, C.; HOWLETT, O. The Benefits of Daylight through Windows. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 2003.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2000/Ano Base 1999**, Brasília, MME, 2000.
- _____. **Balanco Energético Nacional 2003/Ano Base 2002**, Brasília, MME, 2003.
- BRASIL, Ministério da Indústria e do Comércio. **Comissão Nacional da Indústria da Construção Civil. “Consumo energético nos edifícios”**, Rio de Janeiro, 1984.
- CALIFORNIA, Energy Commission. **Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment**. Technical Report, California, 2003.
- CAPRA, F. **Ponto de Mutação**. Tradução Álvaro Cabral: revisão Newton Roberval Eichemberg. 20 ed. São Paulo, Editora Cultrix, 1997. cap.1, p. 17-46.

CHIRARATTANANON, S.; CHEDSIRI, S.; RENSHEN, L. Daylighting through light pipes in the tropics. **Solar Energy**, v. 69, n. 4, p. 331-341, 2000.

CORREA, S. R. M. Desempenho Visual em salas de aula: Análise comparativa de componentes de aberturas laterais. **Anais do V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, Fortaleza – CE, 1999.

COURRET, G.; SCARTEZZINI, J.L.; FRANCIOLI, D.; MEYER, J.J. Design and assessment of an anidolic light-duct. **Energy and Buildings**, n. 28, p. 79-99, 1998.

EDMONDS, I.R.; MOORE, E.I.; SMITH, G.B.; SWIFT, P.D. Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels. **Lighting Research and Technology**. Great Britain. The Chartered Institution of Building Services Engineers, v. 27, n. 1, p. 27-35, 1995.

ELMUALIM, A.A.; SMITH, S.; RIFFAT, S.B.; SHAO, L. Evaluation of dichroic material for enhancing light pipe/natural ventilation and daylighting in an integrated system. **Applied Energy**, n. 62, p. 253-266, 1999.

FERRAZ, H. **A Formação do Engenheiro: Um Questionamento Humanístico**. São Paulo. Ática, 1983.

FORÇA domada: quilowatts de economia, **Revista Técnica**, n. 53, p. 56-65, ago. 2001.

GHISI, E. **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina**. Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

HOPKINSON, R. G. **Iluminação Natural**. Lisboa, Calouste Gulbekian, 1975.

JENKINS, D.; MUNEER, T. Modeling light-pipe performances – a natural daylighting solution. **Building and Environment**, n. 38, p. 965-972, 2003.

LITTLEFAIR, P.J. Designing with innovative daylighting. **BRE Report BR 305**. Watford, 1996.

MACÊDO, C.C. **Análise do Desempenho Térmico e Luminoso de Sistemas de Iluminação Natural que Utilizam a Luz Direta do Sol**. 2002. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2002.

- MAGALHÃES, L.C. **Orientações Gerais para conservação de energia elétrica em edificações**. Eletrobrás, 2002.
- MASCARÓ, L. R. **Luz, Clima e Arquitetura**. Porto Alegre, Livraria Nobel, 1981.
- OAKLEY, G.; RIFFAT, S.B.; SHAO, L. Daylight Performance of Lightpipes. **Solar Energy**, Great Britain, v. 69, n. 2, p. 89-98, 2000.
- PEREIRA, F. O. R. **Luminous and thermal performance of window shading and sunlighting reflecting devices**. 1992. cap. 3, p. 22-53. Tese (Doutorado) – University of Sheffield, 1992.
- PROCEL, **Manual de Conservação de Energia Elétrica em Edifícios Comerciais e Públicos**. Eletrobrás. Rio de Janeiro, RJ. 1988.
- QI, N.; AYERS, M.J.; BUTCHER, G.; CARTER, D.J. Discrete emitters for remote-source lighting systems. **Lighting Research and Technology**. Great Britain. The Chartered Institution of Building Services Engineers, v. 28, n. 1, p. 53-58, 1996.
- RODRIGUES, P. **Manual de Iluminação Eficiente**. Eletrobrás, 2002.
- RORIZ, M. **Introdução ao Projeto de Iluminação**. Apostila do Curso de Atualização Profissional sobre Racionalização de Processos e Produtos na Construção de Edifícios. Departamento de Engenharia Civil da UFSCar. São Carlos, SP. 2001.
- SÃO PAULO, Secretaria do Meio Ambiente. Unidade Energia e Meio Ambiente. **“Eficiência Energética na Gestão Ambiental – O Conceito da Qualidade na Energia”**, São Paulo, [200-].
- SHAO, L.; RIFFAT, S.B. Daylight using light pipes and its integration with solar heating and natural ventilation. **Lighting Research and Technology**. Great Britain. The Chartered Institution of Building Services Engineers, v. 32, n. 3, p. 133-139, 2000.
- SIMÕES, E. A. Q.; TIEDEMANN, K. B. **Psicologia da Percepção**. São Paulo, EPU, 1985.
- SWIFT, P.D.; SMITH, G.B. Cylindrical mirror light pipes. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, n. 36, p. 159-168, 1995.
- URRIOL, J.J.E.; LARA, M.A.; PIACENTINI, R.D. Passive Solar Light-ducts. **Applied Energy**, 0306-2619, p. 95-105, 1987.

WEST, S. Improving the sustainable development of building stock by the implementation of energy efficient, climate control technologies. **Building and Environment**, n. 36, p. 281-289, 2001.

ZHANG, X.; MUNEEER, T. Mathematical model for the performance of light pipes. **Lighting Research and Technology**. Great Britain. The Chartered Institution of Building Services Engineers, v. 32, n. 3, p. 141-146, 2000.

Bibliografia Adicional Consultada

KREMER, A.; PEREIRA, F. O. R. Aplicação da ferramenta DF METER para avaliação de iluminação natural em diferentes sistemas de aberturas. **Anais do IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Foz do Iguaçu – PR, 7 a 10 de Maio de 2002.

KRONKA, R. C. Arquitetura, sustentabilidade e meio ambiente. **Revista Técnica**, n. 55, p. 66-69, Out. 2001.

LI, D.H.W.; LAM, J.C. Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications. **Renewable Energy**, n. 20, p. 389-404, 2000.

PAPST, A. L.; PEREIRA, F. R.; LAMBERTS, R. Uso de simulação computacional para análise de iluminação natural. **Anais do VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Florianópolis – SC, 27 a 30 de Abril de 1998.

SELKOWITZ, S. The Elusive Challenge of Daylighted Buildings – A Brief Review 25 Years Later. **Daylighting '98 Conference Proceedings**, Ottawa – Ontario, Canada, 1998.

WESTPHAL, F.; MARINOSKI, D.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Proposta de Retrofit para o sistema de Iluminação Natural da UFSC. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, PR. 2002.

Nas planilhas de cálculo da carga térmica, têm-se as iluminâncias internas medidas sem o DL (coluna A) e com o DL (coluna E), a carga térmica resultante dessas iluminâncias (colunas B e F), as cargas adicionais devidas ao uso de lâmpadas para atingir a iluminância mínima da norma (colunas C e G) e a carga total no ambiente sem o DL e com este (colunas D e H). As colunas I, J e K mostram, respectivamente, a variação na carga térmica causada pelo DL, pela diminuição no uso de lâmpadas e a variação final da carga térmica.

Tabela A: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 13/01/2005.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Varição carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Varição diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Varição final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²)	Carga adicional (W/m ²)	Carga total (W/m ²)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²)	Carga adicional (W/m ²)	Carga total (W/m ²)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)		(A/100)	(para A<300)	(B + C)		(E/100)	(para A<300)	(F + G)			
100	2239	22,39	0,00	22,39	2239	22,39	0,00	22,39	0,00	0,00	0,00
	1041	10,41	0,00	10,41	1002	10,02	0,00	10,02	-0,39	0,00	-0,39
	418	4,18	0,00	4,18	541	5,41	0,00	5,41	1,23	0,00	1,23
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)	173	1,73	2,55	4,27	252	2,52	0,96	3,48	0,79	-1,58	-0,79
50	196	1,96	2,09	4,04	458	4,58	0,00	4,58	2,63	-2,09	0,54
	146	1,46	3,07	4,54	278	2,78	0,44	3,22	1,32	-2,63	-1,32
	112	1,12	3,77	4,88	113	1,13	3,74	4,87	0,01	-0,03	-0,01
Iluminância média desejada (lm/m ²)	2221	22,21	0,00	22,21	2221	22,21	0,00	22,21	0,00	0,00	0,00
300	1032	10,32	0,00	10,32	994	9,94	0,00	9,94	-0,38	0,00	-0,38
	855	8,55	0,00	8,55	1121	11,21	0,00	11,21	2,65	0,00	2,65
	347	3,47	0,00	3,47	570	5,70	0,00	5,70	2,23	0,00	2,23
	198	1,98	2,04	4,02	469	4,69	0,00	4,69	2,71	-2,04	0,67
	153	1,53	2,94	4,47	348	3,48	0,00	3,48	1,95	-2,94	-0,99
	82	0,82	4,35	5,18	135	1,35	3,29	4,65	0,53	-1,06	-0,53
Dia 13/01/2005	9213	92,13	20,81	112,94	10742	107,42	8,44	115,86	15,28	-12,37	2,91

Tabela B: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 31/01/2005.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Varição carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Varição diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Varição final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (A/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (B + C)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (E/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)											
100	728	7,28	0,00	7,28	728	7,28	0,00	7,28	0,00	0,00	0,00
	522	5,22	0,00	5,22	524	5,24	0,00	5,24	0,01	0,00	0,01
	259	2,59	0,83	3,41	352	3,52	0,00	3,52	0,94	-0,83	0,11
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)	154	1,54	2,91	4,46	261	2,61	0,78	3,39	1,07	-2,13	-1,07
100	100	1,00	3,99	5,00	297	2,97	0,05	3,03	1,97	-3,94	-1,97
50	104	1,04	3,92	4,96	307	3,07	0,00	3,07	2,03	-3,92	-1,89
	106	1,06	3,89	4,94	201	2,01	1,98	3,99	0,95	-1,90	-0,95
Iluminância média desejada (lm/m ²)	764	7,64	0,00	7,64	764	7,64	0,00	7,64	0,00	0,00	0,00
300	546	5,46	0,00	5,46	525	5,25	0,00	5,25	-0,21	0,00	-0,21
	240	2,40	1,19	3,60	352	3,52	0,00	3,52	1,12	-1,19	-0,07
	197	1,97	2,07	4,03	491	4,91	0,00	4,91	2,94	-2,07	0,87
	158	1,58	2,85	4,42	572	5,72	0,00	5,72	4,15	-2,85	1,30
	97	0,97	4,05	5,03	399	3,99	0,00	3,99	3,01	-4,05	-1,04
	102	1,02	3,96	4,98	207	2,07	1,86	3,93	1,05	-2,10	-1,05
Dia 31/01/2005	4078	40,78	29,66	70,44	5980	59,80	4,67	64,48	19,02	-24,98	-5,96

Tabela C: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 01/02/2005.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Variação carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Variação diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Variação final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (A/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (B + C)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (E/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)	922	9,22	0,00	9,22	922	9,22	0,00	9,22	0,00	0,00	0,00
100	559	5,59	0,00	5,59	583	5,83	0,00	5,83	0,24	0,00	0,24
	363	3,63	0,00	3,63	339	3,39	0,00	3,39	-0,23	0,00	-0,23
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)	302	3,02	0,00	3,02	370	3,70	0,00	3,70	0,68	0,00	0,68
50	191	1,91	2,18	4,09	362	3,62	0,00	3,62	1,71	-2,18	-0,47
	140	1,40	3,19	4,60	282	2,82	0,36	3,18	1,42	-2,83	-1,42
	62	0,62	4,75	5,38	208	2,08	1,84	3,92	1,46	-2,91	-1,46
Iluminância média desejada (lm/m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dia 01/02/2005	2539	25,39	10,12	35,52	3066	30,66	2,20	32,86	5,27	-7,92	-2,65

Tabela D: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 03/02/2005.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Varição carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Varição diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Varição final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (A/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (B + C)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (E/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)											
100	3103	31,03	0,00	31,03	3103	31,03	0,00	31,03	0,00	0,00	0,00
	1631	16,31	0,00	16,31	1643	16,43	0,00	16,43	0,12	0,00	0,12
	780	7,80	0,00	7,80	862	8,62	0,00	8,62	0,82	0,00	0,82
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)											
50	433	4,33	0,00	4,33	466	4,66	0,00	4,66	0,33	0,00	0,33
	260	2,60	0,80	3,40	450	4,50	0,00	4,50	1,90	-0,80	1,10
	242	2,42	1,16	3,58	282	2,82	0,35	3,18	0,40	-0,81	-0,40
	139	1,39	3,21	4,61	175	1,75	2,49	4,25	0,36	-0,72	-0,36
Iluminância média desejada (lm/m ²)											
300	3698	36,98	0,00	36,98	3698	36,98	0,00	36,98	0,00	0,00	0,00
	1972	19,72	0,00	19,72	2104	21,04	0,00	21,04	1,32	0,00	1,32
	1224	12,24	0,00	12,24	1302	13,02	0,00	13,02	0,78	0,00	0,78
	616	6,16	0,00	6,16	976	9,76	0,00	9,76	3,60	0,00	3,60
	502	5,02	0,00	5,02	865	8,65	0,00	8,65	3,63	0,00	3,63
	313	3,13	0,00	3,13	658	6,58	0,00	6,58	3,45	0,00	3,45
	155	1,55	2,90	4,45	232	2,32	1,36	3,68	0,77	-1,55	-0,77
Dia 03/02/2005	15069	150,69	8,07	158,76	16817	168,17	4,20	172,37	17,48	-3,87	13,61

Tabela E: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 04/02/2005.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Varição carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Varição diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Varição final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (A/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (B + C)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (E/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)											
100	1712	17,12	0,00	17,12	1712	17,12	0,00	17,12	0,00	0,00	0,00
	1113	11,13	0,00	11,13	1121	11,21	0,00	11,21	0,09	0,00	0,09
	776	7,76	0,00	7,76	811	8,11	0,00	8,11	0,35	0,00	0,35
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)											
50	356	3,56	0,00	3,56	527	5,27	0,00	5,27	1,71	0,00	1,71
	265	2,65	0,70	3,35	461	4,61	0,00	4,61	1,96	-0,70	1,27
	261	2,61	0,77	3,39	474	4,74	0,00	4,74	2,13	-0,77	1,36
	83	0,83	4,34	5,17	125	1,25	3,50	4,75	0,42	-0,85	-0,42
Iluminância média desejada (lm/m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dia 04/02/2005	4565	45,65	5,81	51,47	5232	52,32	3,50	55,81	6,66	-2,32	4,35

Tabela F: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 10/02/2005.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Variação carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Variação diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Variação final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (A/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (B + C)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (E/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)											
100	1632	16,32	0,00	16,32	1632	16,32	0,00	16,32	0,00	0,00	0,00
	1053	10,53	0,00	10,53	1043	10,43	0,00	10,43	-0,10	0,00	-0,10
	576	5,76	0,00	5,76	606	6,06	0,00	6,06	0,30	0,00	0,30
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)											
50	265	2,65	0,70	3,35	302	3,02	0,00	3,02	0,37	-0,70	-0,33
	133	1,33	3,34	4,67	258	2,58	0,83	3,42	1,26	-2,51	-1,26
	149	1,49	3,02	4,51	478	4,78	0,00	4,78	3,29	-3,02	0,27
	95	0,95	4,10	5,05	325	3,25	0,00	3,25	2,30	-4,10	-1,80
Iluminância média desejada (lm/m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dia 10/02/2005	3902	39,02	11,17	50,19	4645	46,45	0,83	47,28	7,42	-10,34	-2,92

Tabela G: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 11/02/2005.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Varição carga térmica - DL (W/m²)	Varição diminuição de lâmpadas (W/m²)	Varição final devida ao DL (W/m²)
	Iluminância (lm/m²)	Carga térmica (W/m²)	Carga adicional (W/m²)	Carga total (W/m²)	Iluminância (lm/m²)	Carga térmica (W/m²)	Carga adicional (W/m²)	Carga total (W/m²)	(F - B)	(G - C)	(I + J)
		(A/100)	(para A<300)	(B + C)		(E/100)	(para A<300)	(F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)	896	8,96	0,00	8,96	896	8,96	0,00	8,96	0,00	0,00	0,00
100	601	6,01	0,00	6,01	599	5,99	0,00	5,99	-0,02	0,00	-0,02
	397	3,97	0,00	3,97	349	3,49	0,00	3,49	-0,47	0,00	-0,47
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)	268	2,68	0,63	3,32	337	3,37	0,00	3,37	0,69	-0,63	0,05
50	94	0,94	4,13	5,06	305	3,05	0,00	3,05	2,12	-4,13	-2,01
	103	1,03	3,94	4,97	256	2,56	0,89	3,44	1,53	-3,05	-1,53
	91	0,91	4,18	5,09	152	1,52	2,97	4,48	0,61	-1,22	-0,61
Iluminância média desejada (lm/m²)	3113	31,13	0,00	31,13	3113	31,13	0,00	31,13	0,00	0,00	0,00
300	1575	15,75	0,00	15,75	1605	16,05	0,00	16,05	0,30	0,00	0,30
	669	6,69	0,00	6,69	861	8,61	0,00	8,61	1,92	0,00	1,92
	354	3,54	0,00	3,54	550	5,50	0,00	5,50	1,96	0,00	1,96
	180	1,80	2,39	4,20	542	5,42	0,00	5,42	3,61	-2,39	1,22
	200	2,00	2,01	4,00	415	4,15	0,00	4,15	2,15	-2,01	0,14
	315	3,15	0,00	3,15	527	5,27	0,00	5,27	2,12	0,00	2,12
Dia 11/02/2005	8856	88,56	17,28	105,84	10507	105,07	3,85	108,92	16,51	-13,43	3,08

Tabela H: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 02/12/2004.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Varição carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Varição diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Varição final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (A/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (B + C)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (E/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)	2391	23,91	0,00	23,91	2391	23,91	0,00	23,91	0,00	0,00	0,00
100	1575	15,75	0,00	15,75	1578	15,78	0,00	15,78	0,03	0,00	0,03
	810	8,10	0,00	8,10	916	9,16	0,00	9,16	1,05	0,00	1,05
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)	441	4,41	0,00	4,41	701	7,01	0,00	7,01	2,59	0,00	2,59
50	271	2,71	0,59	3,29	515	5,15	0,00	5,15	2,45	-0,59	1,86
	137	1,37	3,26	4,63	248	2,48	1,03	3,52	1,11	-2,23	-1,11
	92	0,92	4,17	5,08	161	1,61	2,78	4,39	0,69	-1,38	-0,69
Iluminância média desejada (lm/m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dia 02/12/2004	5717	57,17	8,01	65,18	6510	65,10	3,81	68,92	7,93	-4,20	3,73

Tabela I: Planilha para o cálculo da variação na carga térmica introduzida ao ambiente com o uso de Duto de Luz – dia 06/12/2004.

Dados iniciais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Iluminação com janela				Iluminação com janela e DL				Varição carga térmica - DL (W/m ²) (F - B)	Varição diminuição de lâmpadas (W/m ²) (G - C)	Varição final devida ao DL (W/m ²) (I + J)
	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (A/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (B + C)	Iluminância (lm/m ²)	Carga térmica (W/m ²) (E/100)	Carga adicional (W/m ²) (para A<300)	Carga total (W/m ²) (F + G)			
Eficiência luminosa - luz do dia (lm/W)											
100	1848	18,48	0,00	18,48	1848	18,48	0,00	18,48	0,00	0,00	0,00
	870	8,70	0,00	8,70	890	8,90	0,00	8,90	0,20	0,00	0,20
	298	2,98	0,04	3,02	364	3,64	0,00	3,64	0,66	-0,04	0,62
Eficiência luminosa - lâmpadas (lm/W)	233	2,33	1,34	3,67	462	4,62	0,00	4,62	2,29	-1,34	0,95
50	166	1,66	2,67	4,34	836	8,36	0,00	8,36	6,70	-2,67	4,02
	133	1,33	3,35	4,67	669	6,69	0,00	6,69	5,36	-3,35	2,01
	146	1,46	3,09	4,54	793	7,93	0,00	7,93	6,47	-3,09	3,39
Iluminância média desejada (lm/m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dia 06/12/2004	3693	36,93	10,48	47,41	5861	58,61	0,00	58,61	21,68	-10,48	11,20