

CONDUÇÃO DA LUZ POR MEIO DE DUTOS COM SEÇÃO QUADRADA

Bruna Luz

Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, bluz.79@gmail.com
Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética, Rua do Lago, 876, São Paulo - SP, 05508.080, Tel.: (11) 3091- 4538.

RESUMO

Conduzir a luz natural do meio externo para iluminar locais de difícil acesso é uma alternativa, e a utilização de dutos é o mecanismo mais simples. O objeto deste estudo são dutos com seção quadrada internamente revestidos por espelhos. O objetivo é verificar o rendimento desses dutos em função do comprimento e da área de seção dos mesmos. Para tanto foram analisados os valores de iluminância obtidos na entrada e na saída dos dutos, a partir desses dados foram calculados o EDS (Eficiência de Duto Solar) e o ICDS (Índice de Condução em Dutos Solares), expressos em porcentagem. Com a comparação dos resultados foram encontradas semelhanças entre o rendimento dos dutos, quando sob condição de céu encoberto, com o rendimento, dos mesmos, quando expostos a incidência da luz direta, com baixa angulação, por volta de 35°. A principal contribuição deste trabalho é demonstrar o potencial desse tipo de sistema, abrindo novas possibilidades de investigações e pesquisa.

Palavras-chave: iluminação natural, iluminância, dutos de luz.

ABSTRACT

Lighting pipes are a simple alternative for conducting daylight into isolated rooms. This paper's object are square section pipes with the inside covered by mirrors. The objective of the paper is to verify the performance of the pipes related to their length and section area. The illuminance values at the top and bottom of the pipes have been measured and the EDS (Solar Pipe Efficiency) and the ICDS (Conduction Index on Solar Pipes) have been calculated as percentages of the available daylight. From the comparison of the results, similarities have been found among the performance of lighting pipes under overcast skies and under sunlight coming at low angles, around 35°. This paper's main contribution is to demonstrate the potential uses of this systems and to set ground for new developments and new research over the theme.

Keywords: daylight, illuminance, lighting pipes.

1. INTRODUÇÃO

A iluminação natural, na arquitetura, além das questões estéticas, é também, uma questão sócio-econômico e ambiental. Solucionar antigos problemas e inovar no aproveitamento deste recurso faz parte da preocupação e discussão da sociedade, dos profissionais e pesquisadores do ambiente construído. O potencial energético e o caráter gratuito da fonte são os principais incentivos das pesquisas nesta área. No entanto, a influência da luz natural sobre fatores fisiológicos e psicológicos dos seres vivos, com destaque ao homem, juntamente com a qualidade luminosa proporcionada, impulsionam o desenvolvimento de novas soluções para o aproveitamento desta.

A luz, “energia radiante situada entre determinados comprimentos de onda” (HOPKINSON, PETHERBRIDGE e LONGMORE, 1975), é responsável pela iluminação de ambientes externos e internos, através de fontes naturais (sol e céu) ou artificiais. No caso da iluminação natural o céu é considerado uma fonte de luz separada, embora tecnicamente toda a luz provenha do sol (SOUZA, 1997). Essas fontes são variáveis durante o dia, devido à trajetória solar própria de cada latitude e às características locais de nebulosidade e fenômenos meteorológicos no decorrer do ano, portanto temos diferentes condições de céu: encoberto, claro e parcialmente encoberto (MASCARO, 1980).



Figura 1 - Condições de Céu

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



Figura 2 - Sistemas Convencionais de Iluminação Natural



Figura 3 - Sistemas Não Convencionais de Iluminação Natural

A luminosidade proveniente do sol apresenta alguns problemas: calor indesejado, brilhos, contrastes excessivos e ofuscamento, sendo necessário seu controle. Segundo HOPKINSON, PETHERBRIDGE e LONGMORE (1975) a janela lateral tem dupla função: iluminar e promover a vista do exterior. Porém a

iluminação proveniente deste sistema reduz à medida que se afasta da abertura e torna-se mais eficiente quando se utiliza uma janela alta, o que dificulta a associação da função de iluminar a de visualizar o meio externo. Para ROBBINS (1986) o ofuscamento ocasionado pelas aberturas laterais, é a principal característica negativa desse sistema. Nas aberturas zenitais o ganho de carga térmica configura a desvantagem do sistema.

Visando minimizar a baixa eficiência dos sistemas convencionais é possível utilizar mecanismos que maximizem o desempenho das aberturas. Para janelas laterais, têm-se como opções: prateleiras de luz, persianas reflexivas, vidros especiais e painéis prismáticos. Para as aberturas zenitais a principal opção é o duto de luz.

A condução ou transporte da luz natural para o interior dos ambientes é cada vez mais utilizado na arquitetura, como meio de complementar a iluminação lateral ou para iluminar ambientes de difícil acesso desse recurso.

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

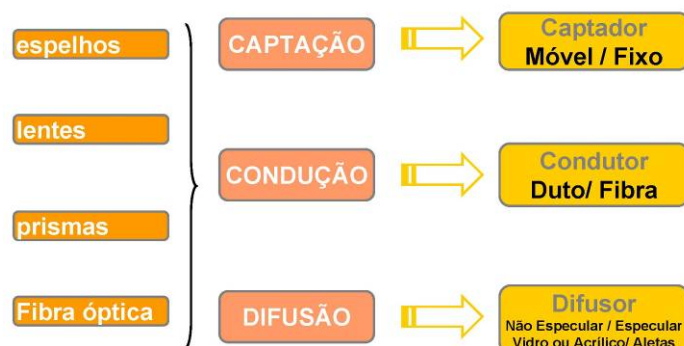


Figura 4 - Fluxograma -sistema não convencional para iluminação natural.

Nesse trabalho serão apresentados estudos de co-relação entre a área de seção de dutos espelhados quadrados com o comprimento dos mesmos cujo objetivo é verificar o rendimento em função da quantidade de luz que entra nas seções 10cm, 25cm e 40cm e da quantidade que sai após ser conduzida por 1m e 2m de comprimento.

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo verificar o rendimento de dutos de seção quadra, revestidos internamente com espelhos, em função do comprimento e da área de seção dos mesmos.

3. MÉTODO

O método utilizado é empírico indutivo, partindo da realização e análise de resultados de ensaios.

Para obter o rendimento dos dutos foram construídos protótipos em escala real e modelos em escala reduzida. Os protótipos foram ensaiados em laboratório com o auxílio de uma fonte artificial, fixa e constante, a lâmpada do heliodon, que simula a radiação direta do sol incidindo nos dutos. Os modelos em escala reduzida foram ensaiados no céu artificial do LABAUT, ou seja, também com fonte artificial fixa e constante, porém a condição de exposição é a de um céu encoberto com distribuição próxima ao céu padrão C.I.E.

A análise foi realizada em três etapas: medição das iluminâncias; cálculo dos rendimentos e das perdas; e, a comparação entre os resultados obtidos no ensaio com os protótipos e no ensaio realizado com os modelos em escala reduzida. Este procedimento será detalhado a seguir.

3.1. Protótipos e Modelo Físico

Os protótipos foram construídos em madeira compensada, com espelhos de alta qualidade e mão-de-obra qualificada (marceneiros do LAME - Laboratório de Modelos e Ensaios da FAUUSP). A madeira foi

comprada com recursos fornecidos pela FAPESP (reserva técnica) e os espelhos OPTIMIRROR PLUS foram doados pela CEBRACE e fixados em uma vidraçaria por profissionais especializados.

Os modelos em escala reduzida foram confeccionados na escala 1:10, sendo que as peças de espelho foram unidas por cola apropriada, dispensando estrutura em madeira compensada e mão de obra especializada.

O comprimento dos dutos, tanto para os protótipos como para os modelos em escala reduzida, são de 1m e 2m. Já a seção, para os protótipos foi fixada em 10cm e nos modelos em escala reduzida foram variadas em 10cm, 25cm e 40cm. Essas dimensões foram adotadas para permitir ensaios comparativos quanto a influência da área de seção e das perdas pela absorção do material reflexivo (espelhos) no interior do duto. A geometria quadra foi adotada com intuito de facilitar a construção, pois dutos de seção circular proporcionam inúmeras dificuldades na confecção artesanalmente com qualidade. Os comprimentos foram definidos a fim de proporcionar fácil transporte, estruturar as peças (evitando flambagens e trincas) e facilitar o manuseio em laboratório durante os ensaios, para o caso dos protótipos em escala real;

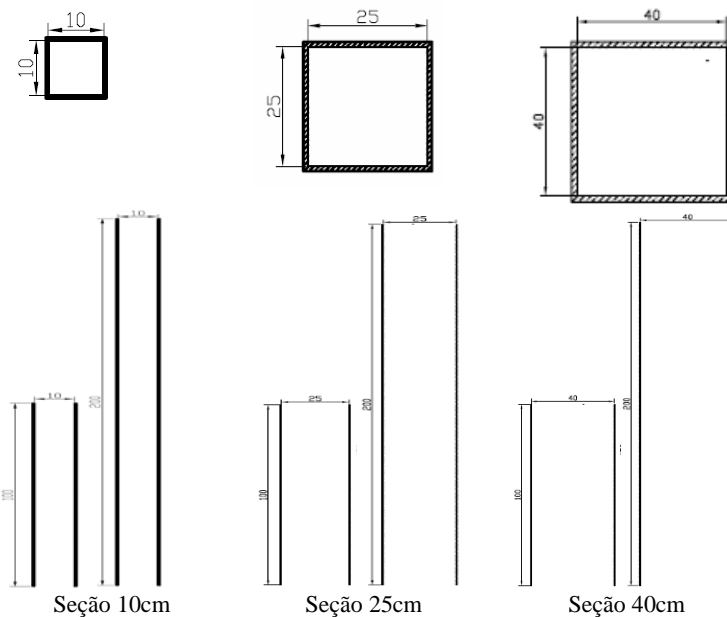


Figura 5 - Dutos

3.2. Coleta dos dados

Os dutos estudados são sistemas condutores de luz natural. No entanto, devido às variações da condição de céu e a interferência da radiação direta nos sensores, inviabilizando a comparação dos valores coletados na entrada com os da saída nos dutos, optou-se por utilizar fonte artificial (lâmpada do heliodon) para os protótipos e céu artificial do LABAUT¹ (caixa cúbica de espelhos) para os modelos em escala reduzida. Para simular condições reais a lâmpada do heliodon será posicionada em relação a entrada do duto com três angulações distintas conforme os posicionamentos seguintes:

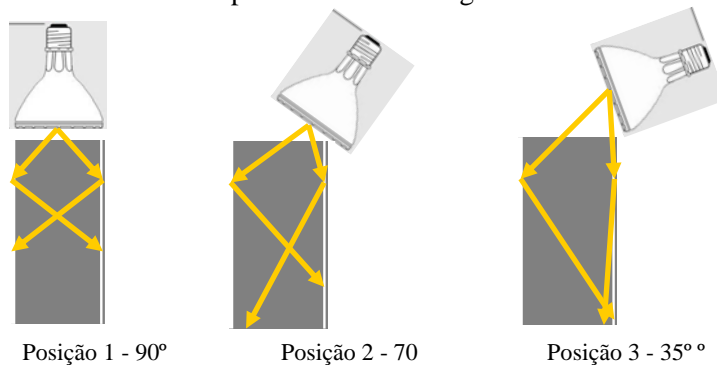


Figura 6 - Posicionamento da fonte artificial

¹ LABAUT - Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAUUSP – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Para a coleta dos valores de iluminância no ensaio com os protótipos o luxímetro foi posicionado, conforme a ilustração 7, nos quatro pontos P1, P2, P3 e P4:

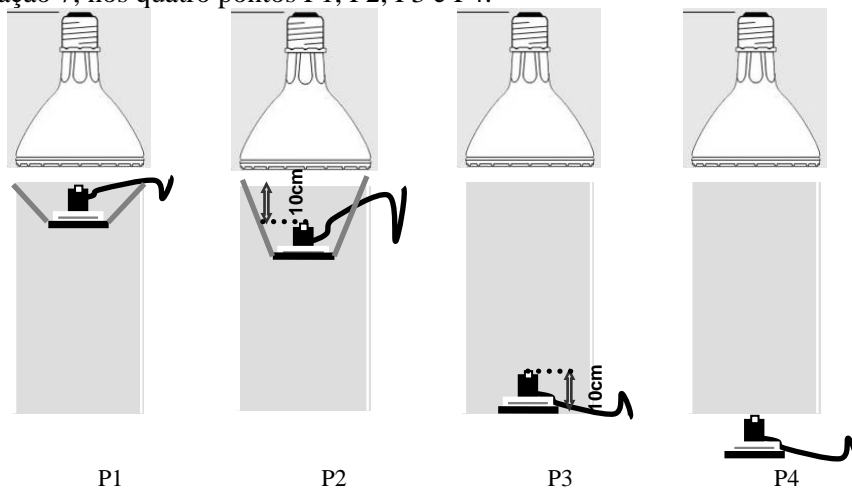


Figura 7 - Esquema - Posicionamento dos Luxímetros nos Protótipos

Sendo:

- P1: No nível de entrada do duto;
- P2: 10 cm abaixo do nível de entrada do duto;
- P3: 10 cm antes do nível de saída do duto;
- P4: No nível de saída do duto;

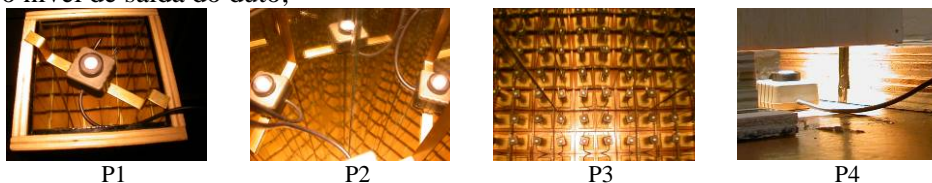


Figura 8 - Foto - Posicionamento dos Luxímetros

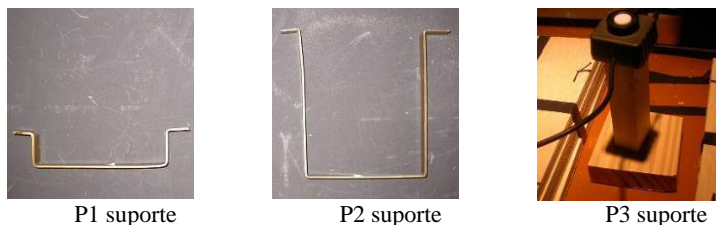


Figura 9 - Foto - Posicionamento dos Luxímetros

Para os modelos em escala, os valores de iluminância foram coletados em duas posições (P1 e P4), pois devido ao tamanho do sensor não é possível introduzi-lo no interior do duto em escala. Para garantir sempre o mesmo posicionamento do ponto P1 na entrada do duto com relação a distância da fonte luminosa (plano iluminado do céu artificial) a base do céu artificial foi suspensa mantendo a mesma distância para todos os comprimentos dos dutos. Para a coleta do valor e iluminância no ponto P1 o sensor foi apoiado no topo do duto e para a coleta do ponto P4 o duto foi suspenso e este posicionado sobre o sensor no limite da boca de saída do duto, ver ilustração 10.

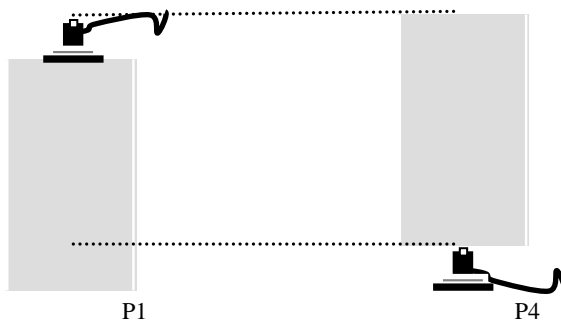


Figura 10 - Esquema - Posicionamento dos Luxímetros nos modelos em escala

3.3. Cálculo do EDS e do ICDS

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

$$EDS = \frac{E_4}{E_1} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

E1 a iluminância no ponto 1

E4 a iluminância no ponto 4

O **ICDS** (Índice de Condução em Dutos Solares) é porcentagem de luz que chega ao sensor localizado no P3 com relação a quantidade de luz que havia no ponto P2, sendo a perda efetiva no interior do duto ocasionada pelas sucessivas reflexões ao longo comprimento, ou seja, a perda devida a refletância do material de revestimento interno ao duto.

$$ICDS = 100 - \left(\frac{E_3}{E_2} \times 100 \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E2 a iluminância no ponto 2

E3 a iluminância no ponto 3

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Avaliação do rendimento

A tabela 1 apresenta os valores calculados de EDS por meio dos resultados obtidos nos ensaio com os protótipos e nos ensaios com os modelos em escala reduzida, a partir dos quais observa-se:

- O efeito da sazonalidade, pois o rendimento diminui conforme a incidência da luz é inclinada.
- A influência da refletância do material, visto que o rendimento diminui em ambos os ensaios conforme aumentam o comprimento do duto.
- Para a seção ocorreu o esperado, quanto maior é a área de aquisição de luz, maior o rendimento.

Tabela 1 – Porcentagens de EDS para os Protótipos e Modelo em Escala Reduzida

EDS - Protótipos				EDS Modelos em Escala Reduzida		
Seção	10cm x 10cm	10cm x 10cm	10cm x 10cm	10cm x 10cm	25cm x 25cm	40cm x 40cm
Duto	90°	70°	35°	difusa	difusa	difusa
1m	55,55%	22,35%	17,15%	17,27%	46,23%	62,19%
2m	43,21%	37,22%	6,49%	07,56%	28,60%	41,12%

Por meio do ensaio com modelo em escala reduzida cuja condição de céu é encoberto, ou seja, sem a presença da radiação direta do sol, encontra-se a pior situação para o desempenho ou rendimento do sistema estudado. Desse modo, observa-se que sem a presença do sol, pode-se atingir, com um duto de 2m de comprimento espelhado internamente sem sistema especial de captação com seção de 40cm x 40cm o rendimento de 41,12% e tomando a cidade de São Paulo como exemplo, e adotando o dato fornecido pelo software Climaticus de 13.000 lux disponíveis no plano horizontal desobstruído para condição de céu encoberto em 80% do ano, na saída do duto obtêm-se 5.345,6 lux, e na pior situação com seção de 10cm x 10cm na saída do duto é possível obter 982,8lux.

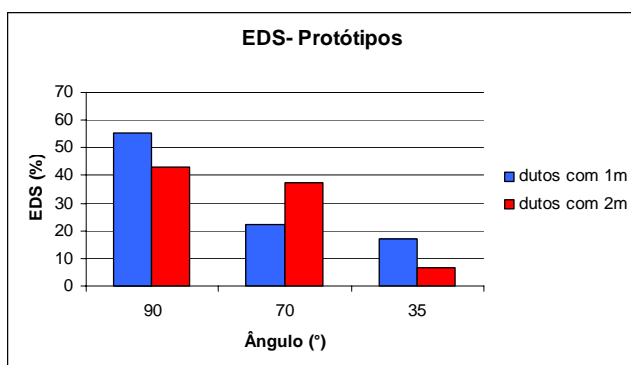


Figura 11 - Gráfico – Porcentagem de EDS em função do Ângulo de Incidência da Luz

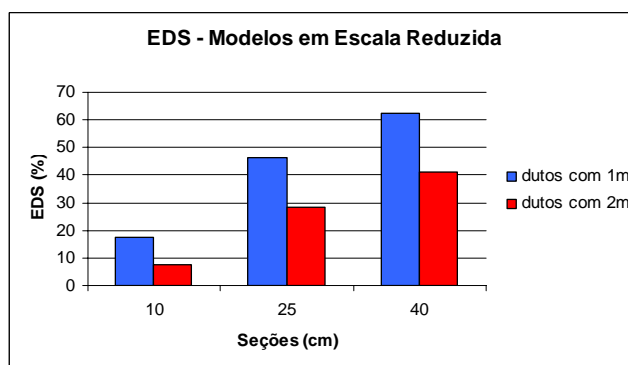


Figura 12 - Gráfico – Porcentagem de EDS em função do Ângulo de Incidência da Luz

Os rendimentos obtidos, por meio dos ensaios realizados, demonstram o grande potencial de estudo e desenvolvimento desse tipo de sistema para iluminar áreas de difícil acesso e locais onde até o presente momento só era possível iluminar por fontes artificiais.

4.2. Avaliação das Perdas

As perdas ocorridas no comprimento dos dutos foram calculadas através do ICDS, apenas para os protótipos, por não ter sido tomada as medidas de iluminância para os ponto P2 e P3 no modelo em escala reduzida, devido a dimensão do sensor em relação a abertura do duto conforme justificado no item 3.2. As porcentagens de ICDS calculadas estão apresentadas na tabela2.

Tabela 2 – Porcentagens de ICDS para os Protótipos

ICDS					
Duto 100x10x10 cm			Duto 200x10x10 cm		
90°	70°	35°	90°	70°	35°
27,19%	63,07%	71,57%	33,50%	53,50%	84,83%

Quando a luz incide no duto a 90°, ou seja, perpendicular a área de abertura, o que ocorre por volta do meio dia, adotando como referência a latitude 23° 32' 51"S de São Paulo, para aberturas zenitais em situações reais, foi verificada perda de 6,3% maior no duto de 2m em relação ao de 1m.

Com o ângulo de 70°, representando a maior parte das horas de sol diárias, ocorreu uma inversão no esperado para as perdas, esta foi 9,57% maior no duto de 1m. Este resultado foge as expectativas e para a presente análise será desconsiderado, sendo necessários novos ensaios para esclarecer ou confirmar tais resultados.

Para o ângulo de 35° a perda foi 13,26% maior no duto de 2m em relação ao de 1m de comprimento. Com esta angulação, que representando o início e o final do dia para casos reais, as perdas foram grandes. Isto se deve ao número de reflexões que aumentam significativamente com essa incidência, além da contribuição direta ser praticamente nula. Esta situação se aproxima ao esperado para condição de céu encoberto, com a ausência de penetração direta do sol no interior do duto.

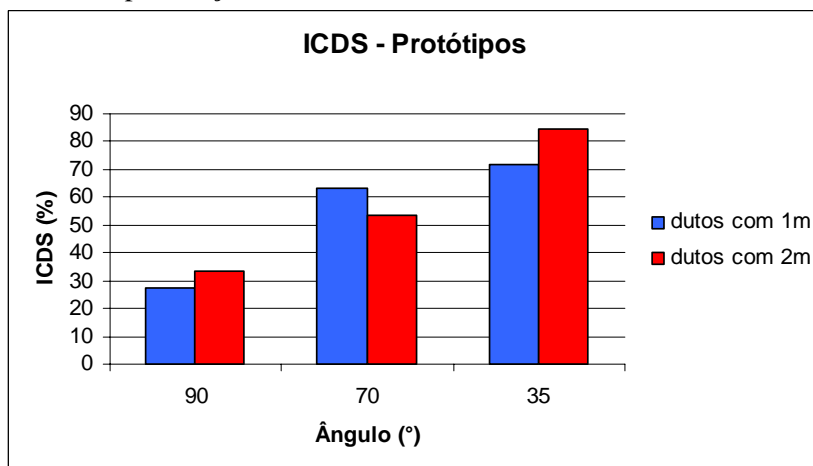


Figura 13 - Gráfico – Porcentagem de ICDS em função do Ângulo de Incidência da Luz

Pelos resultados obtidos verifica-se que existe a tendência de aumentar a perda com o aumento do comprimento do duto e com a inclinação do ângulo de incidência da luz solar direta na captação. Assim, o maior aproveitamento desse tipo de sistema ocorre nos horários em que a luz solar incide próximo da perpendicular com a abertura de entrada da mesma. Para maximizar o aproveitamento do sistema estudado é possível a utilização de mecanismos de concentração (lentes) ou de redirecionamento (espelhos) do ângulo de incidência da luz solar no momento da captação.

Analisando a perda ocasionadas pelas múltiplas reflexões no interior do duto se observa que esta não dobra com o dobro da distancia percorrida pela luz, isto se deve a influencia da luz direta que chega na saída do duto, sendo maior a influência desta nas situações em que a luz incide a 90° com a seção de entrada do duto. No entanto, mesmo com condição de baixa angulação na incidência da luz, como ocorre com 35°, nota-se que existe a contribuição da iluminação direta (sem refletir nas paredes do duto) vinda do plano horizontal iluminado na seção de entrada do duto.

4.3. Comparação entre o ensaio com o protótipo e o ensaio com modelo em escala

Os ensaios com modelo em escala reduzida foram realizados com o auxilio do céu artificial, modelo caixa cúbica de espelhos do LABAUT, ver figura 14. O fundo móvel deste equipamento permitiu ajustar a altura da fonte para que todas as seções de entrada, tanto nos dutos de 1m como nos de 2m estivesse à mesma distancia desta, garantindo o mesmo valor de iluminância na área de entrada do duto.

A fonte de luz do céu artificial é similar a de um céu encoberto próximo aos valores do céu padrão C.I.E. conforme gráfico da calibragem do equipamento, ver figura 15. (LUZ, 2008).

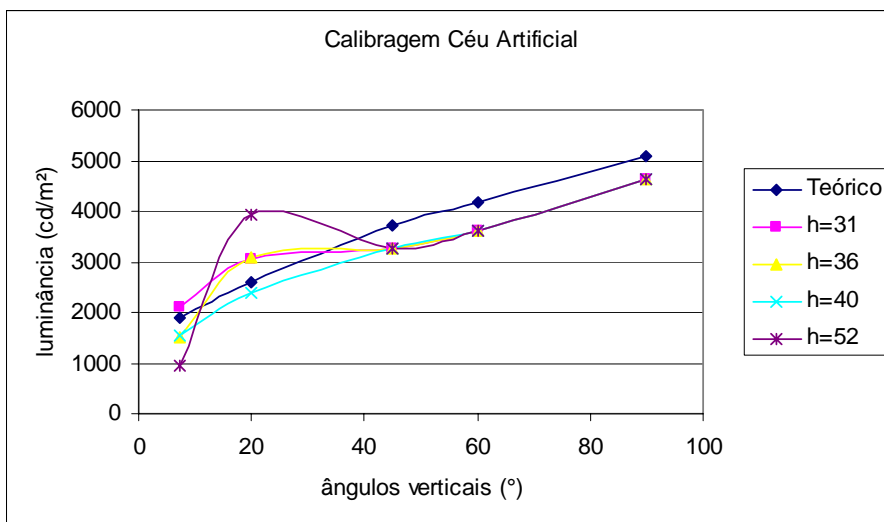


Figura 14 – Foto do Equipamento Céu Artificial do LABAUT.

Figura 15 – Gráfico de Calibragem do Equipamento Céu Artificial do LABAUT.

Os resultados obtidos nos ensaios com os modelos em escala reduzida foram menores aos obtidos nos ensaios com os protótipos em escala real. Isto se deve a fonte de luz que foi utilizada para cada ensaio, ou seja, o céu artificial equivale a um céu encoberto com distribuição variando na proporção 3:1 do zênite para o horizonte e a lâmpada do heliodon equivale a condição de céu claro, na qual se tem a contribuição da radiação direta do sol.

Tabela 3 – Comparação das porcentagens de EDS para os modelos em escala reduzida e os protótipos.

Dutos	EDS Seção 10cm x 10cm		
	Modelos em Escala Reduzida	Protótipos	
		90°	35°
1m	17,27%	55,55%	17,15%
2m	07,56%	43,21%	06,49%

Comparando as porcentagens de EDS calculadas para os protótipos com as calculadas para os modelos em escala reduzida verifica-se que:

- O protótipo, com a fonte incidindo a 90° com a seção de entrada do duto, apresenta rendimento 38,28% maior para o duto de 1m de comprimento e 35,65% maior para o duto de 2m de comprimento.

- Com ângulo de incidência de 35° o rendimento do protótipo, tanto para 1m como para 2m de comprimento do duto, são similares aos obtidos para o modelo em escala reduzida. Isto se deve a menor contribuição vinda diretamente da fonte, sem reflexões nos espelhos.

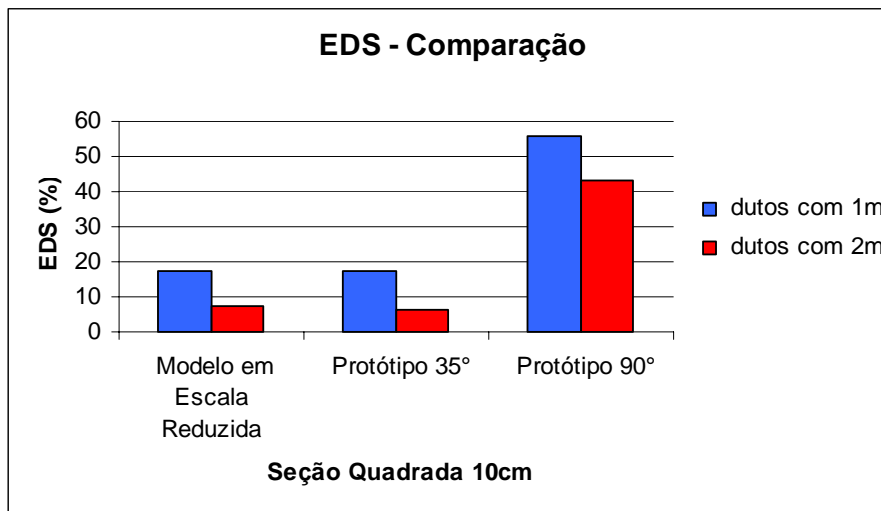


Figura 16 - Gráfico – Comparação de EDS entre Protótipo e Modelo em Escala Reduzida

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o rendimento de dutos condutores de luz natural com seção quadrada por meio do cálculo do EDS e as perdas no interior dos mesmos pelo cálculo do ICDS. Foram comparados os resultados obtidos no ensaio com protótipos em escala real com os obtidos no ensaio com os modelos em escala reduzida. As duas fontes artificiais de luz utilizadas nos ensaios possibilitaram verificar sob condições constantes de iluminação diferentes condições de exposição, ou seja, com os protótipos foi utilizada a lâmpada do heliodon que simula condição de céu claro e nos ensaios com modelo em escala foi utilizado o céu artificial do LABAUT que simula condição de céu encoberto.

A partir das porcentagens de EDS verifica-se o grande potencial para o estudo, desenvolvimento e aplicação de dutos condutores de luz natural. Pois mesmo com baixo rendimento, quando a condição de céu está desfavorável ou quando o horário no decorrer do dia proporciona ângulo de incidência próximos dos 35° e tendo como referência a disponibilidade de luz encontrada na abóbada celeste brasileira, a quantidade de iluminância obtida na saída do duto justifica sua aplicação.

Pelo cálculo do ICDS foi identificado que apesar de ocorrer perda, devida às múltiplas reflexões ao longo do comprimento, esta não dobra com o dobro da distância, o que ocorre pela contribuição direta da área iluminada na boca de entrada da luz no duto. Este fenômeno fica evidente ao analisar a perda obtida com angulação de incidência da luz no duto de 90° e a obtida com a angulação de 35°, pois a 90° a influência da fonte, ou seja, da contribuição direta da luz sem reflexões é maior e, portanto a perda é menor.

Com a comparação dos resultados foram encontradas semelhanças entre o rendimento dos dutos, quando sob condição de céu encoberto, com o rendimento, dos mesmos, quando expostos a incidência da luz direta, com baixa angulação, por volta de 35°.

O maior rendimento, desse tipo de sistema, ocorre nos horários em que a luz solar incide próximo da perpendicular com a abertura de entrada da mesma. Para maximizar o aproveitamento desta pode ser incluso ao sistema mecanismos de concentração (lentes) ou de redirecionamento (espelhos) do ângulo de incidência da luz solar no momento da captação.

A grande contribuição deste trabalho foi demonstrar por meio da análise dos rendimentos obtidos e considerando a disponibilidade de luz para São Paulo, o grande potencial de utilização e aplicação de sistemas para condução da luz natural, mesmo nos horários e dias em que a condição de céu não é a mais favorável.

6. REFERÊNCIAS

- HOPKINSON, R.G., PETHERBRIDGE, P. e LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. Lisboa, Fundação Kalouste Gulbenkian, 1975.
- JENKINS, David & MUNEER, Tariq. **Light-pipe prediction methods**. Applied Energy 79, 2004. pp,77–86.
- LUZ, Bruna. **Céu Artificial Retilíneo da FAU-USP: Desenvolvimento e Construção de Equipamento para Aplicação Didática**. São Paulo, NUTAU 2008.
- MASCARO, Lucia Elvira Alicia Raffo de. **Iluminação natural nos edifícios**. Porto Alegre, 1980.
- ROBBINS, Claude. **Daylighting. Design and Analysis**. New York, Van Nostrand, 1986.
- SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. **Estudos sobre a iluminação natural externa e suas implicações no desempenho luminoso de ambientes internos. Florianópolis: UFSC, 2002.** (Trabalho realizado para Exame de Qualificação, Doutorado em Engenharia Civil, Construção Civil).
- Climaticus 4.2. - **Software de Conforto**. Disponível em: < <http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>

7. AGADECIMENTOS

A autora agradece à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao LABAUT (laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética) o apoio recebido para o desenvolvimento do projeto, a CEBRACE pela doação dos espelhos, e aos alunos da graduação Augusto C. Macieira, Amanda V. Mônaco e Giovanna S. de Araújo pela colaboração durante os ensaios.