



## MODELO PREDITIVO DE EFICIÊNCIA DE DUTOS DE LUZ (EDL)

**Bruna Luz (1); Leonardo Marques Monteiro (2); Marcia Peinado Alucci (3)**

- (1) Departamento de Tecnologia – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: bluz.79@gmail.com
- (2) Departamento de Tecnologia – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: leo4mm@gmail.com
- (3) Departamento de Tecnologia – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: marcia.alucci@gmail.com

### RESUMO

Este artigo apresenta a proposta de um modelo matemático preditivo da eficiência luminosa em dutos, com base no princípio do hemisfério unitário e do conceito de ângulo sólido projetado. O método adotado nesta pesquisa é teórico dedutivo, para tanto foi desenvolvido um modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos. A fim de verificar os resultados, um método empírico induutivo foi aplicado, por meio de ensaios com modelos físicos sob condições de céu real. A alta correlação encontrada entre os resultados obtidos a partir dos dados medidos e os resultados do modelo preditivo proposto, mostra que o modelo matemático (MPEDL), desenvolvido para o cálculo da eficiência de dutos de luz (EDL), é uma ferramenta confiável e de fácil aplicação para o dimensionamento deste tipo de sistema de aproveitamento de iluminação natural em projetos arquitetônicos e dimensionamentos de ambientes em que a luz natural comumente não tem acesso.

Palavras-chave: condução de luz natural; duto de luz; modelo preditivo.

## **1 INTRODUÇÃO**

Com o avanço das pesquisas surgem inovações tecnológicas e iniciativas direcionadas para o aproveitamento da luz natural. Nesse contexto, os dutos de luz são sistemas desenvolvidos para conduzir a iluminação natural à ambientes distantes da abertura, como, por exemplo, salas sem contato direto com o meio externo ou em subsolos. Algumas empresas comercializam esses sistemas sem, no entanto, apresentarem dados relativos a eficiência luminosa desses.

Dutos de luz são sistemas condutores de luz natural. Esses podem apresentar diversas geometrias e percurso na condução da luz, sendo os mais comuns circulares ou retangulares distribuídos na horizontal e/ou na vertical, ramificados ou não, com captação da luz natural na lateral ou na zenital, com ou sem o auxílio de captador acoplado na entrada do duto. A vantagem desse sistema é o transporte da luz para longe da abertura na qual esta foi captada. Duto de luz não é o sistema mais eficiente dentre os condutores de luz (fibras ópticas, guias líquidas e guias sólidas), pois é o único a não utilizar o princípio da reflexão total, no entanto é um sistema simples e pode ser construído in locu, em obras de pequeno e grande porte. A eficiência desse tipo de sistema está relacionada à refletância do material de revestimento interno, que pode ser desde uma simples pintura com tinta reflexiva até materiais com alta capacidade refletora como ocorre com os dutos comercializados pela SOLA TUBE<sup>1</sup> que utilizam uma película chamada *spectrallight* cuja refletância divulgada pelo fabricante é de 99,7%. Quanto maior a refletância da superfície interna do duto melhor será seu desempenho, desse modo podem ser utilizadas tintas, espelhos, prismas, películas ou outro material disponível de acordo com a disponibilidade e ou possibilidade de aplicação desse para o caso específico de cada sistema.

Parte das pesquisas atuais cujo objeto de estudo é o sistema condutor do tipo duto de luz é fruto da análise de dados coletados em monitoramentos a edifícios existentes com dutos instalados junto a sistemas artificiais e em alguns casos associados a sistemas convencionais (janela lateral) (AL-MARWAEE & CARTER, 2006; OAKLEY et al., 2000). Esses levantamentos, em sua maioria, sofrem a dificuldade de horários para a coleta de dados, visto que os edifícios (normalmente escolas, escritórios e comércios), encontram-se em funcionamento durante os períodos de luz diurna, não sendo possível desativar o sistema artificial ou isolar o aproveitamento da luz vinda apenas dos dutos.

Outras pesquisas exploram a teoria propondo modelos matemáticos, outros verificam e compararam tais modelos. Esse é o caso do artigo publicado por Jenkins & Muneer (2004) no qual são verificadas as vantagens e as deficiências, para cinco diferentes métodos preditivos utilizados na análise do desempenho de dutos de luz. Dentre as propostas de modelos destaca-se o artigo escrito por Swift et al. (2008), devido à proximidade com o objeto de estudo do presente trabalho, apresentando um modelo de cálculo para dutos de luz espelhados de seção retangular.

Este trabalho apresenta um modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPEDL), cujo resultado é um modelo matemático para o cálculo da eficiência em dutos de luz (EDL). Esse modelo foi desenvolvido para determinar a eficiência luminosa de dutos espelhados com seção quadrada.

O MPEDL foi baseado no princípio do ângulo sólido projetado ou conceito do hemisfério unitário. Este princípio é utilizado por diversos métodos gráficos para a obtenção da componente celeste (CC), possibilitando a obtenção dessa, mesmo quando a área de janela ou fonte luminosa apresenta formato irregular (HOPKINSON et al., 1975). Sendo assim, é possível a utilização de métodos gráficos que relacionem a geometria e a distância dos objetos ao ponto de referência (ABNT 15215, 2005, parte 4).

## **2 OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo preditivo que calcula o valor do EDL, ou seja, a relação entre a disponibilidade de luz no plano horizontal da entrada com a obtida no ponto central da seção de saída do duto, considerando o plano horizontal da entrada desobstruído.

---

<sup>1</sup> SOLA TUBE ([www.solatube.com](http://www.solatube.com))

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Método

O método adotado nesta pesquisa é teórico dedutivo com análise comparativa dos resultados, culminando na proposta de um modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPEDL). Para a verificação dos resultados foi aplicado um método empírico indutivo, por meio de ensaios com modelos físicos sob condições de céu real. Esses proporcionaram ajustes e a verificação do modelo proposto.

#### 3.2 Modelo Preditivo da Eficiência Luminosa em Dutos

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

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

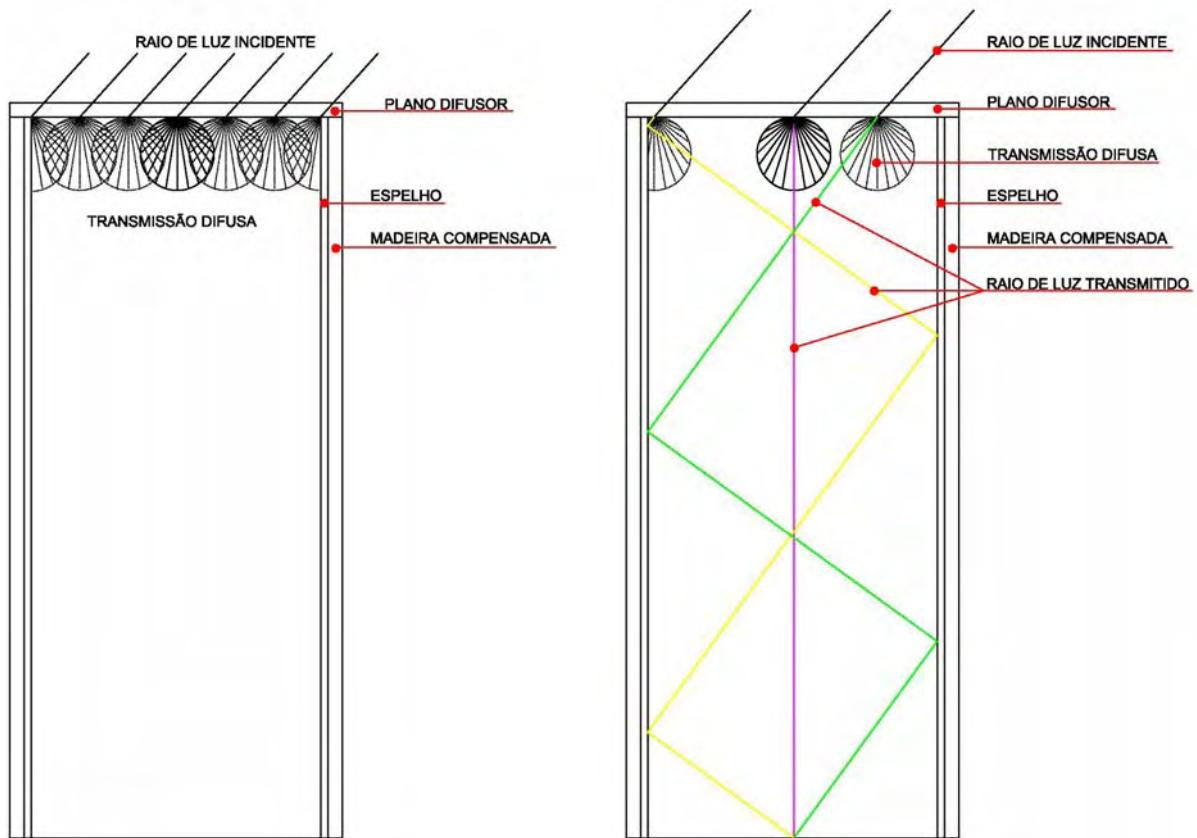


Figura 1 – Transmissão do fluxo luminoso por superfície difusora.

O modelo proposto prediz a eficiência do duto de luz (EDL), sendo essa a razão de fluxos luminosos (entrada e saída do duto), ou seja, entre a luz obtida na saída do duto e a disponibilidade de luz na abóbada celeste ou no plano horizontal da seção de entrada do mesmo (ver equação 5).

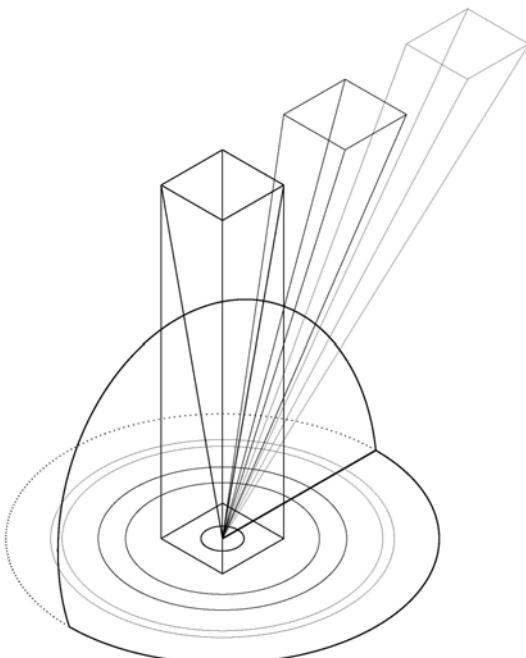


Figura 2 – Transferência de fluxo luminoso da superfície difusa para o ponto no centro do duto.

O EDL é obtido por meio da somatória das iluminâncias adquiridas a partir da área de seção da entrada do duto, bem como de suas imagens refletidas nos espelhos, considerando as sucessivas perdas devidas a absorção nas múltiplas reflexões ao longo do comprimento do duto.

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

As luminâncias projetadas no hemisfério unitário estão dentro de ângulos sólidos, formando com o eixo vertical central ao duto ângulos  $\theta_i$ , os quais são os vértices dos triângulos retângulos cuja base é o segmento  $[(b.i)+b/2]$ , onde  $b$  a largura da seção de entrada do duto e a altura ( $h$ ) é o comprimento do duto. O valor do ângulo  $\theta_i$  é determinado por meio do arco tangente, conforme a equação 1:

$$\theta_i = \operatorname{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right], \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

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

$b$  é a largura da seção do duto;

$h$  é o comprimento do duto;

As luminâncias projetadas no hemisfério unitário geram setores circulares na base desse hemisfério, cujas áreas ( $A_i$ ) (coroas de circunferências) são definidas segundo as equações 2 e 3:

$$a_i = \sin \theta_i \cdot r, \quad (\text{eq.2})$$

$$A_i = (a_i^2 - a_{i-1}^2) \cdot \pi, \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

$A_i$  é a área aparente da coroa circular;

$a_i$  e  $a_{i-1}$  são os raios das circunferências concêntricas formadas pela projeção das luminâncias;  
 $r$  é o raio do hemisfério, neste caso  $r=1$ .

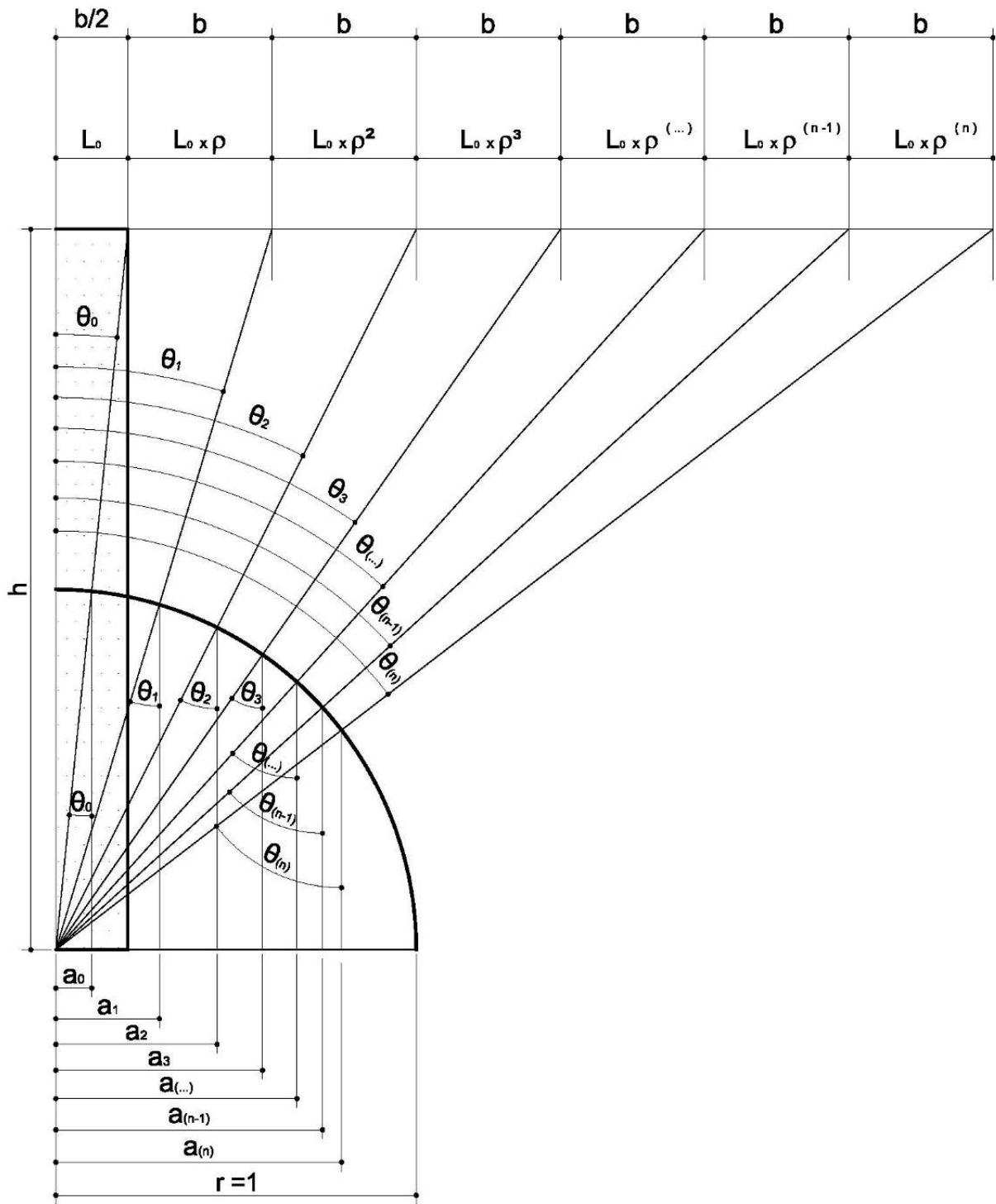


Figura 3 - Luminâncias projetadas no hemisfério unitário

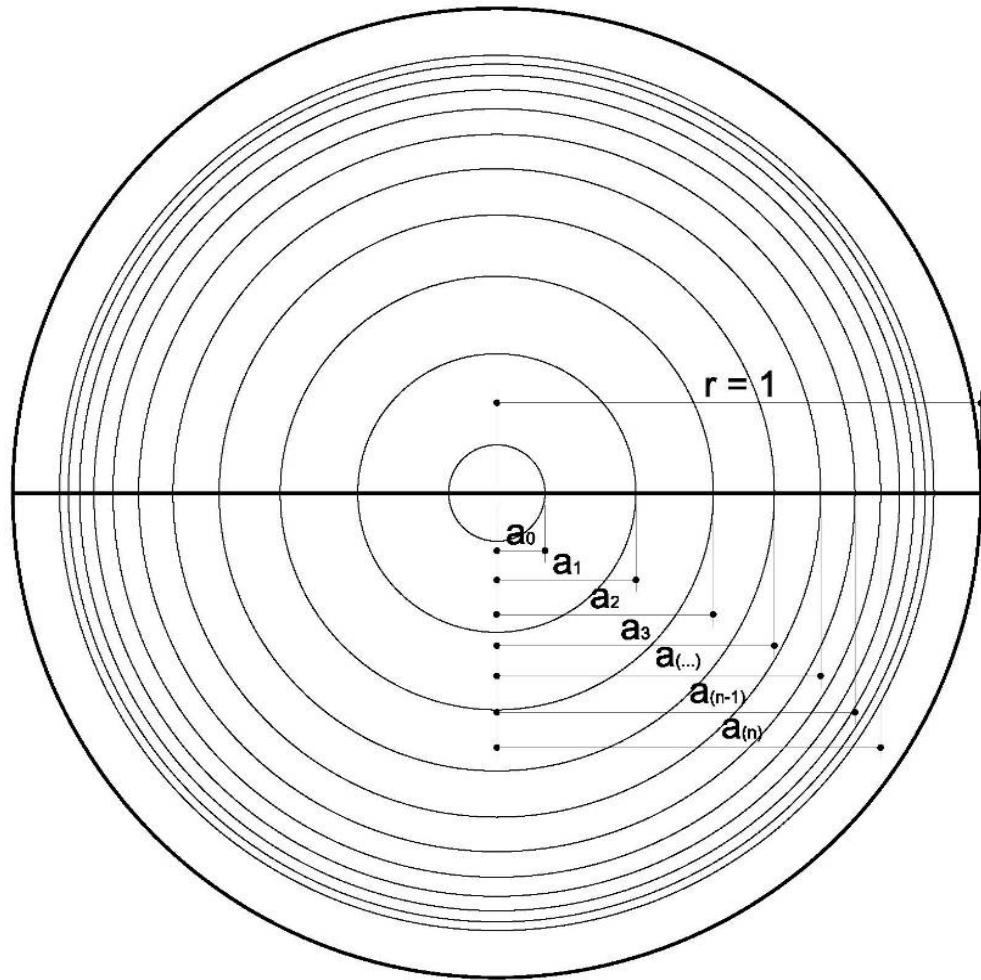


Figura 4 - Coroas circulares

A iluminância  $E_i$  é a parcela de contribuição de cada coroa circular. O somatório de  $E_i$  para todas as coroas corresponde a iluminância obtida na seção de saída do duto, ou seja, no ponto central do hemisfério de raio unitário.  $E_i$  é obtida por meio da equação 4.

$$E_i = A_i \cdot L_0 \cdot \rho^i, \quad (\text{eq.4})$$

Onde:

$E_i$  é a iluminância de cada coroa circular;

$A_i$  é a área da coroa circular;

$L_0$  é a luminância na entrada do duto;

$\rho$  é a refletância interna ao duto;

Desse modo, com as quatro equações anteriores 1, 2, 3 e 4 obtém-se o valor de EDL, equação 5:

$$EDL = \frac{E_p}{E_{ext}} = \frac{\sum_{i=0}^n E_i}{\pi \cdot L_0}, \quad (\text{eq.5})$$

Onde:

$EDL$  é a eficiência em dutos de luz;

$E_p$  é a iluminância na saída do duto;

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

$E_i$  é a iluminância de cada coroa circular;

$L_0$  é a luminância na entrada do duto;

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

Assim, com a síntese das anteriores, por meio das substituições a seguir, obtém-se a equação 11.

Substituindo a equação 1 na equação 2 obtém-se a equação 6:

$$a_i = \sin \cdot \operatorname{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right], \quad (\text{eq.6})$$

Substituindo a equação 6 na equação 3 obtém-se a equação 7:

- Para  $i = 0$ ;

$$A_0 = \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h} \right) \cdot \pi, \quad (\text{eq.7})$$

- Para  $i > 0$ ;

$$A_i = \left\{ \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] - \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left[ \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \right\} \cdot \pi, \quad (\text{eq.8})$$

Substituindo as equações 7 e 8 na equação 4 obtém-se as equações 9 e 10:

- Para  $i = 0$ ;

$$E_0 = \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h} \right) \cdot \pi \cdot L_0 \cdot \rho^0, \quad (\text{eq.9})$$

- Para  $i > 0$ ;

$$E_i = \left\{ \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] - \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left[ \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \right\} \cdot \pi \cdot L_0 \cdot \rho^i, \quad (\text{eq.10})$$

Substituindo as equações 9 e 10 na equação 5 obtém-se a equação 11:

$$EDL = \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{h} \right) + \sum_{i=1}^n \left\{ \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left[ \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] - \sin^2 \cdot \operatorname{atg} \left[ \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \right\} \cdot \rho^i, \quad (\text{eq.11})$$

Onde:

$n$  é o número de reflexões do plano emissor;

Os valores absolutos de  $EDL$  (eficiência em dutos de luz), obtidos por meio da equação 11, podem ser expressos em porcentagem, assim como ocorre com o fator de luz diurna (FLD).

### 3.3 Levantamento Empírico – Estudo Experimental

Para o estudo experimental foram construídos 9 dutos de madeira compensada revestidos por espelhos optimirror plus<sup>2</sup> com seções quadradas de 10cm, 25cm e 40cm e comprimentos de 100cm, 150cm e 200cm.

O modelo matemático considera condição de céu uniforme, devido a isto, para aproximar as condições de ensaio do considerado pelo modelo proposto foram acopladas placas de acrílico leitoso na entrada dos dutos para simular condição de céu encoberto, visto que a coleta dos dados ocorreram nos dias 22/04/2009 e 06/05/2009 sob condição de céu parcialmente encoberto e claro respectivamente.



Figura 5 - Foto dos dutos construídos – modelos em escala real.

Para a coleta dos dados foram utilizados luxímetros digital HOMIS modelo 824. Esses foram localizados no ponto central da seção de entrada e de saída dos dutos (respectivamente P1 e P2 na figura 6). Os dados foram coletados em cada ponto e em cada duto separadamente, considerando como referência os dados coletados simultaneamente por um luxímetro externo em um plano horizontal desobstruído.

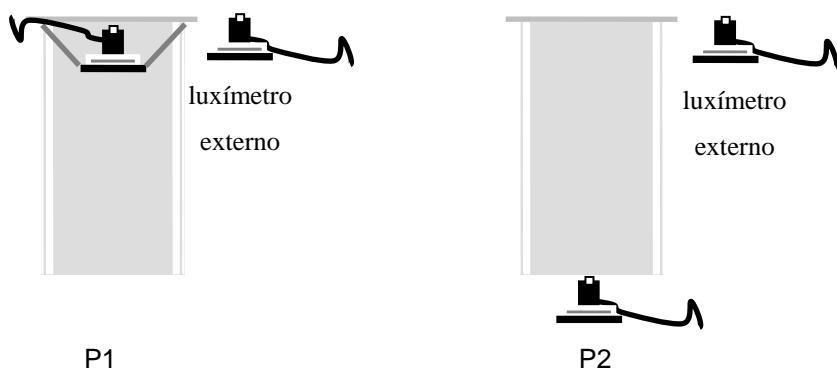


Figura 6 - Esquema - Posicionamento dos Luximetros

<sup>2</sup> Espelho optimirror plus: nome comercial do espelho fornecido pela CEBRACE para a construção dos dutos ensaiados. Espelho considerado pelo fabricante de alta qualidade.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A figura 7 apresenta a comparação entre os resultados medidos no levantamento empírico com os resultados previstos pelo modelo matemático proposto (MPEDL) e apresentado anteriormente.

O fabricante dos espelhos utilizado no ensaio assegura refletância igual ou superior a 80%, para o cálculo por meio do MPEDL foi considerada refletância constante de 86%. Essa refletância foi assumida após testes efetuados com o MPEDL para refletâncias variando de 80% a 99%.

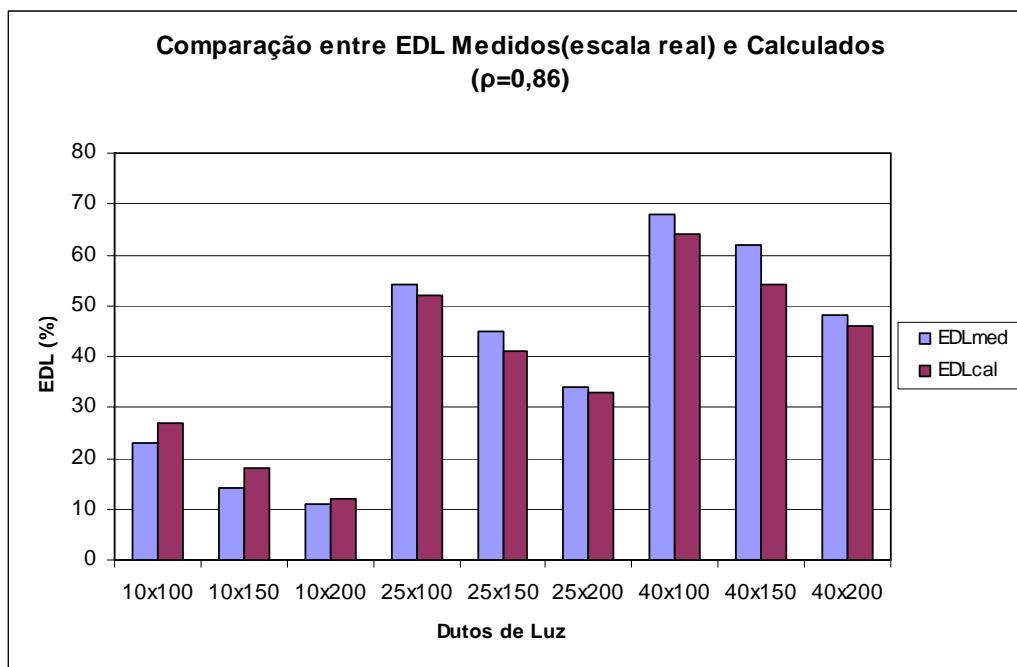


Figura 7 - Comparação entre os resultados medidos e calculados de EDL (Eficiência em Duto de Luz).

A Figura 8 mostra a correlação entre os resultados obtidos por meio do modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPEDL) com os obtidos no levantamento empírico. Estes apresentaram correlação linear, com erro médio de 3,33%, considerando-se o desvio médio  $D_m$ , tal que  $D_m$  é a média aritmética dos valores absolutos do desvio de cada medida, ou seja,  $D_m = (D_1 + D_2 + \dots + D_n)/N$ .

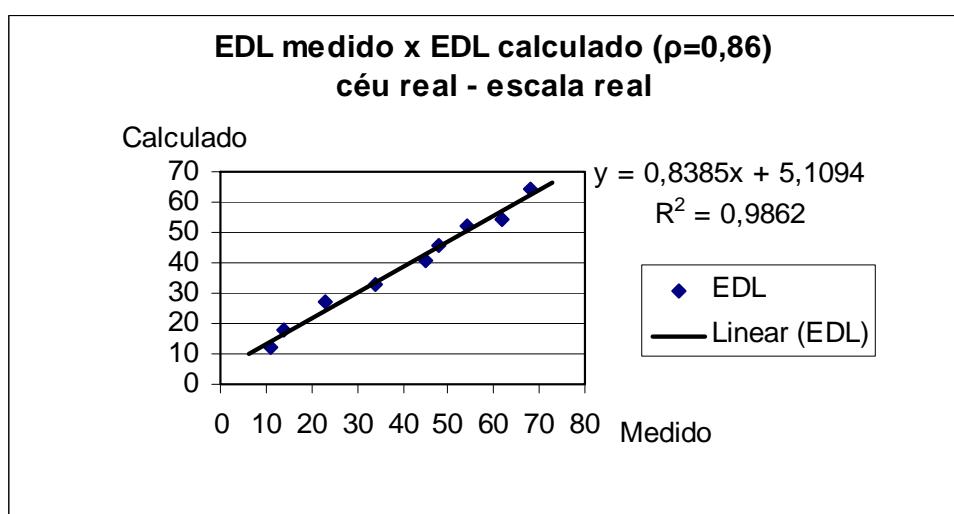


Figura 8 - Correlação entre os valores de EDL medidos e calculados ( $\rho=0,86$ ).

## 5 CONCLUSÕES

Na equação 11, para a comparação dos resultados obtidos no levantamento empírico com os calculados por meio do modelo proposto, foi adotado  $n = 30$ . Desse modo foram consideradas trinta reflexões do plano emissor projetadas no hemisfério de raio unitário.

Ao assumir  $n=30$  para o estudo comparativo foram realizadas as seguintes verificações: primeiro, se considerarmos  $i=30$ , o sen  $\theta$  é 0,99, resultando em uma área de coroa circular menor que 0,01. Desse modo, se o total de área de contribuição possível é a área da base do hemisfério unitário ( $3,14 \text{ m}^2$ ), foram consideradas 99% dessa ( $3,12 \text{ m}^2$ ); segundo, considerando a equação 11, e comparando seus resultados para  $i=30$  e  $i=216$  não foram encontradas diferenças até a quinta casa significativa.

Os dados de eficiência (EDL) calculados e medidos, apresentados na figura 7, mostram valores percentuais próximos. Como pode ser visualizado na figura 8, a correlação entre os resultados do modelo preditivo da eficiência luminosa em dutos (MPEDL) e os medidos no levantamento empírico são considerados altos ( $r^2=0,98$ ). A figura 8 também apresenta a regressão linear dos dados. Considerando a correlação obtida, fica evidente a correspondência entre o modelo proposto e os testes realizados com modelos físicos sob condições reais de exposição. Assim, para dutos de seção quadrada revestidos internamente por espelhos o MPEDL mostrou-se satisfatório na predição do EDL.

Até o presente momento o MPELD foi testado apenas para dutos de seção quadrada revestidos por espelho, não foram considerados ou testados outras seções ou geometrias de dutos, assim como não foram utilizados outros tipos de materiais de revestimento interno (refletores ou difusores).

Em futuros desenvolvimentos do modelo proposto, serão testados outros tipos de dutos de luz, visando aumentar e agregar valor a base de dados, variando a geometria (seções, formas e comprimentos), alterando os revestimentos internos (e suas refletâncias), bem como o princípio condutor (principalmente por reflexão e difusão). Um estudo experimental específico que deve ser feito para proposição prática, aumentando consideravelmente as possibilidades arquitetônicas para a aplicação de diferentes tipos de dutos de luz, seriam os ensaios de campo com dutos de seção retangular, verificando a correspondência desses com o modelo proposto.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15215-4. Iluminação Natural – Parte 4 – Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações – Método de Medição.** Rio de Janeiro, 2005. 13 p.

Al-Marwaee, Mohammed & Carter, David. **Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances.** Applied Energy 83, 2006. p. 774–788.

Hopkinson, R.G; Petherbridge, P.& Longmore, J. **Iluminação Natural.** Lisboa, Fundação Gulbenkian, 1975.

Jenkins, David & Muneer, Tariq. **Light-pipe prediction methods.** Applied Energy 79, 2004. p. 77–86.

Oakley, G; Riffat, S.B. & Shao, L. **Daylight Performance of Lightpipes.** Solar Energy. Vol. 69, N° 2, 2000. p. 89-98.

Swift, P.D; Lawlor, R.; Smith, G.B. & Gentle, A. **Retangular –section mirror light pipes.** Solar Energy Materials & Solar Cells 92. 2008. p. 969 - 975.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro e à CEBRACE pelo material cedido.