



## **Análise da Eficiência de um Duto de Luz Solar Integrado com um Sistema Simples de Iluminação Natural**

**Gandhi Escajadillo Toledo <sup>1</sup>, Alexandre Vieira Pelegrini <sup>1,2</sup>, João Barba Neto <sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Paraná  
(getpadesign500@gmail.com)

<sup>2</sup> Ph.D em Design Research, DADIN, Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(avpelegrini@gmail.com)

### **Resumo**

No Brasil, apesar das condições climáticas favoráveis, são poucas as pesquisas sobre os benefícios obtidos a partir do uso e integração de sistemas simples e avançados de iluminação natural no ambiente construído. O objetivo deste trabalho é analisar a eficiência de um duto de luz solar com dispositivos de controle de luz; integrado com um sistema de iluminação simples de iluminação: uma janela. O protótipo analisado está instalado numa casa de teste em Curitiba. Uma comparação do desempenho dos dispositivos de redirecionamento e sistema de controle de luz foi efetuado, em três tipos de céu: claro, semicoberto e parcialmente coberto. O PALN do protótipo também foi analisado. A maior eficiência para aumentar o nível de luz e atingir a iluminação mínima requerida é em condições de céu semicoberto. Para os dispositivos de redirecionamento de luz propostos, a eficiência é superior nos céu claro e semicoberto. O protótipo com todos os dispositivos de controle de luz apresenta um desempenho suficiente para completar a iluminação natural no ambiente.

Palavras-chave: Duto de luz solar. Performance. Economia de energia

Área Temática: 6 - Tecnologias Ambientais

## **Efficiency analysis of a Solar Light Pipe integrated with a simple natural lighting system**

### **Abstract**

*In Brazil, despite the favorable climatic conditions, there are few studies about the benefits using simple and advanced natural lighting systems integrated, in built environment. This paper aims to analyze the efficiency of a solar light pipe prototype with lighting control devices, and integrated with a simple lighting system: a window. The prototype was installed in a test house located in Curitiba-PR. A performance comparison of the lighting control system and redirection devices was carried out during three sky conditions: clear, partially covered and covered. The PALN prototype was also analyzed. The highest efficiency to increase of lighting levels to reach the minimum lighting required, corresponded to partially covered sky conditions. Light redirection devices had the best efficiency during clear and partially covered sky. The developed prototype with all the lighting control devices produces a considerable enhanced lighting performance, complementing natural lighting in indoor environment.*

*Key words: Light pipe, Performance. Energy saving.*

*Theme Area: 6 - Environmental Technologies*



## 1 Introdução

A demanda por energia elétrica no Brasil vem aumentando significativamente devido a diferentes fatores como o crescimento econômico, a inclusão social, e o incremento no consumo de serviços e produtos que demandam energia elétrica (MME, 2013). A iluminação elétrica representa uma significativa porcentagem dessa energia (EPE, 2013).

Brasil recebe maior incidência solar do que países que têm liderado o mercado mundial em utilização de energia solar (PURIM, 2008; SOUZA, 2005). Atualmente existem poucos projetos que usam a fonte de luz solar, em forma de aplicação de tecnologias que aproveitam os benefícios da iluminação natural. A maioria dos projetos estão focados na geração de iluminação artificial e não consideram a iluminação natural, como alternativa para reduzir o consumo energético (PURIM, 2008).

Através do uso de dutos de luz solar, sistemas avançados de iluminação natural; pode-se contribuir na redução do consumo de energia gasta em iluminação, mitigar as emissões de carbono associadas ao sistema de iluminação artificial e melhorar o nível de iluminação ao interior das edificações (MOHELNIKOVA, 2009; KIM & KIM 2010; KOMAR & DARULA, 2012). No âmbito nacional e internacional, diferentes pesquisas têm comprovado os benefícios dos dutos de luz solar, realçando o benefício da redução de consumo energético associado à iluminação artificial em horário diurno (LI et al, 2010; MAYHOUB e CARTER, 2012).

Os dutos de luz solar são tecnologias que captam a luz solar direta, bem como a luz difusa do céu, mediante um coletor e transportam esta luz ao interior dos ambientes através de um tubo de material de refletância elevada. A luz é finalmente distribuída através de um difusor (KIM & KIM, 2010). Estas tecnologias complementam a iluminação natural no interior dos ambientes, quando usados integradamente com sistemas simples de iluminação, como janelas (LI et al, 2010; SOUZA, 2005).

No cenário internacional, diferentes pesquisas tem desenvolvido estes sistemas e avaliado seu desempenho lumínico, sob diferentes parâmetros geométricos e ambientais (LI et al, 2010; KIM & KIM, 2010; KOMAR & DARULA, 2012). No cenário brasileiro, apesar das condições climáticas favoráveis, são poucas as pesquisas sobre os diferentes benefícios obtidos a partir do uso e integração destes sistemas no ambiente construído (SOUZA, 2003; SOUZA, 2005).

Para contribuir com a difusão do conhecimento sobre dutos de luz solar no contexto brasileiro, este artigo tem como objetivo analisar a eficiência de um duto de luz solar provido de dispositivos de controle de luz; integrado com um sistema de iluminação simples de iluminação natural: uma janela.

## 2 Método

Um protótipo de duto de luz solar foi configurado nesta pesquisa. Este protótipo está instalado em uma casa de teste no Campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizada em Curitiba/PR. A latitude desta cidade é de  $-25.51^{\circ}$  e a longitude de  $-49.27^{\circ}$ . O azimute da casa é  $21^{\circ}$ .

O duto de luz solar divide-se em três componentes principais: (1) o coletor, localizado no telhado da residência; (2) o duto de transporte de luz; e (3) o sistema de difusão e controle de luz. O limite superior do duto foi cortado em um ângulo  $30^{\circ}$ , para orientar este corte ao norte, e assim, otimizar a captação de luz. O coletor é de policarbonato (PC) com proteção UV, com 89% de transmitância, ao igual que o difusor. O tubo de alumínio está revestido internamente com uma lâmina Mylar®, com 98% de refletância. A relação diâmetro/comprimento do protótipo é de 1:3, com o comprimento do tubo  $C = 75$  cm e o diâmetro é de  $\varnothing = 25$  cm.



Configurou-se um sistema de controle da iluminação, este sistema permite a entrada total de luz (Figura 1), com os dispositivos totalmente abertos, para os momentos onde a luz total transmitida é requerida (Figura 1a). A segunda opção do sistema de controle de luz corresponde ao fechamento parcial mediante duas peças de acrílico semitransparente leitoso com 50 % de transmitância (Figura 1b), este dispositivo é tem como finalidade ser usado nos períodos onde a luz total transmitida pelo tubo não é necessária. Um sistema de fechamento da entrada da luz do difusor (Figura 1c), foi considerado para comparar o nível de luz na sala sem o uso do duto solar, e considerando só a luz da janela localizada no ambiente analisado.

Figura 1 – Difusor claro, semitransparente e fechado



No protótipo foram instalados dois dispositivos de redirecionamento de luz natural, para avaliar a capacidade destes dispositivos para redirecionar a luz à outros planos de trabalho, onde iluminação adicional seria requerida. O primeiro dispositivo é uma peça de 10 cm x 20 cm, com um ângulo de  $30^{\circ}$  com relação ao eixo y (Figura 2a). O segundo dispositivo é maior, abrange mais área da entrada de luz. Esta peça apresenta duas angulações: A primeira angulação é de  $30^{\circ}$ , com dimensões de 25 x 25 cm com relação ao eixo y. A segunda angulação é de  $30^{\circ}$  com relação ao eixo y, as dimensões são de 25 x 15 cm (Figura 2c). Ambos os dispositivos estão revestidos com uma lâmina de 95 % de refletância. A Figura 2 mostra estes dois dispositivos.

Figura 2 – Dispositivos de Redirecionamento de Luz



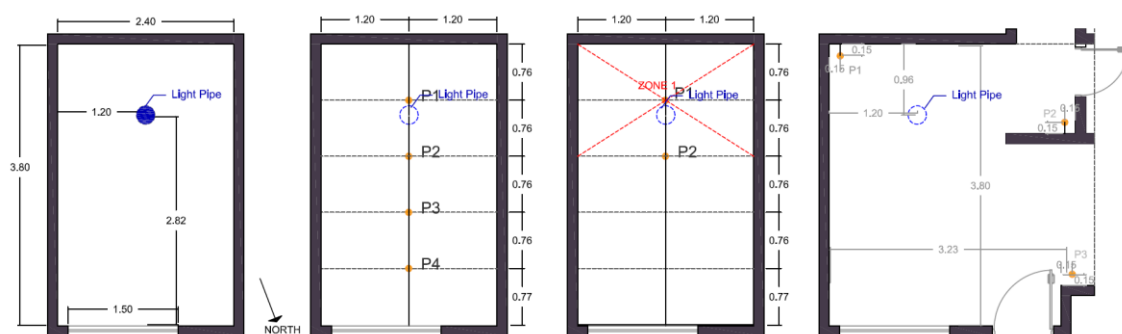
As medições foram realizadas no período diurno, entre os meses de Junho e Agosto. Todos os resultados foram organizados de acordo com a eleição de 3 tipos de céu: céu claro, céu parcialmente coberto e céu coberto.

O ambiente onde foram realizadas as medições tem como dimensões (3.82 x 2.40 x 2.60) m. O percentual da janela na fachada (PJF) é de 30%; o vidro da janela possui 88% de transmitância. A refletância do piso é igual a 45 %; do forro é de 25 % e das paredes é de 70%. O eixo central do duto de luz está a 2.82 m de distância da janela com relação ao eixo y e a 1.2 m com relação à janela no eixo x.

Como pontos de análise foram estabelecidos quatro pontos de referência, localizados à altura do plano de trabalho, a 75 cm de altura do nível do piso (Figura 3). Para a análise de resultados foram tomados somente os pontos P1 e P2 (Figura 3), por ser estes pontos os que recebem mais influência lumínica do duto de luz e não da janela. Como equipamento para as medições foram utilizados quatro luxímetros LX1330B, posicionados nos pontos de análise.



Figura 3 – Dimensões da Sala e Pontos de Análise



Também foi calculado o Percentual de Aproveitamento de Luz (PALN) do protótipo do duto de luz solar. Este método pode ser utilizado com o fim de analisar uma estimativa de economia de energia. Este método de cálculo, proposto por Souza (2003), visa estimar a quantidade de energia economizada através da utilização da luz natural.

O PALN é obtido através do período em que a luz natural é suficiente para atender as necessidades de uma determinada tarefa a ser realizada num ambiente, ou para complementar a iluminação artificial. Para este trabalho o difusor de maior transmitância foi tomado como base para a análise do PALN. Para este caso empregou-se o PALN por substituição, onde a economia depende da relação que existe entre o número de horas em que o nível da luz natural é maior que a iluminância de projeto pelo número total de horas (n) de realização de tarefas no ambiente. Estes parâmetros estão na Equação 1.

$$PALN_s = \frac{\sum_{i=0}^n E_{ln} \geq E_p}{n} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:  $E_{ln}$  é a iluminância média proporcionada pela luz natural;  $E_p$  é a iluminância do projeto e n é o número de horas analisadas. Neste caso foi considerado como valor mínimo de iluminação, 300 lux, de acordo à Norma 8995 (ABNT, 2013).

Neste trabalho não foi calculado o PALN geral, o percentual usando a janela e o duto de luz. Com base nas medições conduzidas, foi calculado o PALN obtido a partir do acréscimo de luz através do protótipo, onde a iluminação mínima é atingida devido à presença do duto de luz solar.

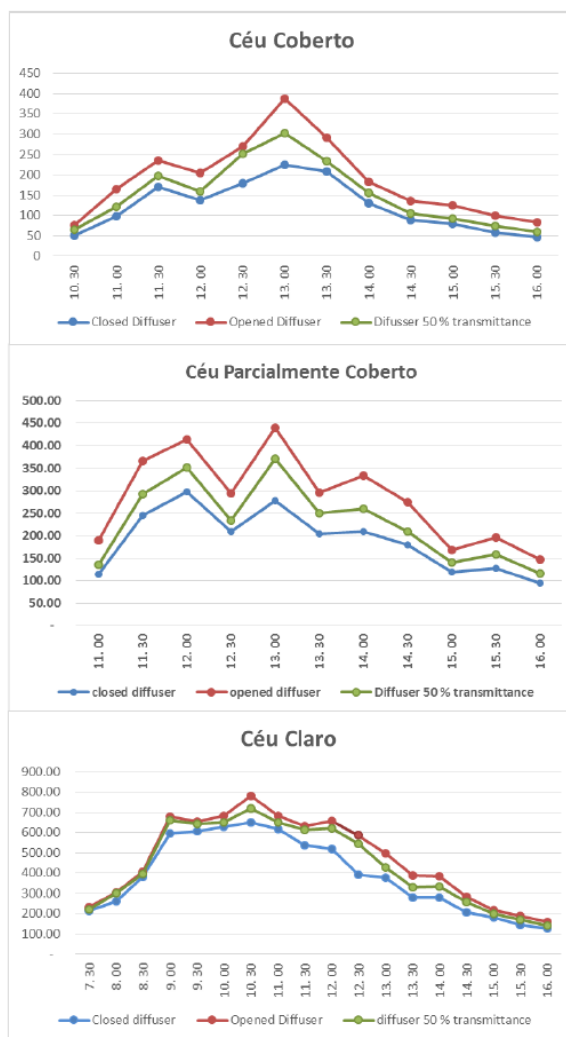
Os dados do arquivo climático TRY (*Test Reference Year*) para a cidade de Curitiba, foram analisados. Desta forma foi obtida a frequência de tipo de céu para todos os meses do ano para a cidade de Curitiba (LABEEE, 2013). O *Test Reference Year* (TRY) é um arquivo com dados climáticos e horários de um ano típico usado por softwares de simulação (PEREIRA et al, 2004).

### 3 Resultados

De todos os dias analisados, foram divididos estes dias de acordo aos três tipos de céu e foi calculado uma média nas três situações: Os valores das iluminâncias com o difusor claro de transmitância elevada; os valores do difusor semitransparente e os valores com o difusor fechado (Figura 4).



Figura 4 – Comparação dos valores das iluminâncias com os três difusores para os três tipos de céu.



Em todas as condições estava presente a luz proveniente da janela no ambiente. Nos gráficos a seguir os valores da linha azul correspondem ao ambiente com o difusor fechado; os valores em verde, ao difusor semitransparente; e os valores em vermelho pertencem à luz no ambiente com o difusor claro (Figura 4).

A Figura 4 apresenta a comparação dos valores das iluminâncias nas três situações de iluminação anteriormente mencionadas, para os três tipos de céu. No céu coberto é atingido um acréscimo de 72 % no nível de iluminâncias, com o difusor claro em comparação com o difusor fechado. No céu de tipo semicoberto o acréscimo é de 58 %. Para o céu claro o incremento mais elevado é de 49 %.

Com base aos valores analisados, afirma-se que o melhor aproveitamento de luz natural, com relação ao aumento das iluminâncias para atingir a iluminância mínima corresponde ao céu semicoberto. Para o céu claro, a iluminação natural através da janela é suficiente para atingir a iluminação mínima requerida, de acordo com a norma NBR 8995 (ABNT, 2013), para a maioria dos horários. Para o céu coberto, em comparação com os outros céus, observa-se um desempenho mais baixo. A luz proveniente do duto contribui para a melhor distribuição da iluminação natural no ambiente.

Na Figura 4, observa-se que a iluminação geral no ambiente, independente do uso do duto de luz solar, é mais elevada no tipo de céu claro; devido à iluminação externa e a radiação solar direta, características deste tipo de céu.

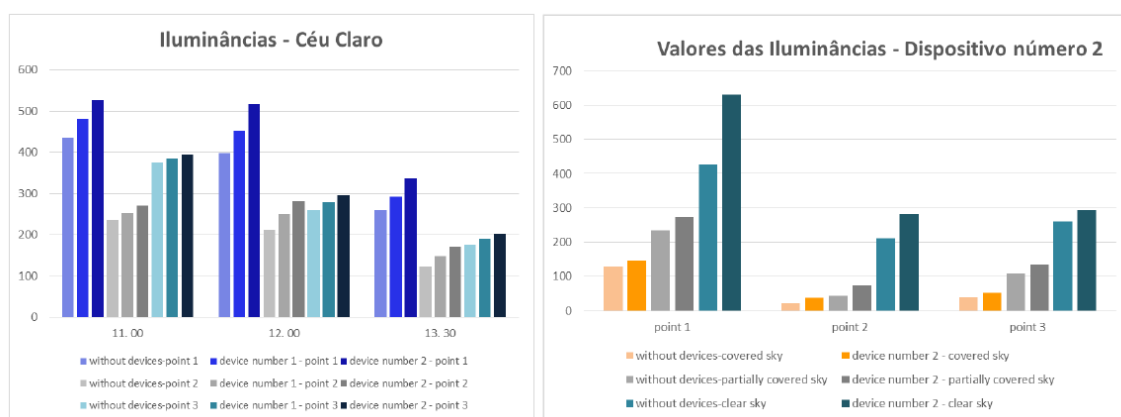




O difusor semitransparente analisado, pode ser utilizado nos casos onde precisa-se regular a iluminação elevada no ambiente, embora nos dias de céu claro e radiação solar direta a diferença dos valores de iluminação entre o difusor claro e semitransparente não é elevado (Figura 4). Nos dias de céu semicoberto com iluminação externa elevada, o difusor semitransparente pode reduzir o nível de luz em determinados horários, ainda que só em porcentagem pequena. Para os dias de céu Coberto, não é recomendável o uso do difusor semitransparente.

Os dispositivos de redirecionamento de luz apresentaram uma boa eficiência em condições de céu claro, principalmente o dispositivo de maiores dimensões. Em base a todos os dias analisados, foi analisado este tipo de céu (claro), tomando uma média de todos os registros efetuados por ambos os dispositivos (Figura 5).

Figura 5 – Valores das iluminâncias com os dispositivos de redirecionamento de luz para o Céu claro.



Para o céu coberto (Figura 5), o dispositivo número 1 apresentou o menor desempenho em todos os casos, sendo o incremento de iluminâncias através do dispositivo número 2 mais elevado. A Figura 5 apresenta a média dos valores das iluminâncias de todos os dias registrados com os dois dispositivos para o céu claro. Em todos os casos observam-se valores das iluminâncias mais elevados nos pontos P1, P3 e P2 respectivamente, independente do uso do tipo de dispositivo, devido à distância dos planos de trabalho do protótipo e à presença da janela (Figura 5).

A Figura 5 apresenta a comparação da eficiência do dispositivo 2, de maior área para os três tipos de céu. Estes valores são equivalentes aos máximos valores registrados para cada tipo de céu às 12.00 horas. Esta comparação corresponde aos três pontos analisados, localizados em três planos de trabalho diferentes. As barras em laranja, cinza e azul correspondem aos céus coberto, semicoberto e claro respectivamente. Com o dispositivo número 2, pode-se aumentar até em 205 lux a iluminação no plano de trabalho mais próximo ao duto de luz solar, em condições de céu claro.

A partir do uso do difusor aberto e claro, atinge-se em mais horários a iluminância mínima requerida, no céu semicoberto. Como mostrado na Tabela 1, o PALN neste tipo de céu é de 50 %. Isto significa que para este tipo de céu a economia de energia será melhor.

Tabela 1 – Porcentagem de PALN para cada tipo de Céu

Tipo de Céu	Porcentagem
Céu Claro	28 %
Céu Semicoberto	50 %
Céu Coberto	30 %



Em alguns horários a iluminância mínima já é atingida só com a janela, por isto, o PALN seria mais elevado se fosse tomado o PALN geral analisando integralmente a iluminação fornecida pela janela e o duto de luz.

Tabela 2 – Mês do ano e PALN equivalente

Mês	PALN (%)
Janeiro	40 %
Fevereiro	39 %
Março	36 %
Abril	37 %
Maio	34 %
Junho	32 %
Julho	34 %
Agosto	34 %
Setembro	33 %
Outubro	35 %
Novembro	45 %
Dezembro	38 %

A Tabela 2 mostra os resultados do PALN para todo o ano. Os maiores aproveitamentos de luz, correspondem à estação de verão e os valores mais baixos aos meses de inverno. O máximo PALN calculado é para o mês de novembro e o mínimo corresponde ao mês de junho (Tabela 2).

#### 4 Conclusões

Um duto de luz solar, com as diferentes variáveis e dispositivos de iluminação tem sido testado integralmente com a luz fornecida pela janela. Nos casos reais onde os dutos de luz são instalados existem outros tipos de iluminação simples nos ambientes, por esta razão considera-se que o protótipo analisado, ajuda a conhecer a eficiência do desempenho do duto de luz nestes ambientes.

Nesta pesquisa, é importante destacar que as baixas refletâncias dos materiais do ambiente da sala, puderam influenciar e diminuir a eficiência do sistema. Os valores de iluminação estão relacionados com a área da janela presente no ambiente. Para outras áreas ou geometrias, os resultados seriam diferentes. Este cálculo corresponde às condições ambientais de Curitiba e da casa de teste onde está instalado o protótipo.

Apesar das limitações anteriormente mencionadas e ao fato que as medições foram realizadas durante o período do inverno, observa-se que a iluminação natural acrescentada no ambiente através do duto de luz solar foi considerável. Em condições de céu semicoberto a iluminância mínima requerida é atingida com maior eficiência. Comprovou-se também o desempenho do difusor semitransparente em condições de céu coberto e claro.

Entre os dois dispositivos de redirecionamento de luz propostos, a melhor eficiência corresponde ao dispositivo número 2, de maior área e por este motivo, de capacidade maior de reflexão da luz natural. Os acréscimos mais elevados de luz foram observados durante o tipo de céu claro e semicoberto e nos pontos mais próximo ao duto de luz solar.

#### Referências

ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 8995-ISSO-CIE – **Iluminação de Ambientes de Trabalho**, Rio de Janeiro, 2013.



EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção de Demanda de Energia Elétrica para os próximos 10 anos (2013 – 2022).** 2012. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20130117\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20130117_1.pdf)> Acesso em: 07/01/2013.

KIM G.; KIM J. “*Overview and New Developments in Optical Daylighting Systems for Building a Healthy Indoor Environment*”. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, Feb. 2010, pg. 256–269.

KOMAR L.; DARULA, S. “*Determination of the Light Tube Efficiency for Selected Overcast Sky Types*”. **Solar Energy**, v.86, n.1, Jan. 2012, pg. 157–163.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Arquivos climático TRY de Curitiba. Disponível em: < <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. Acesso em: 28/02/2013.

LI, D. H. W; TSANG, E. K. W; CHEUNG, K. L; TAM, C. O. “*An Analysis of Light-pipe System via Full-scale Measurements*”. **Applied Energy**, v. 87, n.1, Mar. 2010, pG. 799–805.

MAYHOUB, M.; CARTER, D. “*A Feasibility Study for Hybrid Lighting Systems*”. **Building and Environment**, v. 53, Jul, 2012, pg. 83–94.

MME – Ministério de Minas e Energia (2013). **Balanço Energético Nacional 2013.** Disponível em :< [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2013.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf) >. Acesso em: 08/08/2013.

MOHELNIKOVA, J. “*Tubular Light Guide Evaluation*”. **Building and Environment**, v. 44, n. 10, Oct. 2009, pg. 2193–2200.

PURIM, C. A. **Desenvolvimento de um Coletor Solar para Iluminação Direta com Fibra Óptica.** Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia-Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2008.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz Natural através da utilização de Sistemas automáticos de controle para Economia de energia elétrica.** Florianópolis, 2003. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2003.

SOUZA, D. A. **Avaliação Teórica e Experimental do Desempenho de Duto de Luz, na Cidade de São Carlos – SP.** Dissertação de Mestrado-Programa de Pós- Graduação em Construção Civil-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.