MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO EXPERIMENTAL PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS GERADOS POR UM ALGORITMO COMPUTACIONAL QUE UTILIZA O MÉTODO INVERSO E PELA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE LÚMENS PARA O DIMENSIONAMENTO DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL EM AMBIENTES FECHADOS

por

Marlon da Silva Bem

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 12 de julho de 2013.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO EXPERIMENTAL PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS GERADOS POR UM ALGORITMO COMPUTACIONAL QUE UTILIZA O MÉTODO INVERSO E PELA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE LÚMENS PARA O DIMENSIONAMENTO DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL EM AMBIENTES FECHADOS.

por

Marlon da Silva Bem

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profª. Drª. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Profª. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues.
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Flavio T. Van Der Laan

Profª. Adriane Prisco Petry

Profª. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 12 de julho de 2013.

Dedico este trabalho a minha família,
minha base, meu exemplo!

A minha namorada Juliana,
que conheci ao longo desta caminhada e
que continuará ao meu lado ao longo da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Gelson Luis Bem e Beatriz T. da Silva Bem, aos meus irmãos, Bruno da Silva Bem e Bianca da Silva Bem, por todo o amor, carinho e apoio.

A minha Juliana Andersson Moreira, por todos os momentos felizes ao longo destes anos, pela compreensão nos meus momentos de ausência, e por fazer parte da minha vida!

A meus sogros, Eduardo e Cristina, ao meu cunhado Rodrigo, por terem me apoiado e me acolhido.

A minha orientadora Letícia Jenisch Rodrigues e ao co-orientador e professor Paulo Smith Schneider, pelo excelente apoio, orientação e amizade.

Ao técnico João Batista da Rosa, colegas e bolsistas do Laboratório de Estudos Térmicos e Energéticos (LETA), pelo indispensável esforço na construção deste experimento.

Aos amigos que realizei nestes anos de universidade e que me acompanharam ao longo deste caminho.

Se tudo na vida fossem alegrias, as pessoas não dariam valor a FELICIDADE.
Às vezes é preciso chorar para sabermos o quanto é bom SORRIR.
É preciso sentir SAUDADE para sabermos o quanto GOSTAMOS DE ALGUÉM.
Porque quando temos tudo nada parece ter VALOR.
A vida é baseada em um ANTES, um DURANTE e um DEPOIS...
Por isso viva o HOJE. Esqueça o ONTEM e deixe DEUS decidir o seu AMANHÃ!

Autor Desconhecido.

BEM, M.S. **Projeto experimental para comparação de resultados gerados por um algoritmo computacional que utiliza o método inverso e pela aplicação do método de lúmens para o dimensionamento de iluminação artificial em ambientes fechados.** 2013. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo verificar experimentalmente dois cenários de iluminação artificial, um gerado por um algoritmo computacional que utiliza o método inverso e outro baseado no método dos lúmens. Para tanto, se remodelou uma bancada experimental com o intuito de realizar o dimensionamento da iluminação artificial em ambientes fechados. A cavidade foi remodelada com placas de MDF cru, pintadas com tinta acrílica fosca de refletividade conhecida. Foram feitos dois tetos: um com uma distribuição da iluminação resultante da aplicação do método dos lúmens, e outro resultante da aplicação do algoritmo computacional otimizado por Cassol, 2009, para avaliação e comparação da uniformidade da iluminância no plano de trabalho. Utilizou-se lâmpadas incandescentes de 15W e 40W, para avaliação da dependência da potência em relação à iluminância medida no plano de trabalho na solução do algoritmo computacional. Os resultados obtidos se apresentam em concordância com os resultados gerados pelo algoritmo, evidenciando a eficácia do método inverso quando aplicado a problemas de iluminação artificial e a adequação da bancada remodelada proposta, para fins de avaliação da uniformidade da iluminação.

PALAVRAS-CHAVE: (iluminação artificial, método inverso, projeto experimental)

BEM, M.S. **Experimental design for comparison of results generated by a computer algorithm that uses the reverse and method for implementing the method for sizing lumens artificial lighting in closed indoors.** 2013. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

This work aims to experimentally assess two scenarios for artificial lighting, one generated by an algorithm that uses the inverse method and the other based on the method of lumens. For this purpose, one was remodeled experimental bench in order to carry out the scaling of the artificial light in indoor environments. The cavity was remodeled with raw MDF boards, repainted with acrylic matte reflectivity known. Two ceilings were made: one with a lighting distribution symmetrically, method lumens, and other non-symmetrical, inverse method, for evaluation and comparison of the uniformity of illuminance on the work plan. We used incandescent 15W and 40W to evaluate the dependence of power in relation to measure illuminance in the work plan in the solution of the inverse method. The results are presented in accordance with the results generated by the algorithm, showing the effectiveness of the inverse method when applied to problems of artificial lighting and the adequacy of the bench remodeled proposal for evaluation of the uniformity of illumination.

KEYWORDS: (artificial lighting, inverse method, experimental design)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO **1**
2. OBJETIVOS **1**
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **1**
4. CASO DE ESTUDO **2**
5. METODOLOGIA **3**
5.1 Reconstrução do Experimento 3
5.2 Metodologia de Medição. 7
6. RESULTADOS **10**
6.1 Análise dos resultados. 10
6.2 Análise das incertezas de medição. 12
7. CONCLUSÃO **14**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **14**
TRABALHOS PUBLICADOS **15**
ANEXO **15**

1. INTRODUÇÃO

Em ambientes fechados uma boa distribuição da iluminação garante mais conforto aos seus ocupantes, sem que haja regiões mais claras em contraste com regiões mais escuras. Essa uniformidade ajuda as pessoas a relaxarem, fazendo com que a concentração e criação sejam facilitadas, e também que o consumo de energia elétrica seja otimizado.

Como citado em [Cassol, 2009], em estudos feitos por [IESNA, 2000], mostrou os efeitos da distribuição espacial de luz sobre a escolha dos locais que clientes de uma cafeteria preferem para sentar. O comportamento observado é de que as pessoas escolhem sempre locais de frente para áreas claras. Quando as áreas escuras se tornam claras, e vice-versa, a escolha migra sempre para a área mais clara.

Salas de cirurgia em hospitais são um bom exemplo de como a distribuição da iluminação na região de trabalho precisa ser eficazmente projetada. Por exemplo, na área que se fará a cirurgia, deve-se ter bastante intensidade de luz, porém, com uma boa uniformidade, para que não atrapalhe a visão do cirurgião caso ele venha a olhar para outro ponto da sala onde a luz seja menos intensa. Outro fator relevante no que concerne à intensidade de luz, é a necessidade de que a mesma decaia gradualmente a fim de não gerar desconfortos oriundos de uma mudança repentina, de uma região clara para outra escura.

Além das pessoas, as plantas também sofrem grande influência dos níveis de iluminação a que estão sujeitas. O crescimento das mesmas é definido pela intensidade e direção das fontes luminosas, determinando a inclinação de caules e troncos e o ciclo de respiração vegetal [Seewald, 2006].

Todos os campos de trabalho devem contar com uma iluminação adequada às necessidades dos usuários. Portanto, o estudo da distribuição de iluminação em ambientes fechados é de grande importância a fim de garantir conforto aos que estarão presentes neste ambiente.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo verificar experimentalmente dois cenários de iluminação artificial, um deles gerado a partir de um algoritmo computacional que utiliza o método inverso desenvolvido por Cassol, 2009, e outro baseado na solução da aplicação do método dos lúmens. Para realizar esta verificação, foi reconstruída uma bancada experimental, mantendo as dimensões utilizadas por Andrioty, 2012. A cavidade foi remodelada com novos parâmetros de refletividade. O campo de luminosidade no plano de trabalho foi avaliado em termos de uniformidade da iluminância, analisando-se o mesmo com base em duas diferentes disposições das lâmpadas, bem como suas potências distintas entre as configurações verificadas. Como parte do estudo, erros de medição pertinentes também foram qualificados e quantificados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Procedimentos para cálculos de iluminação em ambientes são encontrados em diversos estudos, mas principalmente nas áreas de arquitetura, construção civil e “design” de ambientes, sempre visando uma melhor utilização dos recursos de iluminação, sejam eles naturais ou artificiais.

O método de lúmens, apresentado pelo catálogo [Philips, 1981], em [Iesna, 2000] e em [Osram, 2005] na forma de manual, é uma forma prática de calcular a disposição das lâmpadas, já que se baseia em uma formulação algébrica na qual o fluxo luminoso gerado pelas lâmpadas instaladas deve ser igual ao fluxo luminoso desejado no plano de trabalho. No

entanto, este método possui restrições, ele não assegura que a configuração encontrada gera um fluxo luminoso uniforme ao longo do plano de trabalho, porque há perdas envolvidas que não são consideradas e principalmente devido ao comportamento não linear da radiação em cavidades.

Na expectativa de melhores resultados devido as restrições do método dos lúmens, várias propostas numéricas podem ser encontradas. Uma delas, vista no trabalho de [Costa *et al.*, 2000], aborda a posição das luminárias baseado no método de análise inversa, o qual apresenta vantagens nos resultados encontrados em relação ao Método de Lúmens. De forma semelhante, e que utiliza o método inverso, [Schneider e França, 2004], e posteriormente [Seewald, 2006], propõem resolver o problema de iluminação, utilizando as equações de radiação em cavidades, e empregando o método TSVD (*Truncated Singular Value Decomposition*) para regularizar o sistema de equações. Esses trabalhos têm por objetivo determinar um arranjo de lâmpadas, aplicando uma condição de iluminação prescrita na superfície de trabalho.

Utilizando também o método inverso [Cassol, 2009], aplicou um método de otimização no algoritmo numérico, em substituição ao método de regularização *TSVD*. Esse método, é denominado Otimização Extrema Generalizada *(GEO – Generalized Extremal Optimization)* e procura um mínimo ou um máximo global, dependendo do caso. A utilização desse método proporcionou resultados satisfatórios, com desvios máximos próximos aos encontrados anteriormente.

Já na área experimental [Andrioty, 2012] montou uma bancada em escala reduzida para aplicar os resultados encontrados na simulação de [Cassol, 2009]. A cavidade montada foi projetada com as seguintes medidas 2,25 x 1,80 x 0,45 m, mantendo a relação 1 x 0,8 x 0,2, que foi utilizada na simulação. A distribuição que foi escolhida das fontes de iluminação no teto foi à configuração de 32 lâmpadas e a refletividade das tintas utilizadas ficaram bem próximas das simuladas. Este experimento, foi o primeiro na área e os resultados encontrados estavam próximos aos simulados. Mostrando assim, a eficiência da aplicação do método inverso para conseguir uma uniformidade de iluminação no plano de trabalho.

4. CASO DE ESTUDO

Os parâmetros utilizados na reconstrução da bancada foram mantidos porque se baseiam nas características da geometria simulada no algoritmo em [Cassol, 2009]. Assim sendo, faz-se uma breve descrição das características principais da cavidade. O ambiente possui a forma de paralelepípedo, sem janelas, apenas com iluminação artificial oriunda do teto da mesma. As dimensões consideradas na simulação são de L= 15m (eixo x), W=12m (eixo y) e H=3m (eixo z). Suas dimensões foram normalizadas em função do seu comprimento. Assim, obteve-se a relação de 1x0,8x0,2. Esta operação propicia que os resultados encontrados no algoritmo sejam estendidos a outras dimensões, desde que essa proporcionalidade seja observada. Assim, na Tabela 4.1 apresentam-se as dimensões da cavidade, bem como a refletividade, já conhecida, das tintas utilizadas.

Tabela 4.1 – Características da bancada experimental e da cavidade simulada em [Cassol, 2009].

Parâmetros	**Valores**	
	Experimental	[Cassol, 2009]
Comprimento(L)	2,25m	15m
Largura (W)	1,80m	12m
Altura (H)	0,45m	3m
Refletividade da Parede	0,497	0,5
Refletividade do Piso	0,497	0,5
Refletividade do Teto	0,038	0,1

As superfícies internas foram diferenciadas em três tipos, sendo eles: paredes laterais, piso e teto. Porém, diferentemente da configuração utilizada por [Andrioty, 2012], onde as fontes luminosas foram afixadas ao teto da cavidade, utilizou-se a configuração em que as fontes luminosas foram dispostas no piso da bancada. Outra mudança significativa se deu com a utilização de outra tinta no plano de trabalho, com refletividade bem mais próxima àquela empregada na simulação de [Cassol, 2009].

5. METODOLOGIA

Neste capitulo serão descritas as etapas que envolvem a reconstrução da bancada, a realização das medidas necessárias à mensuração dos resultados finais, assim como a análise do sensor utilizado e a descrição dos pontos da cavidade utilizados para efetuar as medições.

5.1 Reconstrução do Experimento

Como base para a construção da nova bancada de trabalho foi utilizada a bancada construída por [Andrioty, 2012], bem como foram mantidas todas as medidas referentes ao dimensionamento da mesma. Ressalta-se apenas uma diferença no que concerne à altura do interior da bancada, tendo sido esta aumentada em 14 centímetros com o objetivo, primeiramente, de adaptar ao modelo computacional, devido às fontes luminosas e o sensor utilizado serem planos, ao experimento. A Figura 5.1 mostra a elevação da altura da cavidade realizada por [Andrioty, 2012], devido ao sensor, ao conjunto lâmpadas e soquetes. A Figura 5.2 mostra as dimensões finas da cavidade.

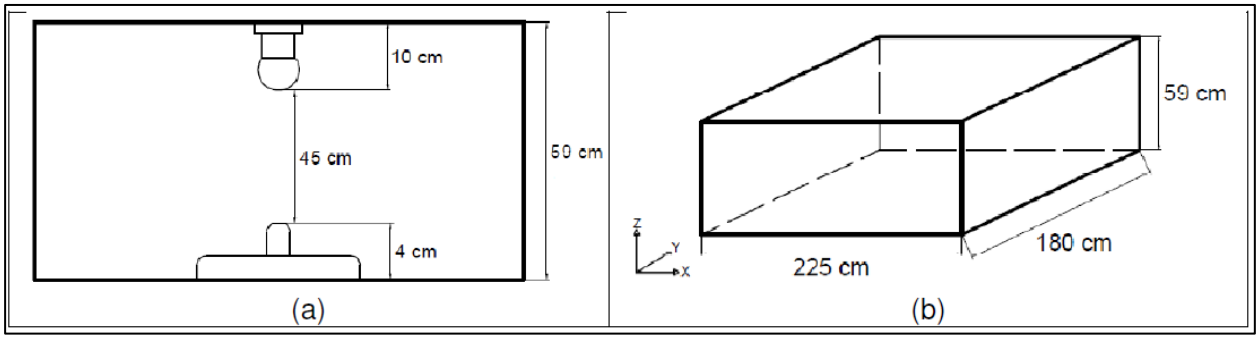


Figura 5.1: (a) Esquema dos acréscimos na altura, devido ao sensor e ao conjunto soquete e lâmpada. (b) Esquema das dimensões finais do experimento. Fonte Andrioty, 2012.

Foram utilizadas, para a reconstrução da bancada, as chapas compostas por MDF cru com 15 mm de espessura, que configuram o teto, piso e paredes laterais.

O problema de deflexão encontrado por [Andrioty, 2012] ocorreu devido ao peso do próprio teto da estrutura. Como forma de solucionar esta deformidade foram utilizados três tubos de aço, com perfil quadrado de 30 mm de lado e com espessura de 4 mm. Nos pontos em que se dá a união do teto com os tubos descritos, utilizou-se 5 parafusos de cabeça sextavada de 6x60 mm e 5 porcas de 6mm. Estes parafusos foram fixados através de furos passantes entre o teto e o tubo, deste modo não se fez necessária à utilização de colunas para sustentação do mesmo.

Devido às modificações realizadas, optou-se por inverter a configuração de fixação das lâmpadas e seus respectivos soquetes, transpondo os mesmos do teto para o piso. Aliada com a mudança de configuração estudou-se uma forma mais eficaz de alocar os soquetes, solução esta que possibilitaria uma mudança facilitada quanto à disposição dos mesmos no interior da

cavidade facilitando assim os estudos propostos. A solução ótima resultou em fazer-se furos para encaixe dos soquetes, ou seja, não sendo mais preciso fixa-los a nenhuma parte da bancada. Desta forma foram alcançadas duas melhorias adicionais à reconstrução da caixa, sendo a primeira a facilidade para modificações da disposição das fontes luminosas, e a segunda a aproximação das lâmpadas ao teto, já que essas eram consideradas planas no modelo computacional. A configuração descrita pode ser melhor compreendida através da Figura 5.2.

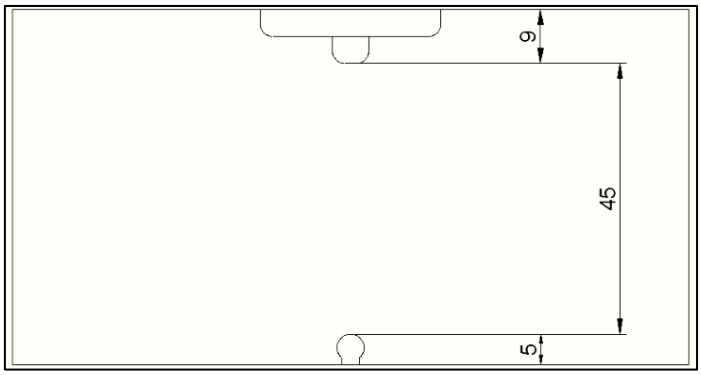


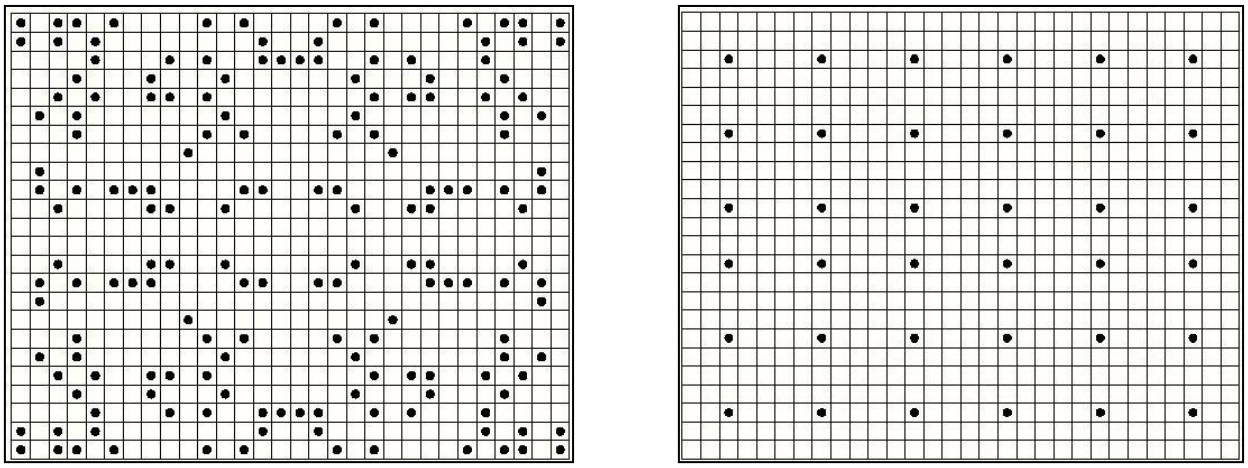
Figura 5.2: Posicionamento da nova bancada. Medidas em cm.

Com o intuito de fixar o teto da caixa à parede lateral, utilizou-se três suportes, Figura 5.3, de formato triangular, medindo 190 mm de base e 190 mm de altura. Estes foram unidos ao teto com dois parafusos de cabeça sextavada 5x50 mm, fixos à parede lateral com dois parafusos fenda de cabeça chata 5x45 mm, com rosca soberba. A fim de unir a parede lateral ao piso, também foram utilizados três suportes, unidos à parede lateral da mesma forma que a utilizada na junção da mesma com o teto. Entretanto, na união dos suportes ao piso, foram colocados pinos guias com 6 mm de espessura, que se encaixam em furos passantes feitos no próprio piso, facilitando a sua substituição. Objetivando evitar o surgimento de frestas provenientes da união piso *versus* parede lateral *versus* teto, foi adicionado um polímero de fácil deformação em torno de toda a parede lateral. Deste modo, evitou-se tanto a fuga da luz oriunda do interior da caixa quanto à entrada da luz externa.

Figura 5.3: Foto da bancada mostrando a união entre laterais, teto e piso.

Na tese de Cassol, 2009 várias soluções foram encontradas para que haja uma iluminação mais uniforme no plano de trabalho, sendo esta uma resultante direta da escolha do número de fontes luminosas - um dado de entrada no método inverso. Nesta análise escolheu-se a distribuição das fontes de iluminação com um conjunto de 36 lâmpadas, 9 lâmpadas por

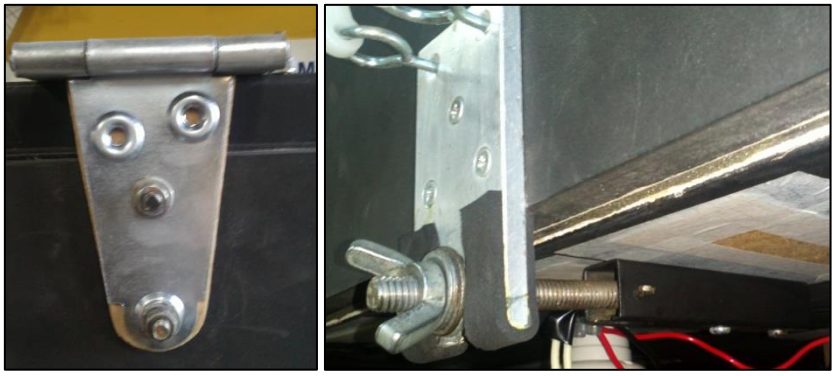
quadrante, todas possuindo a mesma potência, a fim de facilitar a montagem e comparção entre os resultados. Igualmente baseando-se em resultados obtidos por Cassol, 2009, configurações com tal alinhamento, normalmente soluções relacionadas ao Método dos Lúmens, não geram uma iluminância tão uniforme no plano de trabalho. A Figura 5.4(a) mostra as posições das fontes luminosas, que são várias soluções obtidas do modelo computacional de Cassol, 2009, enquanto que a Figura 5.4(b) mostra outra configuração das fontes luminosas, solução obtida utilizando o método dos lúmens.



(a) (b)

Figura 5.4: (a) distribuição das lâmpadas assimétrica e (b) distribuição simétrica.

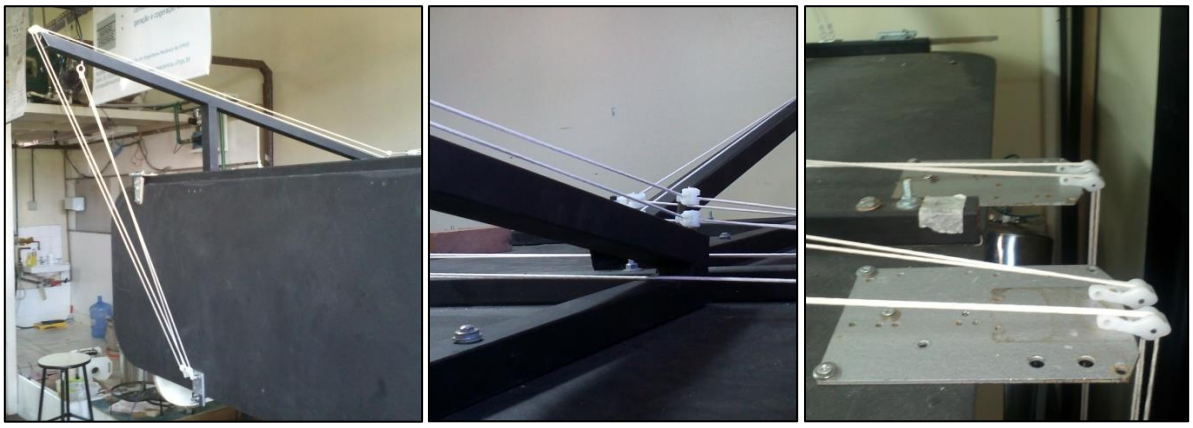
A montagem de ambas as portas foi analisada de maneira mais cuidadosa, para impedir a fuga de luz bem como evitar a entrada de luminosidade externa. O mesmo polímero de fácil deformação foi utilizado, fixado tanto ao teto quanto ao piso. No vértice da união entre cada porta e o teto utilizou-se três dobradiças tipo leme, ver Figura 5.5(a), com a característica de apresentar maior robustez que a utilizada anteriormente por [Andrioty, 2012]. As dobradiças foram fixadas na porta com dois parafusos de cabeça chata de 6x30 mm e porca de 6mm. Na parte superior da caixa, esta mesma dobradiça foi fixada com dois parafusos fenda de 6x50 mm, no tubo de aço que sustenta o teto. Para o fechamento da porta e evitar um possível surgimento de frestas, utilizou-se o mecanismo de fechamento mostrado na Figura 6.4(b). Foram feitos três mecanismos para cada porta. Constituídos de chapas de alumínio com dimensões de 50x95 mm e 6 mm de espessura, de tubos de aço de perfil quadrado de 20 mm, com comprimento de 100 mm e espessura de 1,5 mm, na extremidade deste tubo um pino fixa o parafuso sem cabeça. Cada chapa de alumínio é fixa às portas com 5 parafusos de rosca soberba de 4x17mm. Já, o tubo foram fixos com dois parafusos de 4x30 mm.



(a) (b)

Figura 5.5: (a) dobradiça tipo leme e (b) sistema para fechamento da porta

Como a porta abre para cima, teve-se que montar um mecanismo com contrapeso para facilitar a sua abertura. Fez-se quatro suportes mostrados na Figura 5.6(a). Foram colocadas duas roldanas na parte superior de cada suporte e duas roldanas na base de cada suporte, ver Figura 5.6(a) e (b). Também se utilizou 2 roldanas móveis presas nas chapas que fecham a porta, Figura 5.6(a). Cada porta utilizou um contrapeso com cerca de 5 kg, estes foram colocados em uma das laterais da bancada, abaixo do suporte mostrado na Figura 5.6(c).



(a) (b) (c)

Figura 5.6: (a) suporte montado para ajuda na abertura da porta, (b) roldanas fixas na base do suporte e (c) suporte na lateral da bancada para fixar contrapeso.

Uma das fontes luminosas utilizadas neste experimento é a mesma que [Andrioty, 2012] usou na sua bancada, que são lâmpadas incandescentes de 15 W de potência, de bulbo leitoso para diminuir o efeito de luz pontual. Para verificar a independência da potência na solução obtida pelo modelo computacional de Cassol, 2009, também se utilizou lâmpadas incandescentes de bulbo leitoso de 40 W. Dados técnicos das lâmpadas utilizadas podem ser vistos no anexo 1. Em ambos os casos, utilizou-se um circuito paralelo para ligação das lâmpadas, sendo assim manteve-se a diferença de potencial elétrico igual em todos os pontos. As lâmpadas utilizadas no experimento possuem as características mostradas abaixo na Tabela 5.1

Tabela 5.1: Características das lâmpadas utilizadas na bancada – Marca Sadokin.

Característica	**Valor**	**Valor**
Tipo	Incandescente	Incandescente
Potência	15 W	40 W
Tensão de operação nominal	220 V	220 V
Modelo	Bolinha	Bolinha
Tipo de bulbo	Leitoso	Leitoso
Tipo de soquete	E27	E27

As superfícies internas da bancada foram pintadas com cores que já se encontravam disponíveis no LETA, Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos. As superfícies foram lixadas, limpas e então pintadas. Utilizou-se três demãos, para tornar mais uniforme a pintura nas superfícies. As refletividades das tintas utilizadas, já eram conhecidas, para parede e piso se utilizou a tinta com refletividade de 0,497, bem próxima a simulada no algoritmo computacional que é 0,5. No teto, que é o plano de trabalho, se utilizou uma tinta com refletividade de 0,038, a simulada tinha refletividade de 0,1.

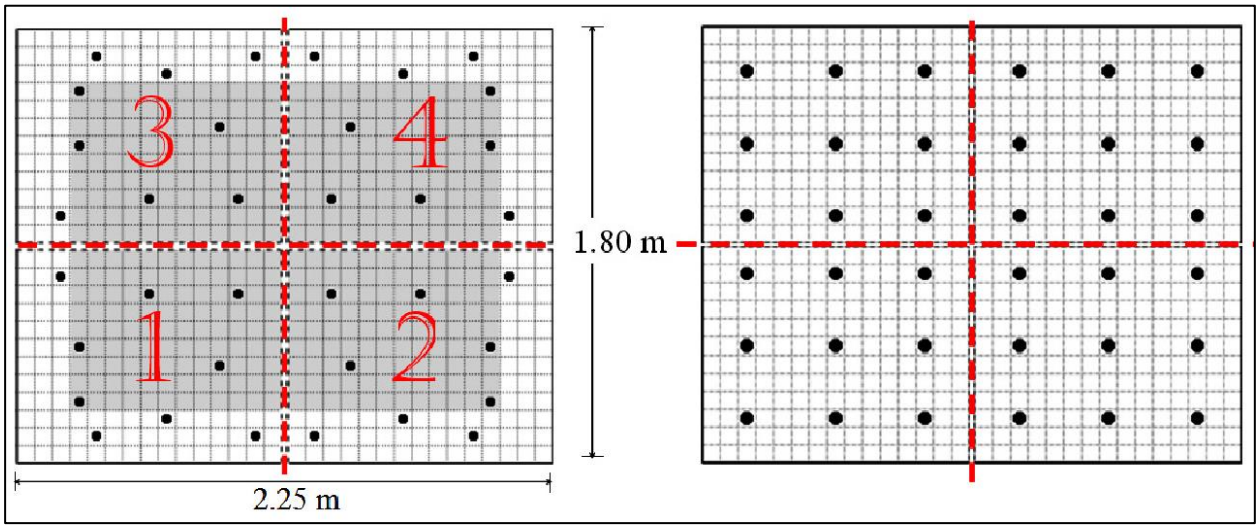
O piso da cavidade foi apoiado com vários tacos de madeira de mesma altura sobre uma mesa, assim garantiu-se que o mesmo ficasse plano. Nas laterais da bancada bem abaixo da parede lateral, se apoiou a bancada em uma madeira com o comprimento igual da

profundidade da bancada, a fim de garantir uma melhor estabilidade da bancada para se efetuar as medições. A bancada construída é mostrada na Figura 5.7.

Figura 5.7: Bancada construída.

5.2 Metodologia de Medição.

O objetivo deste trabalho, foi a verificação experimental da uniformidade da iluminância ao longo de um plano de trabalho, devido ao posicionamento das fontes de luz gerados no modelo computacional em comparação com as configurações obtidas com a aplicação do método de lúmens. Foram analisadas ambas as configurações com 36 fontes de luz. A Figura 5.8 (a) mostra a posição das fontes luminosas obtidas da solução do modelo computacional que aplica o método inverso e a Figura 5.8 (b) mostra a configuração das lâmpadas obtidas na aplicação do método de lúmens.



(a) (b)

Figura 5.8: Disposição das lâmpadas no piso da bancada. (a) Distribuição obtida no modelo computacional e (b) Distribuição resultante do modelo de lúmens.

Para realizar as medições na cavidade, utilizou-se o mesmo sensor utilizado por [Andrioty, 2012], do tipo piranômetro, da marca *Apogee*, modelo SP-110, mostrado na Figura 5.9. O SP-110 foi projetado para medir a irradiação proveniente do sol, na faixa de 300 a 1200 nm, sendo auto-alimentado, com incerteza de medição de 5%. Para a leitura do sinal enviado pelo *Apogee*, utilizou-se para aquisição destes dados o HP Agilent 34970 a.

Figura 5.9: Sensor *Apogee*, modelo SP-110, utilizado para efetuar as medições na bancada.

Este sensor é montado sobre uma base rígida. Esta base tem altura definida para que a distância do teto até a ponta do sensor fique em 9 cm, para respeitar os 45 cm que se deve ter da fonte luminosa até o plano de trabalho, ver Figura 5.9(b) para melhor entendimento. Esta base foi fixada a um rolamento linear com diâmetro interno de 16 mm, para deslizar em um tubo de alumínio, que fara o sensor percorrer no sentido da largura da caixa. Neste tubo foram fixos nas suas extremidades outros dois rolamentos lineares, para poder percorrer no sentido do comprimento da cavidade. Para o posicionamento do sensor, utilizou-se um mecanismo de 4 roldanas, para posicionar os sensor no sentido do comprimento da cavidade e 2 roldanas nas extremidades do tubo que fica o sensor, para posicionar o sensor ao longo da largura da caixa. Este mecanismo facilita a operação do sensor para as medições, como mostra a Figura 5.9(a) e (b). A posicionamento do sensor é realizado com a porta da bancada aberta.

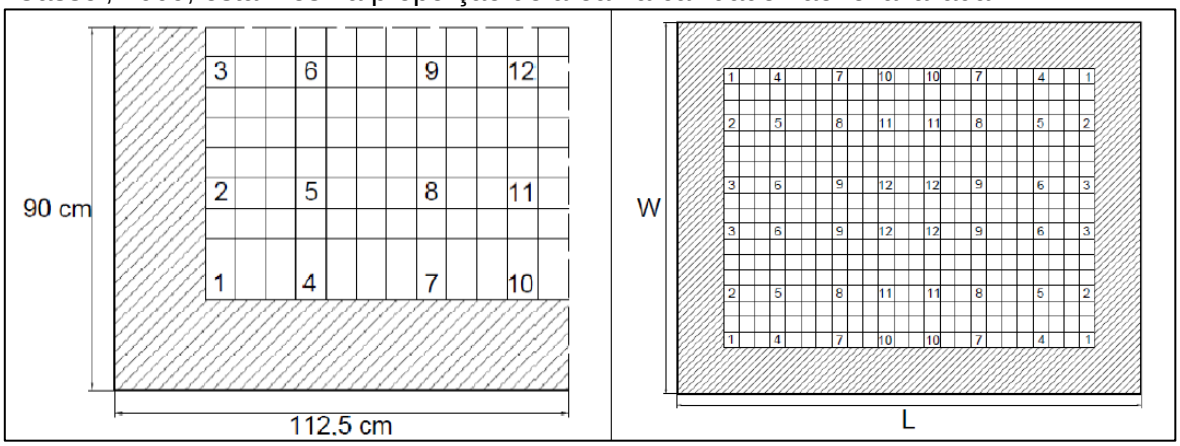
Também foram colocados, no meio do teto, pequenos suportes para os tubos, dos dois lados, para diminuir a deflexão, devido ao peso do sensor. Os tubos foram encobertos por um tecido de cor preta, devido a sua refletividade diferente em relação ao plano de trabalho, isso foi feito para garantir que os dados medidos não sofressem influencia da luz refletida nestes tubos.

(a) (b)

Figura 5.9: (a) Mecanismo feito para a medição e (b) sensor no plano de trabalho

Os pontos de medição foram definidos de acordo com os pontos calculados por Cassol, 2009. Entretanto, em Cassol, 2009, foram calculados 432 pontos. Essa quantidade é inviável nesta bancada, pois se dispõe de um único sensor. Como feito por Andrioty, 2012, utilizou-se a configuração com 12 pontos, conforme a Figura 5.10(a), para um quarto da bancada, e a

Figura 5.10(b), para toda a bancada. A área hachurada foi desconsiderada nas medições, pois em Cassol, 2009, esta mesma proporção de área na cavidade não foi avaliada.



(a) (b)

Figura 5.10: (a) Esquema da localização dos pontos de medição para o primeiro quadrante. (b) Esquema dos pontos de medição para todo o plano de trabalho. A área hachurada foi excluída das medições.

Para medição destes pontos utilizou-se réguas de madeira com medida conhecida para facilitar o posicionamento do sensor ao longo da bancada e também um guia para diminuir o efeito de paralaxe no alinhamento do sensor, como mostra a Figura 6.11(a) e (b) respectivamente. As medidas das réguas são em milímetros e como estas foram utilizadas pode ser visto na Tabela 5.2.

(a) (b)

Figura 6.11: (a) réguas padrão e (b) guia utilizado para posicionamento do sensor no teto.

Tabela 5.2: Tabela de utilização das réguas e guia.

Quadrante	Pontos de Medição	Eixo x (mm)	Eixo y (mm)	Régua eixo x (mm)	Régua eixo y (mm)	Diâmetro da base do guia (mm)	Quadrante	Pontos de Medição	Eixo x (mm)	Eixo y (mm)	Régua eixo x (mm)	Régua eixo y (mm)	Diâmetro da base do guia (mm)
1	1	262,5	262,5	217,5	217,5	45	1	7	787,5	262,5	742,5	217,5	45
	2	262,5	487,5	217,5	442,5	45		8	787,5	487,5	742,5	442,5	45
	3	262,5	787,5	217,5	742,5	45		9	787,5	787,5	742,5	742,5	45
	4	487,5	262,5	442,5	217,5	45		10	1012,5	262,5	967,5	217,5	45
	5	487,5	487,5	442,5	442,5	45		11	1012,5	487,5	967,5	442,5	45
	6	487,5	787,5	442,5	742,5	45		12	1012,5	787,5	967,5	742,5	45

6. RESULTADOS

6.1 Análise dos resultados.

Para efetuar a verificação entre os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos por Cassol, 2009, normalizou-se os fluxos luminosos, tendo-se como referência a média dos fluxos luminosos encontrados nas medições realizadas, isto é,

$$Q = \frac{q''}{q''_{ref}} \tag{6.1}$$

na qual, Q é o fluxo luminoso adimensional, q'' é o fluxo luminoso e q''_{ref} é o fluxo luminoso de referência no plano de trabalho. Este procedimento se justifica pelo fato das lâmpadas possuírem a mesma potência, de maneira que a uniformidade de iluminação no plano de trabalho independe da potência das mesmas, sendo função apenas de seu posicionamento.

Aplicando-se a metodologia de medição na bancada, conforme especificado na seção 5.2, obteve-se os resultados para a distribuição das lâmpadas resultantes da aplicação do método de lúmens, mostrados na Figura 6.1(a). Na Figura 6.1(b), o gráfico representa os resultados obtidos por Cassol, 2009, nos mesmos pontos em que foram realizadas as medições no experimento.

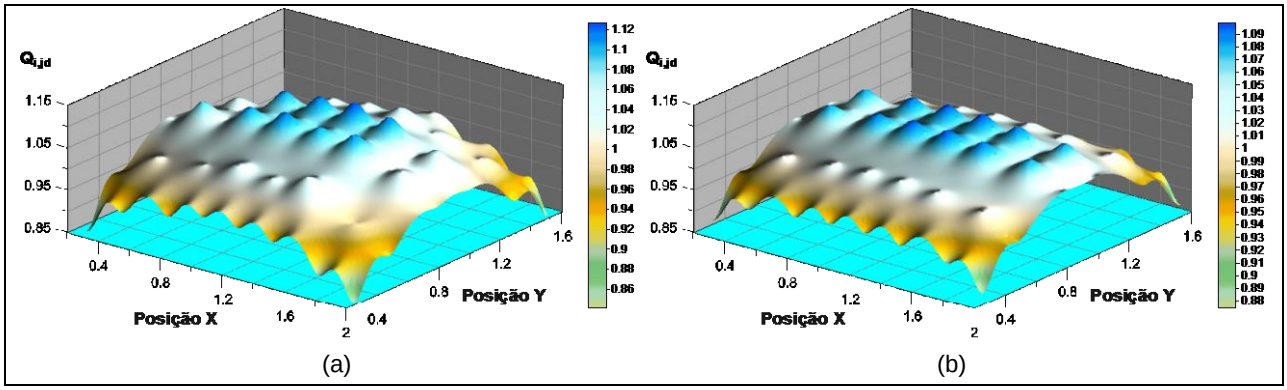


Figura 6.1: (a) Resultados obtidos experimentalmente. (b) Resultados obtidos na simulação.

Analisando-se os gráficos qualitativamente, observa-se que as medidas do experimento geraram um campo de iluminação no plano de trabalho semelhante ao gerado pelo algoritmo computacional. Também se verifica que o fluxo luminoso normalizado na simulação varia de 1,09, no centro do plano de trabalho, a 0,88 nos seus vértices, enquanto que o resultado experimental varia de 1,12 a 0,86, nas mesmas posições. Observa-se um desvio muito pequeno entre os resultados da simulação e os experimentais, com uma correlação de 92,74% entre os resultados.

Agora, aplicando-se a mesma metodologia de medição na bancada, obteve-se os resultados experimentais para a distribuição das fontes de luz obtidas através da aplicação do algoritmo computacional, mostrados na Figura 6.2(a). Na Figura 6.2(b), o gráfico representa os resultados computacionais no plano de trabalho obtidos por Cassol, 2009.

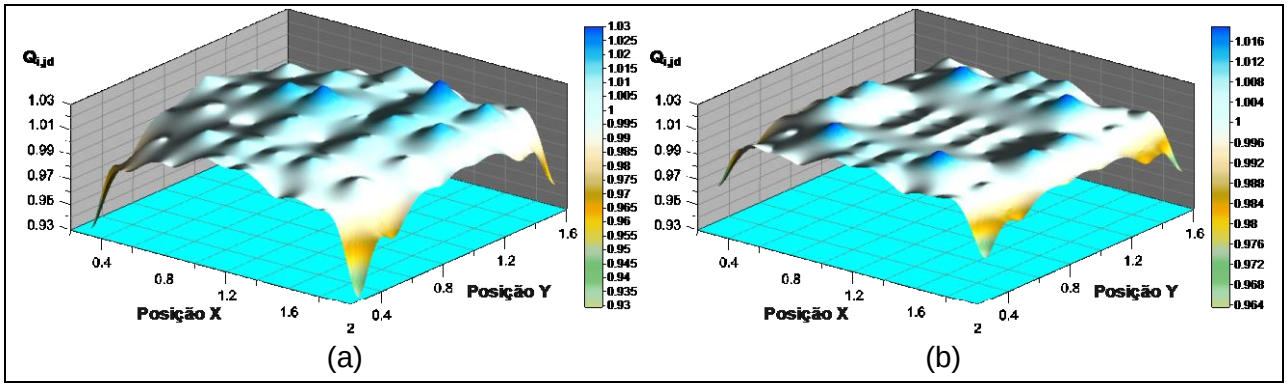


Figura 6.2: (a) Resultados obtidos experimentalmente. (b) Resultados obtidos na simulação.

Analisando-se estes gráficos qualitativamente, observa-se que as medidas do experimento geraram um campo de iluminação mais uniforme no plano de trabalho, semelhante ao gerado pelo algoritmo computacional. Também se verifica que o fluxo luminoso normalizado na simulação varia de 1,016, no centro do plano de trabalho, a 0,964 nos seus vértices, enquanto que o resultado experimental varia de 1,03 a 0,93, nas mesmas posições. Observa-se novamente um desvio muito pequeno entre os resultados da simulação e os experimentais, com correlação de 96,86% entre os valores.

Estes resultados evidenciam que as configurações das fontes luminosas obtidas no modelo computacional, geram uma iluminação bem mais uniforme no plano de trabalho em comparação com a configuração das lâmpadas obtidas da na aplicação do método de lúmens. A variação total do fluxo luminoso foi em torno de 0,26 nos resultados experimentais da disposição das lâmpadas obtidas na aplicação do método de lúmens e 0,10 nos resultados experimentais da disposição das mesmas obtidas na aplicação do algoritmo computacional de Cassol, 2009.

Novamente, aplicando-se a mesma metodologia de medição na bancada, obteve-se os resultados para a mesma distribuição das fontes de luz obtidas no modelo computacional, mas utilizando as lâmpadas com 40 W de potência, mostrados na Figura 6.3(a). Na Figura 6.3(b), o gráfico representa os resultados obtidos na aplicação do modelo computacional, que é o mesmo da Figura 6.2(b), já que a solução oriunda deste modelo não depende da potência das lâmpadas.

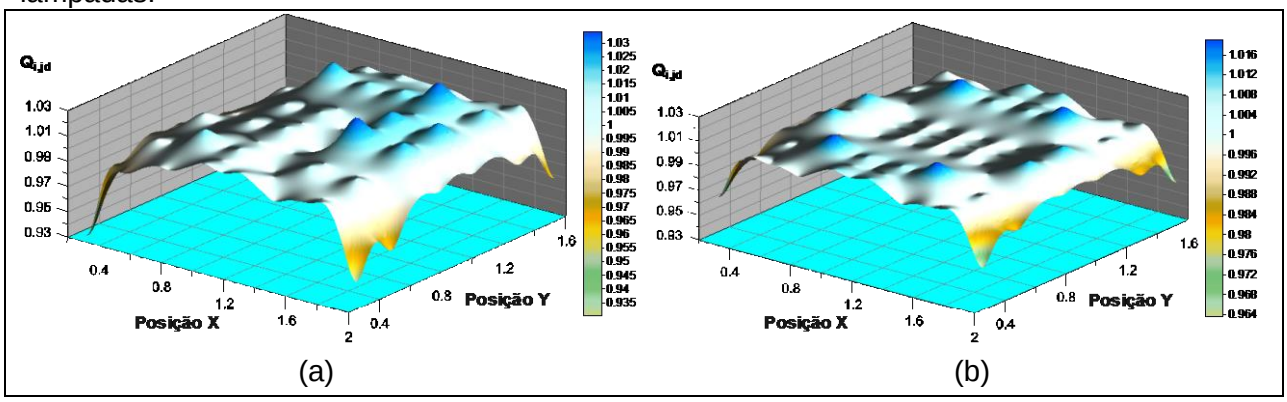


Figura 6.3: (a) Resultados obtidos experimentalmente. (b) Resultados obtidos na simulação.

Analisando-se o primeiro gráfico qualitativamente, observa-se que as medidas do experimento geraram um campo de iluminação uniforme no plano de trabalho, semelhante ao gerado pelo algoritmo computacional e também pelo experimento com fontes de luz com 15W de potência. Também se verifica que o fluxo luminoso normalizado no experimento varia de 1,03, no centro do plano de trabalho, a 0,935 nos seus vértices, praticamente os mesmos resultados encontrados na utilização das lâmpadas de 15W, que é 1,03 a 0,93, respectivamente, enquanto que o resultado computacional varia de 1,016 a 0,964, nas mesmas

posições. Observa-se novamente um desvio muito pequeno entre os resultados experimentais e os da simulação, com correlação de 94,62% entre os valores resultantes. Esta análise só verifica que as posições das fontes de luz geradas pelo modelo computacional não dependem da sua potência.

6.2 Análise das incertezas de medição.

Considerando que o sensor utilizado tem uma incerteza de 5% do valor medido com 95% de confiabilidade, analisam-se os resultados da distribuição das lâmpadas obtidas na aplicação do método de lúmens, que estão descritas na Tabela 6.1. Todas as tabelas e correlações foram feitas utilizando o software Excel. A correlação entre os resultados medidos e simulados é de 92,74%. O maior desvio padrão encontrado foi de 3,02% no ponto 10 da medição. Então, analisando este ponto, podemos afirmar que a maior incerteza de medição relacionada a estas medidas é de 6,04% com 95% de confiabilidade de encontrar o valor verdadeiro dentro do intervalo de confiança, este intervalo de confiança está entre os valores (0,9150 ; 1,0327) neste ponto. O maior erro encontrado, considerando o valor verdadeiro o valor resultante da simulação, é de 3,47%. Conclui-se, que o resultado do método computacional está dentro do intervalo de confiança da amostra considerada.

Agora, analisando-se os resultados da medição do campo de iluminação uniforme com lâmpadas de 15W de potência, descritos na Tabela 6.2. A correlação entre os resultados medidos e simulados é de 96,86%. O maior desvio padrão encontrado foi de 1,48% no ponto de medição 1. Então, a maior incerteza de medição relacionada aos dados mensurados, é de 2,96% com 95% de confiabilidade de encontrar o valor verdadeiro dentro do intervalo de confiança, que esta entre os valores (0,9155 ; 0,9714) neste ponto. O maior erro calculado, considerando o valor verdadeiro o resultado simulado por Cassol, 2009 é de 2,09%. Assim com os dados mensurados conseguiu-se achar uma incerteza menor que a do sensor, que é de 5%.

Tabela 6.1: Resultados obtidos a partir da disposição das lâmpadas resultante da aplicação do método de lúmens, medições experimentais e por Cassol, 2009.

	Quadrantes				**Experimental**			**Simulação**		
Pontos	**1º**	**2º**	**3º**	**4º**	**Média**	**Desvio Padrão**	**Desvio Abs.**	**Simulação**	**Desvio Abs.**	**Erro**
1	0,8488	0,8504	0,8412	0,8451	0,8464	0,41%	0,1536	0,8747	0,1253	3,24%
2	0,9552	0,9271	0,9217	0,9240	0,9320	1,56%	0,0680	0,9593	0,0407	2,85%
3	1,0311	0,9902	0,9970	1,0235	1,0105	1,99%	-0,0105	1,0293	-0,0293	1,83%
4	0,9157	0,8944	0,9154	0,9038	0,9073	1,02%	0,0927	0,9229	0,0771	1,69%
5	1,0090	0,9812	0,9983	0,9923	0,9952	1,16%	0,0048	1,0111	-0,0111	1,57%
6	1,0915	1,0555	1,0673	1,0633	1,0694	1,55%	-0,0694	1,0832	-0,0832	1,28%
7	0,9359	0,9437	0,9576	0,9543	0,9479	0,99%	0,0521	0,9350	0,0650	1,38%
8	1,0218	1,0610	1,0292	1,0427	1,0387	1,72%	-0,0387	1,0225	-0,0225	1,58%
9	1,1089	1,1112	1,1156	1,1094	1,1113	0,31%	-0,1113	1,0931	-0,0931	1,66%
10	0,9580	0,9537	1,0185	0,9653	0,9739	3,02%	0,0261	0,9412	0,0588	3,47%
11	1,0450	1,0340	1,0657	1,0551	1,0499	1,36%	-0,0499	1,0285	-0,0285	2,09%
12	1,1189	1,1056	1,1271	1,1189	1,1176	0,89%	-0,1176	1,0991	-0,0991	1,69%
Média	1,0033	0,9923	1,0046	0,9998	1,0000		0,0000	1,0000	0,0000	0,00%
Desvio Padrão	0,0829	0,0828	0,0851	0,0842	**Mín.**	**0,31%**	**-0,1176**		**-0,0991**	**1,28%**
Desvio Abs.	0,3312	0,7677	0,4560	0,0195	**Máx**	**3,02%**	**0,1536**		**0,1253**	**3,47%**

Tabela 6.2: Resultados obtidos a partir da disposição das fontes luminosas geradas no modelo computacional, com lâmpadas de 15W, medições experimentais e por Cassol, 2009.

	Quadrantes				Experimental			Simulação		
Pontos	**1º**	**2º**	**3º**	**4º**	**Média**	**Desvio Padrão**	**Desvio Abs.**	**Simulação**	**Desvio Abs.**	**Erro**
1	0,9294	0,9324	0,9527	0,9593	0,9435	1,48%	0,0565	0,9636	0,0364	2,09%
2	0,9685	0,9671	0,9839	0,9986	0,9795	1,48%	0,0205	0,9817	0,0183	0,23%
3	0,9975	0,9922	0,9971	1,0102	0,9992	0,77%	0,0008	0,9939	0,0061	0,54%
4	0,9827	0,9940	1,0069	0,9880	0,9929	1,04%	0,0071	1,0036	-0,0036	1,06%
5	0,9967	1,0074	1,0218	1,0113	1,0093	1,03%	-0,0093	1,0024	-0,0024	0,69%
6	1,0068	1,0068	1,0228	1,0098	1,0115	0,76%	-0,0115	1,0137	-0,0137	0,22%
7	0,9963	0,9938	0,9978	1,0007	0,9971	0,29%	0,0029	0,9978	0,0022	0,06%
8	1,0132	1,0136	1,0304	1,0154	1,0182	0,82%	-0,0182	1,0191	-0,0191	0,09%
9	1,0020	1,0130	1,0188	1,0228	1,0141	0,91%	-0,0141	1,0018	-0,0018	1,23%
10	1,0107	1,0088	1,0066	1,0145	1,0101	0,33%	-0,0101	1,0108	-0,0108	0,06%
11	1,0124	1,0108	1,0091	1,0102	1,0106	0,14%	-0,0106	1,0092	-0,0092	0,14%
12	1,0139	1,0028	1,0110	1,0277	1,0139	1,03%	-0,0139	1,0024	-0,0024	1,14%
Média	0,9942	0,9952	1,0049	1,0057	**1,0000**		0,0000	1,0000	0,0000	0,00%
Desvio Padrão	0,0245	0,0237	0,0209	0,0180	**Mín.**	**0,14%**	**-0,0182**		**-0,0191**	**0,06%**
Desvio Abs.	0,5826	0,4782	0,4899	0,5708	**Máx**	**1,48%**	**0,0565**		**0,0364**	**2,09%**

E por fim, analisando-se os resultados do campo de iluminação uniforme com lâmpadas de 40W de potência, que estão descritos na Tabela 6.3. A correlação entre os resultados medidos e simulados é de 94,62%. O maior desvio padrão encontrado foi de 1,66% no ponto 6. Então, a maior incerteza de medição relacionada a estas medidas, é de 3,32% com 95% de confiabilidade de encontrar o valor verdadeiro dentro do intervalo, que compreende (0,9785 ; 1,0458) neste ponto. O maior erro calculado, considerando o valor verdadeiro o resultado da simulação feita por Cassol, 2009, é de 1,85%. Assim sendo, encontrou-se novamente com os dados mensurados uma incerteza de medição menor que a incerteza do sensor.

Tabela 6.3: Resultados obtidos a partir da disposição das fontes luminosas geradas no modelo computacional, com lâmpadas de 40W, medições experimentais e por Cassol, 2009.

	Quadrantes				Experimental			Simulação		
Pontos	**1º**	**2º**	**3º**	**4º**	**Média**	**Desvio Padrão**	**Desvio Abs.**	**Simulação**	**Desvio Abs.**	**Erro**
1	0,9301	0,9505	0,9631	0,9463	0,9475	1,36%	0,0525	0,9636	0,0364	1,67%
2	0,9756	0,9635	0,9863	0,9516	0,9693	1,50%	0,0307	0,9817	0,0183	1,27%
3	0,9855	0,9926	0,9954	0,9694	0,9857	1,16%	0,0143	0,9939	0,0061	0,82%
4	0,9870	1,0058	1,0132	0,9924	0,9996	1,20%	0,0004	1,0036	-0,0036	0,40%
5	1,0013	1,0127	1,0215	0,9967	1,0080	1,12%	-0,0080	1,0024	-0,0024	0,57%
6	1,0053	1,0242	1,0274	0,9920	1,0122	1,66%	-0,0122	1,0137	-0,0137	0,15%
7	0,9990	0,9967	1,0070	1,0112	1,0035	0,68%	-0,0035	0,9978	0,0022	0,58%
8	1,0189	1,0125	1,0328	1,0265	1,0227	0,89%	-0,0227	1,0191	-0,0191	0,35%

9	1,0098	1,0344	1,0265	1,0107	1,0203	1,21%	-0,0203	1,0018	-0,0018	1,85%
10	1,0117	1,0118	1,0106	1,0122	1,0116	0,07%	-0,0116	1,0108	-0,0108	0,08%
11	1,0114	1,0003	1,0198	1,0183	1,0124	0,89%	-0,0124	1,0092	-0,0092	0,32%
12	1,0119	0,9979	1,0069	1,0117	1,0071	0,66%	-0,0071	1,0024	-0,0024	0,47%
Média	0,9956	1,0002	1,0092	0,9949	1,0000		0,0000	1,0000	0,0000	0,00%
Desvio Padrão	0,0244	0,0235	0,0198	0,0262	**Mín.**	**0,07%**	**-0,0227**		**-0,0191**	**0,08%**
Desvio Abs.	0,4371	0,0230	0,9221	0,5081	**Máx**	**1,66%**	**0,0525**		**0,0364**	**1,85%**

7. CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, dentro das limitações impostas pelos materiais disponíveis, é possível concluir que o experimento foi bem sucedido, posto que tanto a uniformidade no plano de trabalho, já prevista nos próprios resultados da tese de Cassol, 2009, foi alcançada. Porém, o alcance desta uniformidade só foi obtido com êxito devido a utilização dos resultados do modelo computacional desenvolvido nesta tese de Cassol, 2009. Seguindo esta linha, a não uniformidade no plano de trabalho também foi alcançada satisfatoriamente devido a utilização da disposição das lâmpadas obtida na aplicação do método de lúmens, concordando com a teoria já conhecida.

Estes resultados evidenciam a eficácia do modelo computacional que utiliza o método inverso quando utilizado em projetos de iluminação artificial, resultando em planos de trabalho mais uniformes. Desta forma, este trabalho verifica de maneira experimental os resultados gerados pelo modelo computacional otimizado por Cassol, 2009, e pela aplicação do método de lúmens, para uma cavidade com as características descritas.

Contudo, tem-se que o tema está longe de ser encerrado, pelo contrário, ainda há muito a ser realizado na verificação experimental dos resultados produzidos pelas simulações. Muitos trabalhos e experimentos podem ser realizados nesse sentido. Sugere-se, por exemplo, as seguintes melhorias: aprimorar a bancada construída no presente trabalho, uma vez que esta possui limitações, isto é, sugere-se que seja projetado um modo de efetuar as medições dentro da bancada sem a necessidade de abri-la toda a vez que se deseja mudar o ponto de medição; realizar medições da refletividade em outras cores de tintas, para selecionar a mais adequada para um futuro experimento; e utilizar outros tipos de fonte de luz, para verificar suas diferenças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cassol, F., Smith Schneider, P, França, F.H.R. e Silva Neto, A.J. **“Multi-objective optimization as a new approach to illumination design of interior spaces”.** Building and Environment, v. 46, p. 331-338, 2011.

Cassol, F.; **Aplicação da análise inversa via otimização extrema generalizada em projetos de iluminação**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), UFRGS. Porto Alegre, 2009.

Ertürk, H., Ezekoye O.A., Howell J.R. **“Comparison of three regularized solution techniques in a three-dimensional inverse radiation problem”.** Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer v. 73, p. 307-316, 2002.

Fontana, D.H.G., Schneider, P.S. e França, F.H.R. **"Projeto inverso aplicado ao dimensionamento de sistemas de iluminação de ambientes"**. XXV Iberian Latin American Congress in Computacional Methods in Engineering, Recife, 2004.

Haubert Andriotty, T. "**Projeto experimental para comparação de solução gerada a partir do método inverso em cálculos de iluminação artificial para uma condição de iluminamento uniforme no plano de trabalho"**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

IESNA – Illumination engineering society of North America; **"The IESNA Lighting Handbook: reference & application"**, 9° ed., Nova Iorque, 2000.

Incropera, F.P., Dewitt, P.D., Bergman, L.T., Lavine, A.S., **"Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa"**. 6° Ed., LTC, 2008.

TRABALHOS PUBLICADOS

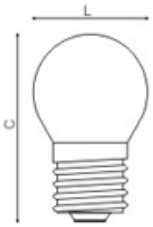
Schneider, P.S. , Rodrigues, L.J. e Bem, M. S. **"Experimental validation of the inverse method to illumination by optimization technique – imibyoptim with preset light source power".** *4th Inverse Problems, Design and Optimization Symposium* (IPDO, 2013) *Albi, France, 2013.*

ANEXO

Lâmpada Incandescente Lustre - BG-45 com base E-27 leitosa

Características Técnicas:

Tensão (V)	Potência(W)	Base	Dimensões (L x C)	Embalagem(pçs)
127 V	25 W	E-27	45 ± 1mm x 72 ± 2mm	50
220 V	25 W	E-27	45 ± 1mm x 72 ± 2mm	50
127 V	40 W	E-27	45 ± 1mm x 72 ± 2mm	50
220 V	40 W	E-27	45 ± 1mm x 72 ± 2mm	50
127 V	60 W	E-27	45 ± 1mm x 72 ± 2mm	50
220 V	60 W	E-27	45 ± 1mm x 72 ± 2mm	50



Direitos reservados 2011 - Sadokin Eletro Eletrônica Ltda

Figura 1: Dados técnicos das lâmpadas utilizadas. Fonte: Sadokin, disponível em <http://www.sadokin.com.br/Incandescentes/Lustre/Lbg45E27lt.htm>. Acesso em julho de 2013.