



SIMULAÇÃO E OPTIMIZAÇÃO DE PAINÉIS DEFLETORES DE LUZ EM CAMPINAS

Flavia Ciampini; Paulo Sergio Scarazzato

Faculdade de Engenharia Civil – Departamento de Arquitetura e Construção
Universidade Estadual de Campinas CEP: 13083-970, Campinas – S.P., Brasil.
e-mail: flaviaciampini@yahoo.com.br

RESUMO

O presente trabalho é referente à avaliação quantitativa de um dispositivo de iluminação natural denominado *laser cut panel* (LCP) que objetiva otimizar a distribuição da luz solar no interior dos edifícios. Para maximizar o potencial deste dispositivo em função do posicionamento na fachada, para a latitude de Campinas, seus parâmetros foram estudados e com o auxílio de planilhas eletrônicas, foi estabelecido o projeto do dispositivo, onde é determinada a inclinação dos cortes a laser realizados na placa acrílica, responsáveis pela refração da luz através do painel. Com o uso desta ferramenta também é possível determinar a angulação da luz direta incidente no painel, e a refratada para o interior da edificação, e a porcentagem defletida para cada angulação de incidência. O perfil do painel é escolhido de forma a obter uma iluminação com um contraste menor entre os espaços próximos e distantes das aberturas. Finalmente para comprovar a eficiência do LCP e a veracidade dos dados apresentados pela simulação, foram realizadas, através de ensaios de campo, sob condições de céu real, as medições das iluminâncias no interior de maquetes em escala reduzida.

ABSTRACT

The present work refers to the quantitative evaluation of a daylighting device called laser cut panel (LCP) whose purpose is to optimize the distribution of the natural light into the interior of buildings. To maximize the potential of this device as function of façade orientation, for the latitude of Campinas, its parameters has been studied and with the assistance of an electronic spreadsheet, the devices' parameters has been determined, where the inclination of laser cuts in the acrylic plate has been determined, responsible for the refraction of the light through the panel. With the use of this tool, it is also possible to determine the angle of the direct incident light into the panel, the angle of refraction to the interior of the building, and the percentage of light deflected for each angle of incidence. The profile of the panel is chosen as to obtain an illumination with a lesser contrast between the spaces near and far of the window. Finally to prove the efficiency of the LCP and the veracity of the data presented for the simulation, field assays had been carried out, under real sky conditions, for illuminance measurements in the interior of reduced scale models.

1. INTRODUÇÃO

Em edifícios modernos, é difícil observar uma adequada distribuição de luz natural para o interior, isto devido à configuração das salas, normalmente ambientes muito profundos em relação à área das aberturas, o que gera uma iluminação excessiva nas proximidades da janela e em contrapartida, espaços sombrios no fundo das salas. A busca por edificações mais eficientes, auto-sustentáveis e que permitam ao usuário um contato com o exterior, tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias avançadas, em diversos dispositivos, para otimização do aproveitamento da luz solar. Reduzindo

assim, cargas energéticas empregadas com luz artificial e refrigeração e contribuindo para a qualidade da iluminação no interior das edificações (IEA, 2000). Para garantir a eficiência energética, de forma a otimizar o conforto visual dos ocupantes, é necessário um conhecimento detalhado das características do direcionamento da luz, pois a distribuição obtida, com o uso destes sistemas, depende da geometria dos dispositivos, da latitude, da orientação da fachada onde os mesmos são acoplados e da disponibilidade solar.

A estratégia adotada para otimização do *Laser Cut Panel* (LCP) para Campinas é de redirecionar a luz direta incidente, próxima a abertura, para cima em regiões mais profundas, reduzindo o contraste das iluminâncias no ambiente. Para tanto, neste trabalho foram determinados os parâmetros do LCP, para alcançar esta estratégia, já que estudos neste sentido, no Brasil, ainda não foram realizados. Na seção 2; serão apresentadas as variáveis envolvidas no desempenho do LCP. Em seguida, na seção 3; mediante uso de planilhas eletrônicas, estas propriedades geométricas são aplicadas as peculiaridades de um protótipo em escala reduzida, para Campinas, descrito na seção 4. Por fim, as iluminâncias medidas são comparadas mediante gráficos, para diversas configurações do LCP.

2. O PAINEL DE CORTE A LASER COMO PAINEL DEFLETOR DE LUZ

2.1 Características do Dispositivo

O Painel de Corte a Laser (LCP) (EDMONDS, 1991), é um elemento de fechamento que combina as propriedades de deflexão da luz, sem perder excessivamente a transparência das aberturas (Figura 1). Normalmente o fluxo da luz solar que atinge as aberturas laterais, com fechamento de vidro, incide numa direção, de cima para baixo, distribuindo-se de maneira desigual num ambiente que tenha uma profundidade acentuada. Em função disto, surgem fortes contrastes de iluminação entre as áreas próximas e aquelas distantes das aberturas. Assim a técnica de controle solar do LCP, buscou resolver este problema através da mudança da trajetória dos raios solares que ao incidir no LCP defletem sua direção e atingem o teto, espalhando-se de forma difusa no interior. Este elemento, de espessura semelhante à do vidro convencional, é produzido cortando-se uma placa de acrílico, com um laser especial de dióxido de carbono que realiza cortes nas superfícies internas, altamente refletivas que mediante a refração e reflexão interna total redirecionam a luz solar direta, otimizando a distribuição da luz nos ambientes.



Figura 1- Foto de uma abertura com o LCP acoplado em sua metade inferior.

2.2 Determinação da Distribuição Angular da Luz Defletida

Na Figura 2, um detalhe do corte transversal do painel mostra a luz que entra pelo paralelepípedo de acrílico, com um ângulo de incidência (i_1). Após incidir na interface ar/acrílico, o feixe sofre refração, e é direcionado para a próxima interface acrílico/ar, onde sofre reflexão interna total e é refletido para a última interface acrílico/ar, onde por fim é refratado novamente, sendo portanto defletido com um ângulo de saída (r_2) menor que o de incidência (i_1); conferindo à luz, maior alcance para o interior. O ângulo da luz defletida (r_2) e a fração da luz defletida (%) variam de acordo com as características físicas do dispositivo, ou seja, da inclinação dos cortes na placa (θ), da profundidade dos mesmos (W), da distância que haverá entre eles (D) e do índice de refração do material (n_{ac}). A metodologia necessária para calcular os ângulos de deflexão e a quantidade de luz defletida, pode ser

encontrada na patente do LCP (EDMONDS, 1991). De acordo com a equação 1, derivada das equações da patente do dispositivo (EDMONDS, 1991), é possível obter o ângulo de deflexão (r_2) em função do ângulo de incidência (i_1). O gráfico da figura 3, utiliza a equação 1 para mostrar o desempenho de cada painel para várias inclinações ($\theta = -9^\circ, -6^\circ, -3^\circ, 0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ e 9°).

$$r_2 = \arcsen \left\{ \frac{n_{ac}}{n_{ar}} \cdot \text{sen} \left[\arcsen \left(\frac{n_{ar}}{n_{ac}} \cdot \text{sen} i_1 \right) - 2\theta \right] \right\} \quad [\text{Eq. 01}]$$

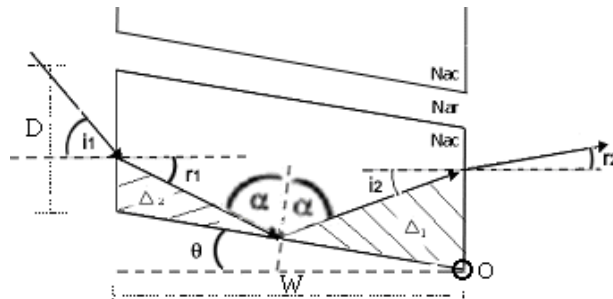


Figura 2- Corte transversal de um LCP. Ângulos θ positivos são aqueles ângulos tomados em sentido horário ao se considerar a origem fixa em O.

Na Figura 3 para $\theta = 0^\circ$ (corte reto) o ângulo de incidência solar é igual ao ângulo de deflexão interno, porém enquanto este primeiro tem direção de cima para baixo este último terá direção de baixo para cima. Ao inclinar os cortes, ($\theta > 0^\circ$) o feixe de luz é refratado para o interior do ambiente em um ângulo menor que o incidente, favorecendo a iluminação dos ambientes mais profundos. No quadrante 1, onde as curvas se interrompem, para ângulos de corte $\theta < 0^\circ$, está representado o ângulo de reflexão interna total, ou seja, para todas as altitudes solares superiores a este ângulo, toda a luz incidente é refletida de volta para o exterior. Em seguida, no quadrante 2 (para $\theta > 0^\circ$), é mostrado que para qualquer ângulos de incidência o ângulo defletido será para baixo (abaixo da normal) gerando portanto uma possível fonte de ofuscamento. Nos quadrantes 3 e 4 o comportamento do LCP, caso a incidência dos os raios solares seja de baixo para cima. Esta situação não corresponde a realidade solar, pois os feixes não podem alcançar a abertura quando o sol está abaixo do horizonte. Por este motivo utiliza-se $\theta > 0^\circ$, para que a luz incidente seja defletida para o fundo da sala para os horários de maior altitude solar. Portanto optou-se por operar com este dispositivo de iluminação natural no regime primeiro quadrante.

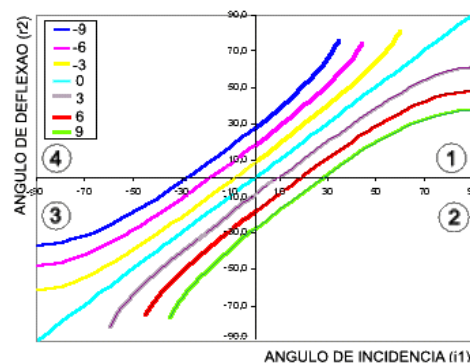


Figura 3- Para cada θ é mostrada a variação do ângulo de deflexão interno (r_2) em função do ângulo solar incidente (i_1). Os quadrantes são representados pelos números 1,2,3,4.

2.3 Determinação da Fração Defletida para cada Ângulo de Incidência

Quando a luz incidente atravessa o painel, ela pode ser defletida em sua totalidade, ou uma fração pode continuar sua trajetória sem ser desviada. Desta forma, para projetar um dispositivo otimizado, não basta observar qual o ângulo de deflexão interno (figura 3) é necessário também, saber qual a porcentagem da radiação que estará sendo redirecionada para o interior com aquele ângulo (r_2). Existe então um intervalo angular com um valor mínimo (i_{\min}) e um valor máximo (i_{\max}) onde aproximadamente 100% da luz neste intervalo angular é refletida para um único ângulo. Como

mostrado na figura 4A a luz incidente no canto superior do elemento com um ângulo i_{\min} , cujos raios sejam refratados para o canto inferior do paralelepípedo, serão completamente defletidos. Os ângulos i_{\min} e r_{\min} são os menores ângulos de incidência e refração para os quais toda a luz é defletida. O valor de r_{\min} é dado pela equação 2 (EDMONDS, 1991). Com o valor do ângulo mínimo de refração será possível descobrir o i_{\min} de acordo com a Lei de Snell (equação 3).

$$\tan r_{\min} = \frac{D + W \tan \theta}{W} = \frac{D}{W} + \tan \theta \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$n_{ar} \text{sen}(i_{\min}) = n_{ac} \text{sen}(r_{\min}) \quad [\text{Eq. 03}]$$

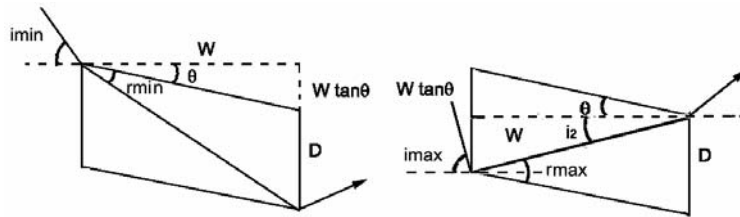


Figura 4 A e B – Corte transversal do LCP indicando a relação dos ângulos com as dimensões.

O i_{\max} pode ser obtido graças as relações geométricas no painel, (Figura 4B) de acordo com a equação 4. Identificando o valor de i_2 , de acordo com as dimensões do LCP será possível obter o ângulo de refração máximo (r_{\max}). Uma vez definido o r_{\max} , é possível encontrar, mediante a lei de Snell, o ângulo de incidência máximo. No entanto se o ângulo de incidência solar estiver fora deste intervalo, a fração defletida deve ser calculada. A fração defletida para ângulo de incidência (i) < (i_{\min}) (figura 5A) é dado pela equação 5. Quando o ângulo de incidência (i) > (i_{\max}) (figura 5B) então a fração defletida é dada de acordo com a equação 6.

$$\frac{D - W \tan \theta}{W} = \tan i_2 = \tan(r_{\max} - 2\theta) \quad [\text{Eq. 04}]$$

$$fd = \frac{Y}{D} = \frac{W \tan r_1 - \tan \theta}{D} = \frac{(\tan r_1 - \tan \theta)W}{D} \quad [\text{Eq. 05}]$$

$$fd = 1 - \frac{\{W[\tan(r_1 - 2\theta) + \tan \theta] - D\} \cos(r_1 - 2\theta)}{D \cos r_1} \quad [\text{Eq. 06}]$$

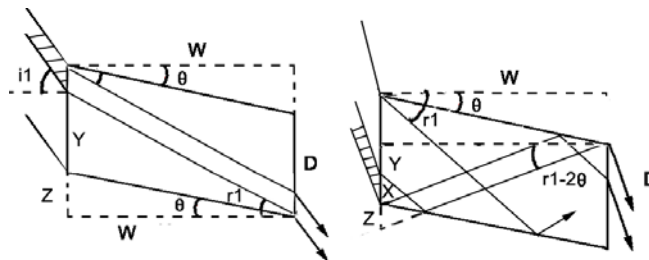


Figura 5 A e B – Geometria da seção para calculo da fração defletida para i_{\min} e i_{\max} .

Note-se que os intervalos de valores disponíveis de D/W estão limitados ao processo de fabricação, por este motivo a variável mais importante para otimização deste dispositivo é o θ . Assim, de acordo com as equações 3, 5 e 6 foi possível construir, com a planilha eletrônica, um gráfico que mostra a fração defletida para os valores de θ escolhidos, em função do ângulo de incidência (figura 6A). Na figura 6A, para um $\theta = 0^\circ$ existe somente um ângulo de incidência solar ($i=35^\circ$) aonde 100% da radiação solar é defletida para o interior (que varia em função de D/W). Para outros ângulos de corte, existirá um intervalo angular, no qual 100% da radiação estará sendo refletida para o fundo. Por exemplo, para $\theta = 3^\circ$, ângulos de incidência solar entre 38° e 42° estarão sendo defletidos para o interior em sua totalidade, já para $\theta = 9^\circ$, a faixa angular varia de 47° a 57° . Por fim, um gráfico que

mostra para vários ângulos de corte quais os intervalos de deflexão total da luz, i_{\min} , i_{\max} . Na figura 6B, o intervalo de deflexão total da luz incidente aumenta para ângulos de corte maiores. Em horários próximos ao meio dia que correspondem a um elevado ângulo de incidência solar, ângulos de cortes maiores possuem o maior intervalo de deflexão total.

Enfim diante de tantas variáveis, para auxiliar na escolha da inclinação dos cortes que deveriam ser realizados nas placas acrílicas, para que fosse garantido o melhor desempenho em função da latitude (Campinas), criou-se, uma ferramenta de simulação que mostra o desempenho de cada painel em função do ângulo de corte (θ). Após a obtenção dos dados teóricos, e a escolha da inclinação dos cortes, foi realizado um estudo em maquetes em escala reduzida para averiguar e comparar os resultados obtidos.

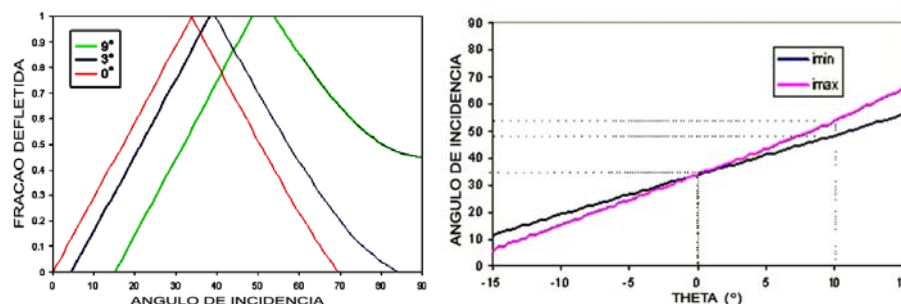


Figura 6 A e B – A esquerda, a fração defletida para inclinação de corte (θ) de 9° , 3° e 0° . A direita, a faixa angular entre i_{\min} e i_{\max} onde 100% da luz é defletida em função de θ

3. A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

3.1 Planilha Microsoft Excel® como Ferramenta de Simulação – Primeira Interface

Para decidir as dimensões ideais do LCP e prever seu comportamento, garantindo o melhor desempenho em função da latitude, longitude de Campinas, orientação da fachada e estratégia adotada onde será acoplado, buscou-se criar, neste estudo, uma ferramenta de simulação que mostrasse o desempenho de cada LCP (figura 7). Após a obtenção dos dados teóricos, foi realizado um estudo em maquetes em escala reduzida para averiguar os resultados obtidos mediante a planilha.

O pré-requisito para desenhar qualquer dispositivo que vise o controle solar é conhecer a posição solar durante o ano para em seguida relacioná-lo com o edifício (SZOKOLAY, 1997). Assim para desenvolver as planilhas que calculariam o desempenho do LCP foi necessário em primeira instância, determinar a posição solar exata, para isso utilizou-se o algoritmo PSA. Este algoritmo, por ser de alta precisão permite determinar o vetor solar com uma acurácia de 0,5 minutos de arco para o período de 1999 a 2015, idealizado para sistemas solares móveis que necessitem acompanhar a trajetória solar no decorrer do dia (MURIEL et al., 2001). Vale ressaltar que a limitação do período é facilmente alterável mediante ajuste das equações dentro das planilhas. As equações de determinação da posição solar (altitude e azimute) foram acopladas àquelas fornecidas pelo Dr. Edmonds, (1993), apresentadas na seção 2. No entanto para raios oblíquos, é o ângulo de projeção do raio refratado no plano normal que determina a fração defletida. Para um painel sem inclinação no qual incide uma luz de elevação (E) e azimute (A), relativos a normal incidente, o ângulo obtido pela projeção do raio refratado no plano normal (r_p) é obtido pela equação 7. Desta forma a planilha não estará trabalhando apenas no plano de corte (bidimensional) como se o sol possuísse altitude entre 0° e 90° e estivesse sempre perpendicular a abertura, e sim de forma tridimensional respeitando o caminho solar durante o decorrer do ano.

$$\tan r_p = \frac{\text{sen}E}{(n^2 - 1 + \cos^2 A \cos^2 E)^{1/2}} \quad [\text{Eq. 07}]$$

A ferramenta de simulação é composta por seis planilhas diferentes. Na planilha principal, (Entrada de dados), é necessário entrar com os dados referentes as dimensões do ambiente a ser analisado (largura-L, pé-direito-H, profundidade-P, largura da abertura-DL e altura do peitoril-A); a data (ano, mês, horas, minutos, segundos); posição geográfica (latitude e longitude) e dados do LCP (índice de

refração- n , espessura do painel- W , distância entre os cortes- D e angulação- θ). Com estes dados será possível identificar para cada espaço, qual é o ângulo de fundo ideal (AF), sendo que este é representado pela diagonal que liga a abertura ao ponto mais distante do teto, e representa o ângulo ideal de redirecionamento interno da luz, de acordo com a estratégia definida na seção 2. Este ângulo (figura 7, linha azul) servirá como referência para comparação com o ângulo defletido pelo LCP (figura 7, linha vermelha) em função do ângulo da altitude e azimute. A figura, por estar em escala também possibilita identificar se os raios conseguem ser redirecionados para o início, meio ou para o fundo do teto. Ao mudar os dados de entrada, será possível visualizar o movimento do ângulo defletido para o interior (figura 7, r2, linha vermelha). Na planilha, o valor angular do feixe defletido será acusado em graus (figura 7, r2, célula J9). A fração defletida para o interior (Fd) também é calculada, na célula G5. O intervalo onde 100% da radiação é defletida é aquele situado entre o ângulo mínimo (r_{min} , célula J16) e o máximo (r_{max} , célula, J18).

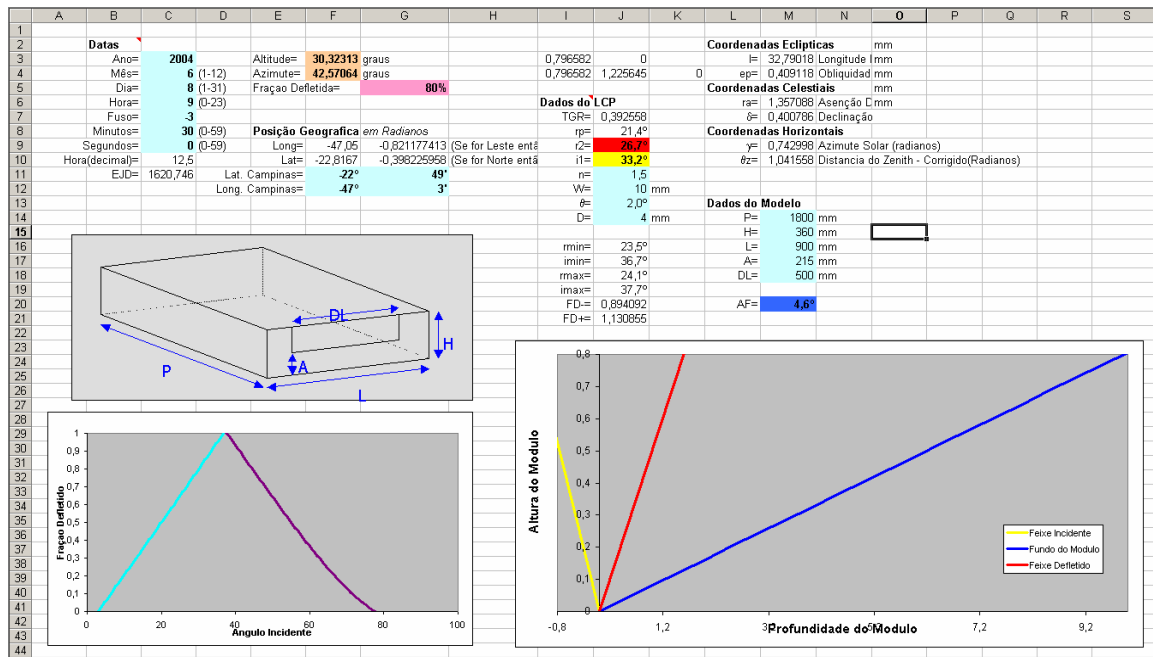


Figura 7 - Primeira planilha- (Entrada de Dados)- Dimensões do espaço e posição solar

3.2 Aplicação do Painel de Corte a Laser para Campinas- Segunda Interface

Na segunda planilha denominada (Deflexão Interna para Campinas) é mostrado o funcionamento do LCP para diferentes angulações de corte (θ), no solstício de verão e de inverno em 2005, para a latitude e longitude específica de Campinas. A planilha também pode fazer os cálculos para outras latitudes e fachadas, de acordo com os dados inseridos na planilha. Os gráficos mostram que a utilização do LCP com ângulos de corte negativos não é uma solução adequada para a latitude de Campinas pois no verão este painel redirecionaria a luz somente no horário em que a altitude solar é baixa, entre 6:00h às 8:00h e 16:00h às 18:00h. Desta maneira um painel com um $\theta < 0^\circ$ não teria um bom desempenho quanto a distribuição da luz pois de acordo com a estratégia procurou-se buscar ângulos de deflexão compatíveis com o ângulo de fundo. Vale ressaltar também que os gráficos representam a hora solar verdadeira, o horário de verão não foi incluído.

Assim sendo, é interessante estudar o funcionamento de dois dispositivos comparativamente com $\theta = 4^\circ$ e $\theta = 12^\circ$. Pela curva da figura 8A, para $\theta = 4^\circ$ durante o verão, pode-se notar que o dispositivo trabalharia durante todo o dia redirecionando a luz para o interior do ambiente. Para o horário de meio-dia o ângulo de deflexão no interior do ambiente seria de 50° . Já para uma placa com $\theta = 12^\circ$, no verão, para o mesmo horário o elemento estaria redirecionando a luz com um ângulo de deflexão igual a 25° , portanto mais favorável em relação ao primeiro, por promover um alcance mais profundo da luz no espaço. No entanto no inverno, esta situação se inverte. De acordo com a planilha será mais adequado o desempenho do elemento com $\theta = 4^\circ$, pois apesar do ângulo de deflexão máximo ter cerca de 30° , o dispositivo estará direcionando os feixes de 7:30h às 17:00h. Já para um elemento com $\theta = 12^\circ$, apesar do redirecionamento para o horário do meio dia ser muito eficiente, com um ângulo de 8° ,

o dispositivo será eficiente apenas nos horários de 10:00h às 14:00h. Além disto há um direcionamento dos feixes em direção ao plano de trabalho nos horários até 10:00h e após às 14:00h. Uma das soluções possíveis para resolver este dilema, da escolha da inclinação dos cortes, pode ser dada pela análise da disponibilidade da luz direta em função da nebulosidade da abobada celeste durante o verão ou inverno.

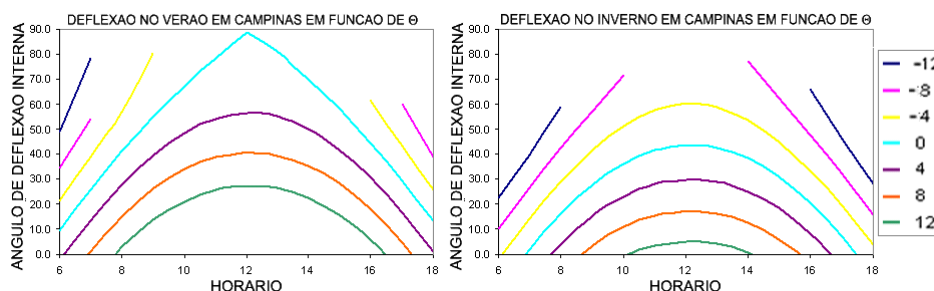


Figura 8 A, B, - Funcionamento do LCP para diferentes ângulos de corte, no verão e no inverno.

3.3 Ângulos de Deflexão em Função dos Ângulos de Incidência - Terceira Interface

A terceira planilha fornece gráficos onde é possível visualizar os ângulos incidentes e os ângulos refratados para o interior para cada ângulo de corte. Note-se a diferença entre um painel com corte $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 12^\circ$, enquanto no primeiro (figura 9 A), todos os feixes são defletidos com o mesmo ângulo ($\theta = 0^\circ$), no segundo caso ($\theta = 12^\circ$), para algumas angulações, os feixes são redirecionados para baixo, atingindo possivelmente, o plano de trabalho e ofuscando o usuário. Isso pode ser razão para utilizar este dispositivo apenas na porção superior de uma abertura. É importante notar, no entanto que a fração defletida deve ser considerada, pois é possível que apenas uma pequena porcentagem da radiação incidente total, esteja sendo defletida para baixo.

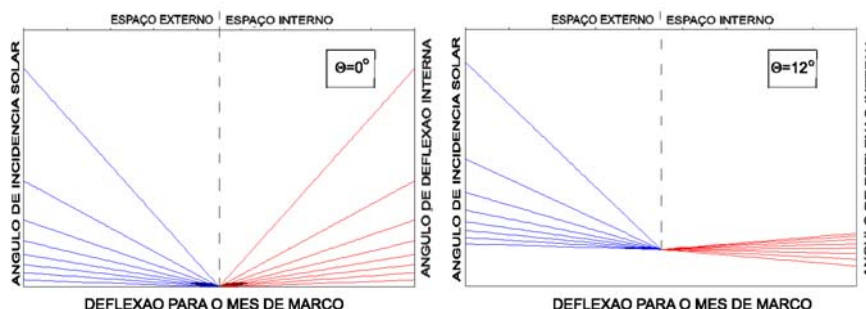


Figura 9 A e B- Ângulos solares incidentes e de deflexão interna no mês de Março em Campinas, no interior de uma maquete em escala, para $\theta=4^\circ$ e $\theta=12^\circ$

Por este motivo, em seguida, a planilha fornece o gráfico das frações defletidas em função dos ângulos de incidência (figura 10). A curva vermelha representa o comportamento do LCP para $\theta = 0^\circ$. Para uma incidência igual a 35° , 100% da radiação estará sendo defletida para o interior; para $\theta = 4^\circ$ isto valerá para o intervalo de ângulos entre 38° e 42° e para $\theta = 12^\circ$ entre 54° e 63° . Assim se para $\theta = 4^\circ$ a luz incide no plano de trabalho antes das 7:00h e depois das 17:00h, no inverno, para $\theta = 12^\circ$ isto acontecerá antes das 9:30h e depois das 3:00h até o final da tarde. Analisar a fração defletida relativa a estas angulações dirá se é conveniente ou não a utilização deste PCL com estas configurações. Ao utilizar um com $\theta = 4^\circ$ significa que 5% da radiação total atingirá diretamente o plano de trabalho nos horários antes das 7:00h e depois das 17:00h. Esta porcentagem não parece ruim, pois em verdade pouca radiação estará entrando de fato no ambiente. Para um painel com $\theta = 10^\circ$, 30% da radiação total estará entrando para os horários antes das 9:30h e depois das 15:00h. Aparentemente a carga térmica adquirida neste segundo caso deve ser maior, mas para a intensidade luminosa é possível que seja uma boa solução, isto poderá ser verificado de fato assim que for feita uma avaliação qualitativa da iluminação natural através dos dados obtidos pelas medições que serão realizadas nos modelos em escala reduzida.

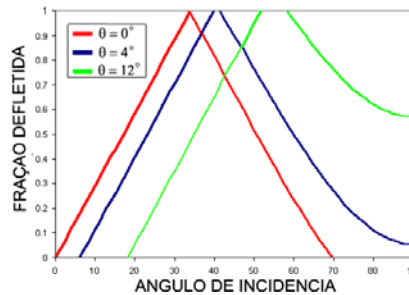


Figura 10 - A curva vermelha mostra a fração defletida para cada ângulo solar incidente para $\theta=0^\circ$, a curva azul mostra a fração defletida para $\theta = 4^\circ$ e $\theta = 12^\circ$ respectivamente.

4. OS PROTÓTIPOS

Os modelos em escala reduzida (figura 11) que foram construídos para estudar a distribuição da luz em ambientes profundos possuem as seguintes dimensões: 90cm de largura; 180cm de comprimento e 45 cm de altura. O interior dos módulos foi pintado na cor branca, com a finalidade de se reproduzir a reflexão que ocorre nas paredes, num ambiente interno, devido a difusão da luz nas superfícies. Os protótipos são orientados de forma que as aberturas estejam voltadas para o norte geográfico. Nelas foram acoplados três LCP de dimensões 15cm × 50cm, com diferentes ângulos de corte, $\theta = 0^\circ$, 9° e 13° .

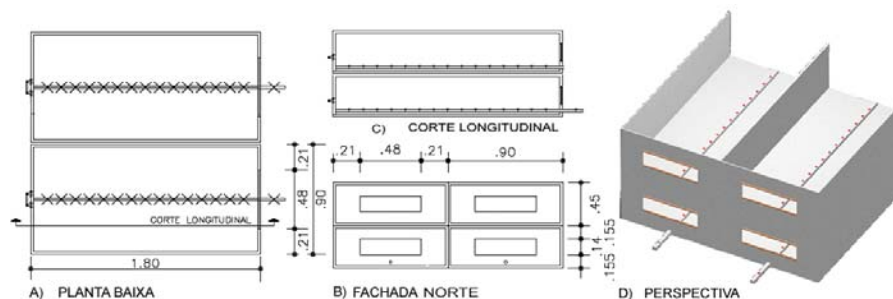


Figura 11- Planta, Fachada Norte, Corte Longitudinal e Perspectiva dos Protótipos onde os painéis LCP foram acoplados para medição das iluminâncias.

Um dos quatro protótipos é o módulo de referência, e tem acoplado em sua abertura um vidro comum de 3mm. Em cada protótipo 15 sensores luminosos do tipo *Light Dependent Resistor* (LDR) foram espaçados igualmente para medição de iluminâncias, com dois sensores externos. Para este estudo foi desenvolvido um circuito para medição, baseado no modelo de Simmonds, 1996 (CIAMPINI, NEVES, SCARAZZATO, 2005). Os gráficos de distribuição das iluminâncias em função do tempo, são resultantes da divisão dos valores registrados pelos LCP em lux, divididos pelos valores obtidos com o uso do vidro comum. Desta forma os gráficos permitem comparar o desempenho destes dispositivos em transportar a luz para o fundo dos módulos.

5. RESULTADOS

A quantidade medida e utilizada para descrever o desempenho deste dispositivo de iluminação natural foi a iluminância (lux), a unidade de medida da luz baseada na eficiência luminosa, que será observada no interior das maquetes em escala reduzida. As medições, realizadas a partir do dia 1 de Fevereiro de 2005 tem confirmado as previsões fornecidas pela ferramenta de simulação, apresentada no item 3 para este período. O desempenho qualitativo destes dispositivos de iluminação natural foi avaliado, normalizando os dados de iluminância registrados dentro dos módulos com os LCP. Para tanto, as iluminâncias medidas no interior das maquetes, para cada um dos painéis com $\theta = 0^\circ$, $\theta = 9^\circ$ e $\theta = 13^\circ$, foram divididas pelas iluminâncias registradas no interior do módulo de referência, aonde foi acoplado o vidro comum. Para cada dia de medição, os gráficos obtidos, são semelhantes aos da figura 12 e 13. Estes por sua vez, são resultantes das medições realizadas para o dia 29 de Março de 2005 (figura 12) para céu totalmente claro, com ausência de nuvens de 8:00h as 18:00h e representam a eficiência de cada LCP, em relação ao uso do vidro comum. A figura 13 mostra os gráficos obtidos em função das

medições realizadas no dia 21 de Março de 2005, para céu encoberto. As cores quentes representam as regiões dentro do módulo que receberam mais luz (os sensores indicaram maiores iluminâncias) do que o módulo de referência com vidro comum. As cores frias indicam as regiões que, no módulo com o LCP acoplado, foram registradas iluminâncias inferiores aquelas registradas no módulo de referência.

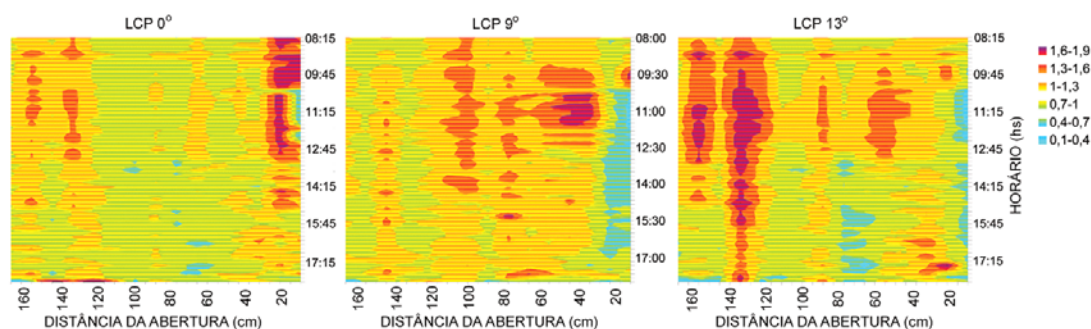


Figura 12 – Gráfico de distribuição das iluminâncias no espaço em função do tempo. Desempenho de Painéis com $\theta = 0^\circ, 9^\circ$ e 13° , em relação ao vidro, de 8:00h às 18:00h, céu claro, para dia 29/03/05.

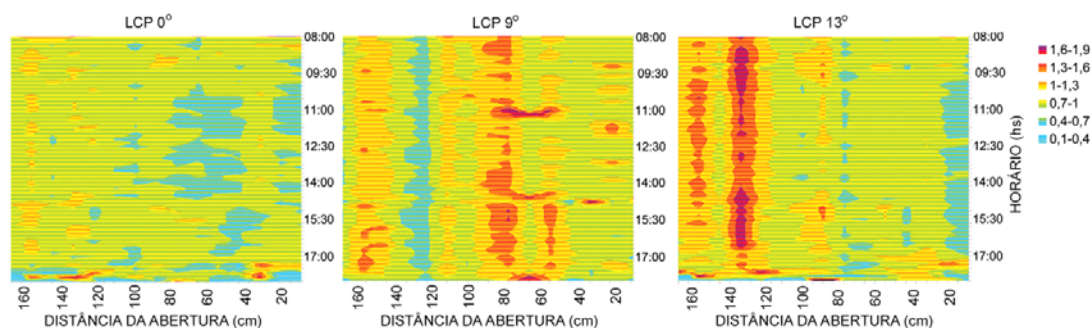


Figura 13 –Desempenho de Painéis com $\theta = 0^\circ, 9^\circ$ e 13° , em relação ao vidro, de 8:00h às 18:00h, para céu totalmente coberto para dia 21/03/05.

Da figura 12 percebe-se que para o mês de Março, em dia de céu claro, um painel com $\theta = 0^\circ$, aumenta a iluminância no período matutino nas proximidades da janela e no período vespertino aumentou em até 30% as iluminâncias no fundo da maquete. Para o painel com $\theta = 9^\circ$, a iluminância nas proximidades da abertura diminuiu entre às 10:00h e 16:00h, sendo que o painel teve uma contribuição maior de 8:00h às 14:00h, redirecionando, porém, a luz, para o meio da maquete, e não para o fundo. Por fim o painel com $\theta = 13^\circ$, mostrou-se eficiente no horário entre 9:00h e 15:30h aumentando de 60% a 90% a iluminância no fundo das maquetes.

Os gráficos da figura 13 mostram o desempenho dos painéis para um dia de céu totalmente encoberto. Da mesma forma que para céu claro, verifica-se que o LCP com $\theta = 13^\circ$ tem a capacidade de redirecionar uma quantidade maior de luz para o fundo do módulo, enquanto aquele com inclinação de 9° redireciona a luz, predominantemente para o meio do protótipo. Por fim o LCP com $\theta = 0^\circ$ mostrou-se pouco eficiente no redirecionamento da luz aumentando a iluminância no fundo do módulo até no máximo 30%. Comparando o desempenho de todos painéis percebe-se que o dispositivo, aumenta, de maneira geral, em 60% a iluminância em dias claros e apenas em 30% em dias encobertos.

A figura 14 ilustra o desempenho qualitativo quanto ao contraste de iluminâncias ao longo da profundidade do ambiente. Como pode ser observado, a curva do LCP 13° (vermelha) é aquela com a menor inclinação no gráfico do logaritmo da iluminância versus distância. Das curvas, pode ser observado que apenas o LCP 13° , além de aumentar a iluminância no fundo do ambiente, foi capaz de reduzir o contraste, em comparação ao observado da curva do vidro e do LCP 0° . Para céu claro, cuja maior contribuição é a luz direta, ambos tiveram uma queda de aproximadamente 6000lux nos primeiros 30cm de profundidade, sendo que o LCP 0° teve uma contribuição pequena no redirecionamento no fundo do módulo. Já em condições de céu coberto, onde a contribuição da luz direta é mínima o contraste do vidro não é tão forte quanto ao do céu do céu claro, mas o LCP 13° manteve o mesmo nível de contraste.

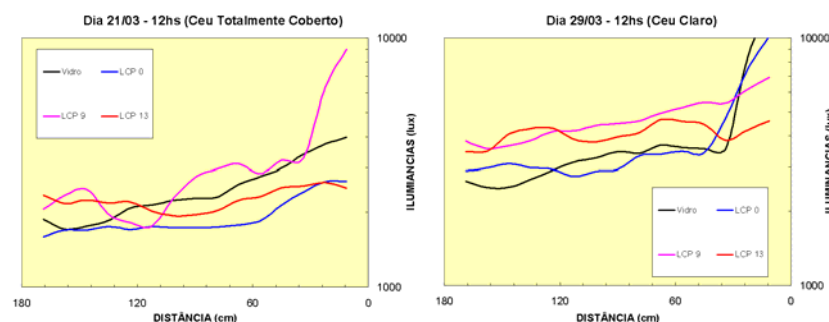


Figura 14 – Distribuição das iluminâncias no modelo em escala, em função da distância da abertura, acoplando painéis LCP com $\theta = 0^\circ, 9^\circ$ e 13° , e vidro, para 12:00h, para céu coberto no dia 21/03/05 e céu claro, no dia 29/03/05.

6. CONCLUSÃO

Com este estudo buscou-se uma metodologia capaz de se apropriar de uma maneira adequada do LCP, para que o mesmo fosse eficiente para nossas latitudes. Assim uma planilha eletrônica foi empregada para simulação de parâmetros de iluminação natural através do dispositivo. Constatou-se que o ângulo de corte é um parâmetro fundamental para otimizar a iluminação no fundo do ambiente e reduzir o contraste. Resta porém adaptar o modelo de simulação para a contribuição da iluminação difusa já que a contribuição desta varia conforme a nebulosidade da abóbada celeste. Somente assim uma comparação exata entre o modelo teórico e o experimental pode ser realizada e aplicada aos projetos de iluminação em edificações, já que as condições de céu são variáveis durante o ano. Investigações futuras pretendem portanto analisar a influência da luz difusa no desempenho destes painéis, considerando que o comportamento da luz direta através do painel já está bem fundamentada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CIAMPINI, F.; NEVES, A.A.R.; SCARAZZATO, P.S. (2005) “Modulo de aquisição de dados para avaliação de iluminâncias”. In: VII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construido, ENCAC-2005, Maceió. Artigo submetido a avaliação.
- EDMONDS, R. I. (1991) Lentara St., Kenmore 4069 Qld Australia. “Transparent light deflecting panel for daylighting rooms”. . Int. Cl. G02B 17/00. U.S. Patent 4,989,952.
- EDMONDS, R. I. (1993) “Performance of Laser Cut light deflecting panels in Daylight Applications”. Solar Energy Materials and Solar Cell, V.29, pp. 1-26.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2000) Daylight in Buildings: A source book on Daylighting Systems and Components. Lawrence Berkley National Laboratory. Disponível em: <http://gaia.lbl.gov/iea21/ieapuba.htm> Acesso em: 20/01/2005.
- MURIEL, M. B.; PADILLA, D., C., A.; MORTALLA T. L.; CAIRA M. L (2001) “Computing Solar Vector”. Solar Energy, V.70, n°5, pp.431-441.
- SIMMONDS, P. (1997) “Compact low-Cost PC-based DAQ Module“. Eletronics. January Australia,
- SZOKOLAY, S.V. (1997) “Solar Control”. In: Time –Saver Standards for Architectural Design Data. 7a Edição pp.37-62. Mc Graw-Hill. Estados Unidos.