

LUZ SOLAR DIRETA: TECNOLOGIA PARA MELHORIA DO AMBIENTE LUMÍNICO E ECONOMIA DE ENERGIA NA EDIFICAÇÃO

Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhI)
DeptO. de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade Federal de Santa Catarina
88.049 - Florianópolis/SC - BRASIL

RESUMO. Este artigo apresenta e discute as potencialidades de uma tecnologia de iluminação emergente - *iluminação solar direta*. Vários de sistemas de iluminação bastante inovativos tem sido propostos no sentido de levar a luz natural até espaços sem direto acesso a aberturas, e possibilitar o controle da distribuição da luz direta do sol, utilizando-a como fonte de iluminação. Esta nova tecnologia apresenta grande potencial em termos de economia de energia no ambiente construído, especialmente em regiões com elevado número de horas de sol. O artigo descreve os sistemas propostos e oferece uma orientação inicial para o projeto de um sistema de iluminação inovativo.

ABSTRACT. This paper describes the potential of beam sunlighting as an illumination technique. New daylighting systems have been proposed seeking to bring daylight deep into spaces, and to manipulate direct sunlight so that it can be used as an effective light source. The correct implementation of this new technique is likely to promote energy savings in the built environment, specially in regions with high sunlight availability. This paper describes the available systems and gives initial design guidelines.

1. INTRODUÇÃO

A *economia da luz solar* - interação da luz solar direta com o projeto da edificação ao invés de sua simples rejeição - é descrita por Lam [1986] como apresentando dois aspectos distintos: produção de um ambiente interno mais confortável e produtivo, e economia de energia na edificação.

Lam também define a economia da luz solar como atendendo a trindade de Vitruvius - solidez, encanto e valor comercial:

- **Solidez:** levar em conta a luz solar não se trata de um estilo arquitetônico de moda, o resultado final não é transiente mas duradouro, simplesmente porque é produzido através da consideração inteligente de princípios básicos do meio ambiente natural. A história da arquitetura tem mostrado edificações belas e sólidas que foram concebidas de acordo com este enfoque;
- **Encanto:** a luz solar satisfaz não somente nossas necessidades psico-fisiológicas e produz um ambiente confortável e produtivo, mas também proporciona um ambiente luminoso prazeroso e encantador, cheio de cores, volume e contraste;
- **Valor comercial:** a energia utilizada para atender a iluminação artificial e a remoção do ganho de calor associado podem assumir uma percentagem considerável da energia consumida em modernos edifícios de escritórios. Desta forma, luz solar, como várias outras técnicas de iluminação natural, tem recebido, nos últimos anos, atenção especial no sentido de conservar energia na operação de edificações.

Neste sentido, o presente artigo aborda o uso consciente da luz solar direta como uma estratégia de conservação de energia, proporcionando iluminação alternativa com reduzido ganho de calor.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Precedentes históricos

Historicamente, em civilizações antigas, o uso consciente da luz solar estava simbolicamente relacionado com a arquitetura religiosa; Ng [1991, p.36] na sua busca do "significado da luz" comentou:

" , _não surpreende ver que o papel dos arquitetos e sacerdotes-astrônomos era frequentemente combinados no mundo antigo".

Os egípcios, por exemplo, acreditavam em Ra, o deus Sol, como sendo o criador de todo universo. A luz proporcionada por ele revestia-se de um elemento essencial em qualquer evento religioso. Eles também acreditavam que a luz os ajudaria a achar o caminho para a vida eterna [Ng, 1991].

Outras evidências foram encontradas na Grande Pirâmide do grupo de Giza (ver Fig. 1), que apresenta pequenas aberturas na superfície externa, ligadas a dutos que penetram diretamente ao centro da pirâmide

"A razão destes dutos não é conhecida com certeza, podem ter sido projetados para ventilar as câmaras internas ou mesmo por motivos religiosos... " [Edward, 1979, p. 126].

O fato é que o duto voltado para o Sul tem um ângulo em relação a vertical de 45°, que faz com que os raios de sol, em meados de Janeiro ao meio dia, sejam levados diretamente ao centro da pirâmide.

Avançando no tempo, encontramos outro exemplo do uso simbólico da luz solar em arquitetura religiosa datando de 1628, na Espanha, a Catedral de Toledo. Ela apresenta uma curiosa abertura,

posicionada fora do ângulo de visão normal, que redireciona e espalha a luz solar para iluminar um grupo de esculturas (ver Fig. 2).

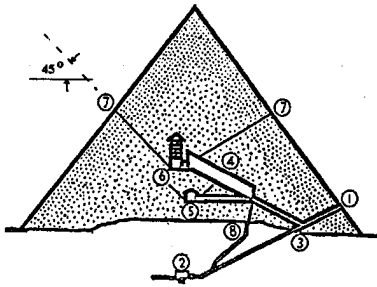


Fig. 1: A Grande Pirâmide, corte Oeste [Edwards, 1979].



Fig. 2: Abertura escondida na Catedral de Toledo [Benevolo, 1978].

Aberturas escondidas, produzindo uma luz "misteriosa", foram bastante usadas durante o período renascentista [Benevolo, 1978].

Embora o redirecionamento de luz direta já tivesse sido mencionado na década de 60 como uma técnica de iluminação natural [Markus, 1960], neste caso usando vidros prismáticos, somente em meados da década de 70, com a crise energética mundial, que a luz solar direta começou a ser levada em consideração como uma técnica potencial para iluminação e economia de energia [Rosenfeld & Selkowitz, 1977].

2.2 Luz solar: fonte de luz e calor

Devido à distância entre o Sol e a Terra, a luz direta do sol se comporta como uma intensa fonte colimada, proporcionando uma iluminação de 60 a 110 kLux no plano horizontal, o que é 10 a 15 vezes a iluminação proporcionada pela abóbada celeste em caso de céu encoberto. A quantidade de luz contida em 1 m² de luz do sol poderia garantir, caso uniformemente distribuída, em torno de 500 lux de iluminação sobre uma área de 200 m².

Entretanto, o alto conteúdo energético (luz e calor) da luz solar é geralmente excluído do ambiente construído devido aos possíveis efeitos adversos sobre:

- ⊗ ambiente térmico (superaquecimento);
- ⊗ ambiente lumínico (ofuscamento);
- ⊗ integridade física dos materiais.

Este alto conteúdo energético associado ao atributo de colimação da luz solar são exatamente os principais aspectos a serem considerados para o uso racional da luz direta do sol como fonte luminosa para o ambiente construído. Desta forma, pequenas aberturas devem ser suficientes para o adequado aproveitamento desta vasta quantidade de luz, que de outra forma seria ineficientemente desperdiçada de encontro as fachadas opacas. O uso da componente direta da radiação solar como técnica de iluminação natural pode ser denominada de "projeto adaptado à luz solar direta".

Outro aspecto importante é que tanto a luz solar como a luz proveniente da abóbada celeste apresentam uma razoável eficiência luminosa, em tomo de 100 - 130 lm/W e 90 - 115 lm/W, respectivamente, em comparação com os 60 - 70 lm/W proporcionados pelas lâmpadas de descarga e os 10 - 50 lm/W das lâmpadas incandescentes (ver Tabela 1). Portanto, a troca de um lumen de luz elétrica por um lumen de luz natural, pode potencialmente reduzir a carga de refrigeração e ao mesmo tempo melhorar a qualidade do ambiente luminoso.

Tabela 1: Eficiência luminosa da radiação solar e alguns tipos de lâmpadas.

	EFICIENCIA LUMINOSA (lm/W)
RADIACAO SOLAR *	
- Sol direto (altitude solar 60°)	90 - 115
- Global com céu claro	95 - 125
- Difusa com céu claro	100 - 145
- Céu encoberto	100 - 130
LÂMPADAS**	
• Incandescente	
- Filamento de tungstenio (vacuo)	8 - 18
- Filamento halógeno detungstenio (vacuo)	18 - 24
• Descarga	
- HP descarga de mercúrio e tungstenio (com gas)	10 - 26
- HP descarga de mercúrio	36 - 54
- Descarga de mercúrio com baixa pressao (tubular)	37 - 90

* Dados obtidos em Pereira [1992].

** Dados obtidos em CIBS Code for Interior Lighting [1984].

Resumindo, da perspectiva de conservação de energia, a luz direta do sol pode ser bastante atraente pelas seguintes razões:

luz do sol é abundante durante a maior parte do horário de trabalho, especialmente nos meses de verão, indicando que sistemas de aberturas corretamente projetados podem garantir iluminação necessária para substituir a iluminação artificial, reduzindo a demanda de eletricidade tanto para iluminação como para refrigeração;

a alta eficiência luminosa e a excelente reprodução de cores da luz solar, se comparada com lâmpadas elétricas, sugere uma solução viável para reduzir a carga de refrigeração através da substituição do lumen elétrico pelo da luz do sol com menor conteúdo de calor.

No caso de ambientes iluminados lateralmente, a luz natural possui uma direção predominantemente de cima para baixo, resultando normalmente numa distribuição de iluminação interna bastante não uniforme e com um alto gradiente através da peça. Áreas próximas a janela são bem iluminadas, enquanto a poucos metros adiante o ambiente pode se mostrar bastante sombrio. A

maneira de se superar esta situação é através da chamada Iluminação natural interior [Littlefair, 1990], que significa levar iluminação natural com grande intensidade as áreas mais centrais das edificações (ver Fig. 3).

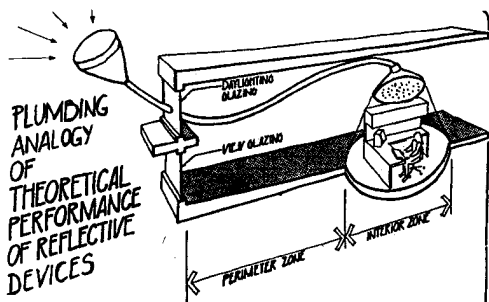


Fig. 3: Analogia à instalação hidráulica do funcionamento teórico de sistemas de "iluminação natural interior".

A combinação da "luz solar direta" com "iluminação natural interior", chamada por Chavez [1990] de "iluminação interior com luz solar direta", trata da utilização da luz do sol como fonte de luz principal para iluminar áreas centrais das edificações, além do perímetro próximo as fachadas.

A seção a seguir apresenta os princípios básicos para controle da luz em projetos de luz solar direta.

2.3 Mecanismos de controle da luz

No sentido de capturar, conduzir e distribuir corretamente a luz do sol quando e onde ela é necessária, é importante que se conheça os principais mecanismos pelos quais ela pode ser manipulada. Além disso, a luz solar está constantemente em movimento e, dada sua intensa luminância, ela deve ser utilizada em sua forma difusa, preferencialmente através de refletores secundários.

A luz do sol pode ser manipulada pelo uso inteligente de uma série de mecanismos diferentes: reflexão, transmissão, refração, polarização, absorção, difusão, etc. Os primeiros três são os mais importantes para o projeto adaptado ~ luz solar.

Quando a luz incide numa superfície, uma fração ρ do total incidente é refletida, i.e. retorna ao hemisfério de procedência sem penetrar na matéria, uma outra porção, a , é absorvida dentro do material, configurando-se num ganho de energia, enquanto a última fração τ pode ser transmitida (no caso de superfícies transparentes ou translúcidas) para o outro lado (ver Fig. 4).

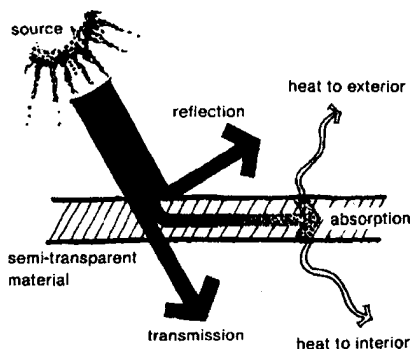


Fig. 4: Recepção do fluxo luminoso por uma superfície.

Caso ϕ_i , ϕ_r , ϕ_t e ϕ_a sejam, respectivamente, o fluxo luminoso total incidente, refletido, transmitido e absorvido, pode-se denominar:

$$\ast \text{ refletância, a quantidade } \rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (1)$$

$$\ast \text{ transmitância, a quantidade } \tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (2)$$

$$\ast \text{ absorptância, a quantidade } \alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} \quad (3)$$

$$\text{com } \rho + \tau + \alpha = 1 \quad (4)$$

Os elementos acima representam a percentagem total de luz refletida, transmitida e absorvida, no entanto, não fornecem nenhuma informação a respeito da forma de propagação da luz imposta pela superfície após a incidência.

A - Reflexão

Fig. 5 mostra como a direção da luz refletida é afetada pela textura da superfície, variando de difusa (luz refletida igualmente em todas as direções) a especular (luz refletida somente numa direção, i.e. reflexão de espelho).

Superfícies rugosas refletem de modo predominantemente difuso, independente do ângulo de incidência, fazendo que, desta forma, a luminância da superfície seja resultado apenas da iluminação no plano da mesma e de sua refletância.

Superfícies polidas e brilhantes produzem reflexão especular (de espelho), com o raio de luz refletido localizando-se no plano de incidência e com ângulo de reflexão igual ao de incidência. A reflexão especular é dita "como de espelho" porque ela mantém à aparência, direcionalidade e tamanho da fonte original. Considerando a luz solar, superfícies que refletem especularmente pode ser bastante úteis, mas igualmente prejudiciais caso as reflexões não sejam adequadamente controladas. Uma vez que o sol trata-se de uma fonte móvel (para o sistema terrestre), tais refletores devem seguir sua trajetória ou, pelo menos, atender a certas situações particulares.

Uma boa combinação é o uso de superfícies especulares como refletores primários para trazer a luz solar para dentro das edificações, e refletores secundários difusos (e.g. teto) para distribuir a luz sobre o espaço interior.

Entretanto, em geral, as superfícies encontradas na prática não são nem perfeitamente difusas nem especulares, refletindo luz em varias direções em diferentes proporções (ver Fig. 5).

O uso adequado de reflexões compostas (semi-difusa ou semiespecular) pode ser bastante útil para o controle da direção da luz direta e/ou para suavizar as imagens.

B - Transmissão

A transmissão de luz através de superfícies não opacas ocorre de um modo similar ao do mecanismo de reflexão. A luz pode ser transmitida tanto de maneira difusa como colimada ou mesmo de uma forma combinada, produzindo resultados distintos no ambiente lumínico (ver Fig. 6).

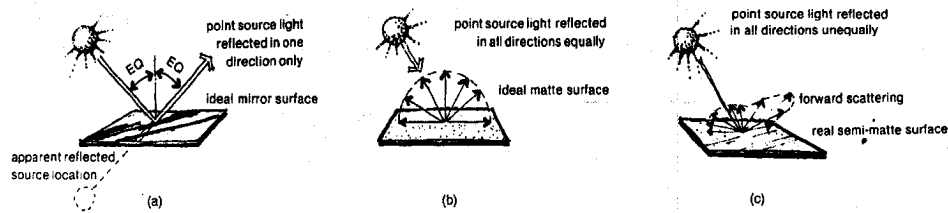


Fig. 5: Reflexão de acordo com a textura da superfície [Moore, 1991]: a - especular; b - difusa; c - semi-difusa.

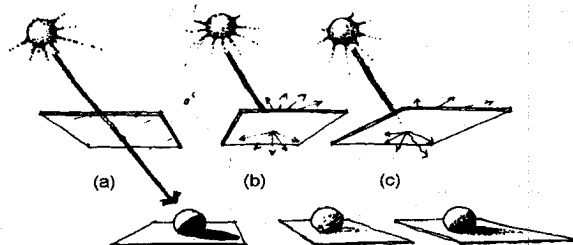


Fig. 6: Transmissão de acordo com as propriedades difusoras das superfícies [Moore, 1991]: a - especular; b - difusa; c - semi-difusa.

A transmitância de uma superfície é afetada pelo ângulo de incidência e pelas características difusoras da mesma. Para um projeto adaptado à luz solar o material ideal deveria transmitir a maior parte da luz visível mantendo fora as porções ultravioleta e infravermelho do espectro solar. Novos tipos de vidro têm sido estudados e propostos no sentido de aumentar a transmissão da luz natural e a reflexão do calor solar [Selkowitz & Griffith, 1986; Orioli et al, 1990].

C - Refração

O fenômeno de refração da luz ocorre quando a luz atravessa materiais com índices de refração distintos; a direção do fecho de luz é alterada durante sua trajetória através do material. Este é o princípio dos blocos e painéis de vidro prismáticos (maiores informações na seção 3.3. 1).

O principal aspecto negativo do fenômeno da refração é o distorção das imagens, o que sugere uma integração de porções da janela dedicadas distintamente à iluminação e à visão.



O sucesso do projeto adaptado à luz direta do sol depende do uso inteligente e da combinação destes mecanismos de controle da luz, e uma correta integração com os aspectos de disponibilidade e geometria da luz solar. O desafio contido nesta afirmação tem estimulado propostas bastante promissoras, e vários sistemas de aberturas tem sido propostos sob este enfoque. A seção a seguir apresenta uma revisão de alguns destes sistemas inovativos.

3. SISTEMAS INOVATIVOS PARA ILUMINAÇÃO NATURAL

3.1 Dutos de luz

Dutos ou canais de luz foram provavelmente introduzidos nas edificações numa tentativa de projetistas e engenheiros em controlar a distribuição da luz natural para necessidades específicas e para trazer luz natural até áreas sem acesso a ela.

Do ponto de vista arquitetônico, iluminação central tem sido obtida através do uso de atriums, pátios ou poços de iluminação, com ou sem elementos especiais para redirecionamento da luz disponível (Fig. 7).

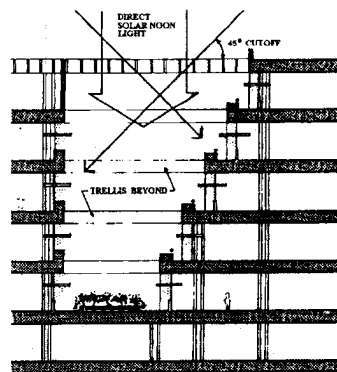


Fig. 7 : Pátio de luz no Government Service Systems Headquarters em Manila, Filipinas [Lam, 1986].

Entretanto, a idéia de canalização da luz natural, como qualquer outro serviço, é tecnologicamente excitante principalmente pela longa distância que pode ser percorrida pela luz canalizada [Littlefair, 1990]. Fig. 8 mostra um sistema de iluminação por luz direta do sol implementado na Universidade de Minnesota (USA) utilizando espelhos rastreadores e lentes para conduzir os raios de sol até o sub-solo (33m abaixo do solo),

Devido as suas características direcionais e alto conteúdo energético, a luz solar é bastante adequada ao processo de canalização. O duto de luz, no entanto, para manter uma eficiência razoável, deve acompanhar o sol de um modo ativo, razão pela qual estes sistemas tem sido denominados de "sistemas de iluminação solar ativos" [Ngai, 1983; Ruck, 1989].

O projeto de sistemas ativos consiste basicamente em três sub-sistemas:

- (1) sistema de coleta da luz;
- (2) sistema de transmissão e distribuição da luz;
- (3) sistema de emissão da luz.

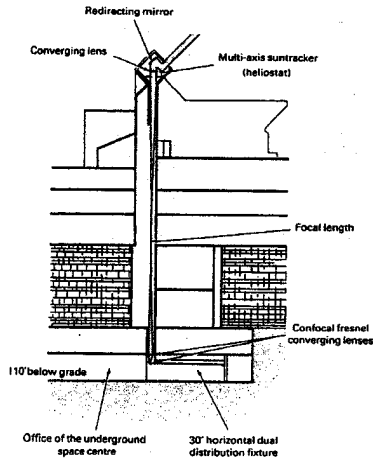


Fig. 8: Sistema de rastreamento da luz direta do sol na Universidade de Minnesota, USA [Bownam, 1985].

3.1.1 Sistema de coleta da luz

A coleta da luz solar pode ser feita através de espelhos e/ou lentes montados em sistemas de rastreamento do sol, produzindo um sistema usualmente chamado de "heliostato". Quanto maior área de coleta melhor; entretanto, para ser transmitida através de estreitos dutos, a luz também precisa ser concentrada (ver Fig. 9 e 10)

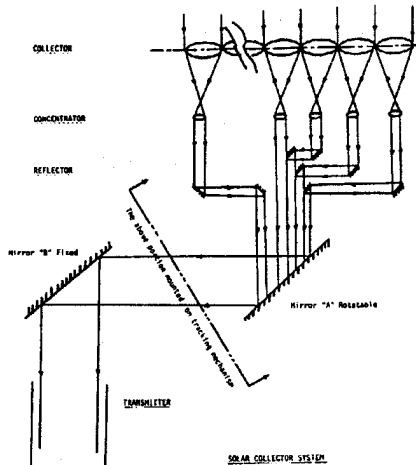


Fig 9: Sistema de coleta de luz [Ngai, 1983].

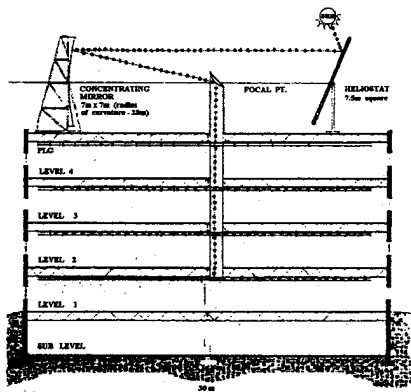


Fig. 10: Sistema de rastreamento e coleta, emissão da luz solar [Whithead et al, 1984].

Tendo que acompanhar o sol todo o tempo através de um sistema mecânico, "heliostatos" são geralmente caros e dependem de um bom controle e manutenção. Somando a este aspecto o problema do tamanho do coletor e assumindo uma eficiência. prática em torno de 20% [Ruck, 1989], o resultado final pode ser um enorme coletor de luz solar que deve ser movido para acompanhar a trajetória solar num alinhamento óptico preciso!

3.1.2 Sistema de transmissão e distribuição da luz

A transmissão e distribuição dentro da edificação da luz do sol coletada e concentrada consiste numa estrutura tubular que atravessa os pisos verticalmente, com seus tributários horizontais para cada pavimento (ver Fig. 10).

Com respeito a enorme quantidade de energia térmica produzida pela concentração da luz direta do sol, tem havido propostas experimentais de remoção * do calor durante o processo de transmissão e distribuição, no sentido de proporcionar uma luz "fria" no final dos dutos não contribuindo para a carga de refrigeração [Duguay & Edgar, 1977; Whitehead et al, 1984].

O mais simples duto de luz trata-se de um duto vazio [Smart & Ballinger, 1983; Ngai, 1983; Ruck, 1989], mas para reduzir a atenuação da luz causada pelas múltiplas reflexões, devido a possíveis desalinhamentos do sistema de coleta, diversas variantes tem sido apresentadas (Fig. 11):

- ⊗ dutos metálicos refletivos ou espelhados [Baranov, 1976];
- ⊗ lentes guia ou de colimação [Bennett & Eljaji, 1980];
- ⊗ dutos prismáticos [Whitehead et al, 1984];
- ⊗ feixes de fibra ótica [Fraas et al, 1983].

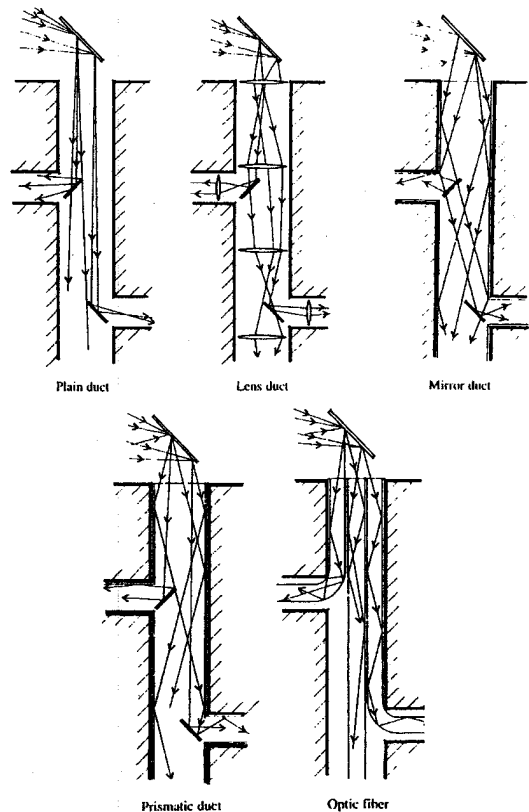


Fig. 11: Diferentes opções de sistemas de transmissão da luz [Ruck, 1989].

A distribuição pode ser feita através de espelhos, conforme sugerido por Ngai [1983], removendo e redirecionando parte do fecho de luz principal necessário para cada seção do edifício. No caso de fibra óptica, os feixes podem ser simplesmente dobrados e direcionados para o espaço a ser iluminado.

3.1.3 Sistemas de emissão de luz

Finalmente, a luz solar coletada e transmitida deve ser entregue ao espaço interno através de um elemento que pode ser chamado de "luminária solar". A luz direta do sol, influenciada pelo tipo do sistema de transmissão e distribuição, tem que ser adequadamente trabalhada e emitida de acordo com a aplicação.

Embora todos os princípios da prática da iluminação elétrica possam ser aplicados, muito pouca pesquisa tem sido realizada no projeto de sistemas de emissão de luz. Ngai [1983] apresenta duas opções de sistemas emissores (ver Fig. 12); ambos usam lentes côncavas para espalhar o fecho de luz, mas enquanto um usa lentes tipo Fresnel (lineares) para produzir uma iluminação direta, o outro proporciona uma iluminação indireta refletindo a luz sobre o teto através de espelhos côncavos.

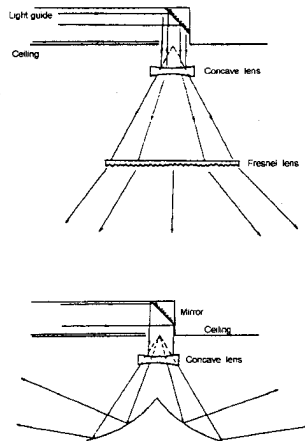


Fig. 12: Sistemas de emissão de luz [Ngai, 1983].

Além do correto projeto dos sub-sistemas acima descritos, faz-se necessário levar em consideração a integração com o sistema de iluminação artificial para os períodos de ausência de sol.

Em geral, o alto custo associado a instalação, custos de operação e manutenção de sistemas de rastreamento da luz solar revestem-se de fatores limitantes na sua aplicação.

3.2 Bancadas de luz (light shelves)

Bancadas de luz não são um conceito novo. Na década de 50, pesquisadores do Building Research Station (UK) propuseram uma bancada de luz para iluminar uma ala hospitalar com grande profundidade, e ao mesmo tempo controlar a insolação e ofuscamento, devido à abóbada celeste dos pacientes localizados próximos as janelas (Fig. 13) [Hopkinson et al, 1966; Littlefair, 1990].

Bancadas de luz têm sido largamente empregadas conjuntamente com janelas para proporcionar sombreamento e controle de ofuscamento, ao mesmo tempo que admitindo luz solar e de abóbada por reflexão (Fig. 14).

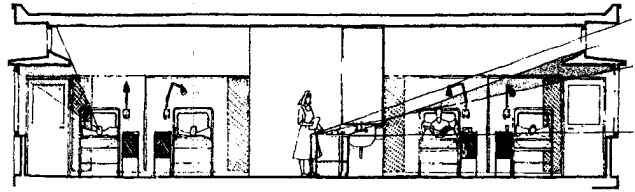


Fig. 13: Bancadas de luz utilizadas no Larkfield Hospital, Greenoch, UK [Hopkinson et al, 1966].

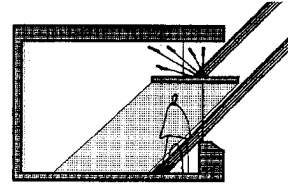


Fig. 14: Conceito de bancadas de luz: sombreamento e controle de ofuscamento com admissão de luz do sol e da abóbada refletida.

A maioria dos trabalhos mais recentes sobre bancadas de luz [Seikowitz et al, 1983; Moore, 1991; Lam, 1986; Robbins, 1986; Chavez, 1990; Shukuya & Ohashi, 1991] concordam que, embora uma janela com bancadas de luz, sob luz de abóbada apenas, proporciona menos iluminação no fundo da peça do que uma janela comum, a distribuição da iluminação interna mostra uma melhora considerável. Por outro lado, sob luz direta do sol, as bancadas de luz conseguem efetivamente melhorar a penetração de luz natural, produzindo elevados níveis de iluminação no fundo das peças, bem como melhorando a distribuição interna e reduzindo o ganho de calor solar.

Além disso, a capacidade da bancada de luz de controlar a penetração da luz solar, melhorar o nível de iluminação natural no fundo das peças e controlar ofuscamento devido a abóbada celeste, tem estimulado e encorajado o projeto e desenvolvimento de sistemas de aberturas bastante sofisticados (Fig. 15 (a) e (b)) [Lam, 1986; Heap et al, 1988].

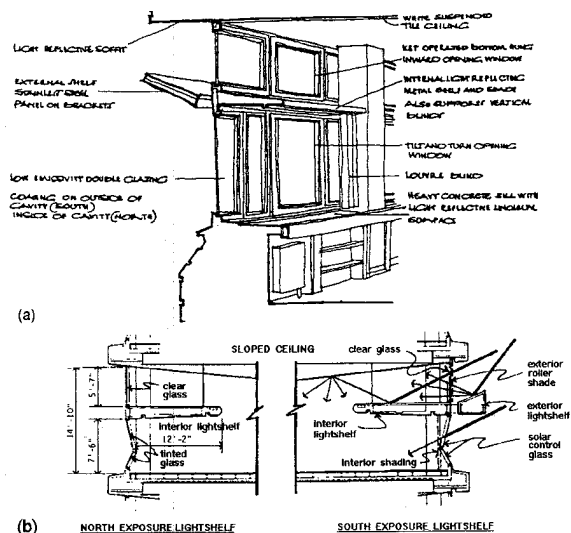


Fig. 15: Exemplos de sofisticadas implementações do conceito de bancadas de luz:

- (a) South Staffordshire Water Company Offices, UK [Heap et al, 1988];
- (b) Lockheed Building, Sunnydale, California, USA [Lam, 1986].

Uma implementação curiosa do conceito de bancada de luz foi proposta por Howard e co-autores [1986], e chamada de "Variable-Area Light-Reflecting Assembly" - VALRA. O principal elemento trata-se de um filme espelhado ligado a um rolete móvel; diferentes posições do rolete fazem com que o filme refletivo seja exposto à luz direta do sol em áreas e ângulos variáveis, de acordo com a posição do sol (Fig. 16)

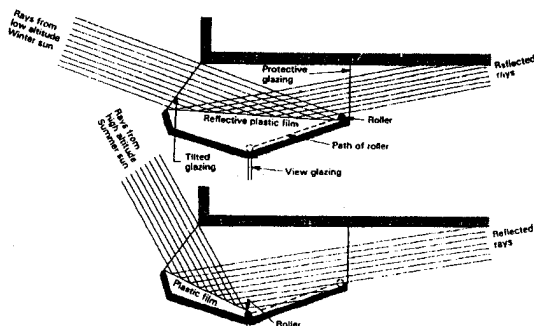


Fig. 16: Variable-Area Light-Reflecting Assembly - VALRA [Howard et al, 1986].

Outra idéia interessante a ser utilizada em combinação com uma bancada de luz é o "forro iluminante" [Hill et al, 1985], que foi concebido como uma extensão de uma bancada de luz interna até o fundo da peça, criando um forro refletivo para conduzir luz natural até áreas sem acesso direto a mesma (ver Fig. 17).

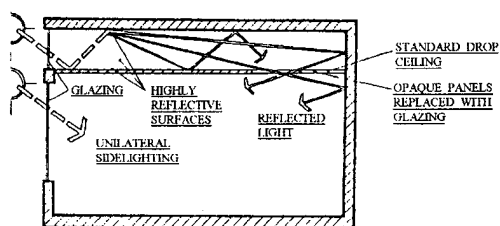


Fig. 17: "Forro iluminante" refletivo [Hill et al, 1985].

Orientações de projeto e considerações a respeito de dimensões, posicionamento (altura, inclinação, interna x externa) e acabamento de bancadas de luz podem ser encontradas em Lam [1986].

3.3 Sistemas de deflexão da luz

O princípio de deflexão da luz, alteração da direção da luz solar incidente, tem sido largamente empregado tanto em iluminação lateral como zenital. Este fenômeno tem sido obtido através de dois enfoques distintos:

substituição do sistema envidraçado por elementos ópticos que transmitem e defletem a luz, tais elementos ópticos se baseiam na refração da luz em elementos prismáticos (blocos e painéis de vidro prismático), e em elementos de reflexão interna total [Ruck, 1985; Cowiing & Veevers, 1990; Edmonds, 1991];

uso de componentes especiais de reflexão posicionados ao longo dos painéis envidraçados; este grupo se refere basicamente as superfícies de reflexão especular, como venezianas, persianas, pára-sóis, sistemas de iluminação zenital, etc. [Rosenfeld & Selkowitz, 1977; Kiniura & Shukutani, 1979; Rodgers et al, 1979; Smart & Ballinger, 1983; Shukuya & Kimura, 1986; Lam, 1986; Ruck, 1986; Appellmann & Moore, 1987; Fontoynt & Paule, 1988].

3.3.1 Sistemas prismáticos

Blocos de vidro e lentes lineares planas apresentam ambas seções prismática, consistindo basicamente de uma fileira de prismas triangulares (ver Fig. 18). A luz incidente é defletida por refração nas superfícies externas e pode ser redirecionada para o fundo dos espaços edificados.

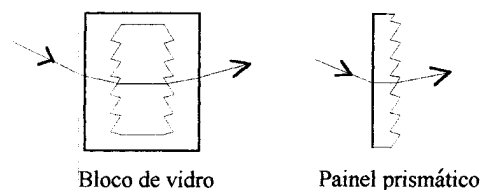


Fig. 18: Deflexão da luz por refração.

Inicialmente, blocos de vidro prismático foram utilizados para coletar e redirecionar luz natural proveniente da região zenital da abóboda celeste, em casos de intensa obstrução externa [Hopkinson et al, 1966]. Eles foram empregados em escolas nas décadas de 40 e 50, e normalmente, por causa dos efeitos de visão negativos, em combinação com aberturas especialmente destinados à vista externa [Ruck, 1986]. Entretanto, se a visão ou o controle da distribuição da luz não são elementos importantes, blocos de vidro podem garantir uma boa quantidade de luz, como no caso de pavimentos levando luz natural a espaços no sub-solo.

Sistemas de vidro prismático tem sido empregados para redirecionar (admitindo ou barrando) luz solar (ver Fig. 19). Um trabalho de pesquisa sistemático tem sido desenvolvido na Austrália no sentido de determinar as vantagens to uso de vidros prismáticos como uma técnica de iluminação e conservação de energia na edificação [Rodgers & Phillips, 1981; Ruck, 1985, 1986, 1989]. Os painéis prismáticos testados consistiam de lentes lineares (Fresnel) feitas de "plexiglass", posicionados na porção superior das janelas (acima do nível de visão) para evitar distorção das imagens e situações de ofuscamento.

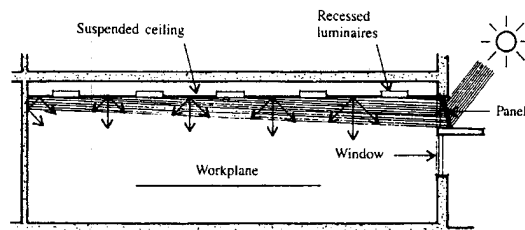


Fig. 19: Painel prismático para deflexão da luz direta do sol [Ruck, 1989].

Fig. 20 mostra a trajetória da luz através do painel prismático. As porções desejável (direcionada para cima) e indesejável (direcionada para baixo) da luz refratada dependem dos ângulos γ e β . Como não existe um único valor para estes ângulos que consiga capturar e redirecionar toda a luz solar incidente ao longo de todo o ano, alguma forma de inclinação é recomendável, especialmente no sentido de prevenir luz defletida para baixo diante de grandes altitudes solares [Ruck, 1985; Sweitzer, 1992]. A transmissão global de luz é afetada por perdas de luz nas reflexões dentro dos prismas e através dos vértices; Ruck [1986] menciona valores para transmissão efetiva em torno de 50 - 70%, dependendo da altitude solar.

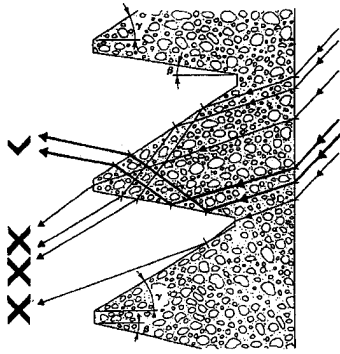


Fig. 20: Trajetórias da luz através de um painel prismático [Ruck, 1985]:

- ✓ desejável;
- * indesejável.

3.3.2 Sistemas de reflexão interna total

A substituição de painéis envidraçados por elementos ópticos planos que transmitem e defletem a luz através de uma combinação de refração nas superfícies externas e reflexão total nas superfícies internas constitui numa das mais recentes tecnologias de iluminação natural.

Cowling & Veevers [1990] apresentaram o Módulo de Canalização de Luz (MCL), que baseia-se numa seção sólida de um material dielétrico com uma base curva e uma superfície superior em forma de V (ver Fig. 21 (a)). As seções são montadas de acordo com a Fig. 21 (b), deixando uma câmara de ar no meio.

A forma e os ângulos das superfícies superior e inferior são definidas de modo a proporcionar a luz um canal de passagem (por reflexão total nas superfícies internas) através do módulo, para a mesma emergir do outro lado direcionada para cima.

O painel proposto tem condições de trabalhar com a luz solar numa margem de variação do ângulo de incidência vertical entre 200 - 700 (Fig. 21 (b)), não necessitando de ajustes constantes. Uma das diferenças mais notáveis deste sistema para outros de deflexão de luz é que, por causa da curvatura numa das superfícies, os raios de luz emergentes são espalhados dentro de uma margem de ângulos em vez de serem transmitidos num fecho único.

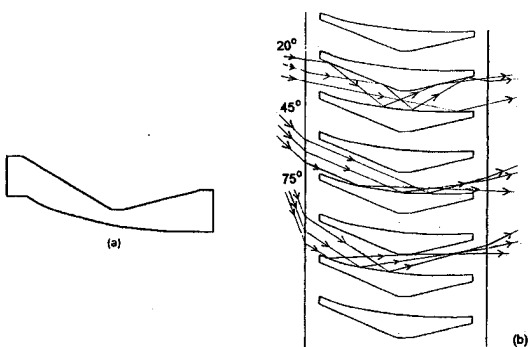


Fig. 21: Módulo de Canalização da Luz [Cowling & Veevers, 1990]:

- (a) seção individual;
- (b) elementos sólidos montados para formar um painel, com simulação de trajetórias.

Como vidros prismáticos, o MLC também apresenta características de distorção da visão, indicando que os módulos devam ser fixados na porção superior das aberturas, fora do ângulo normal de visão.

Os autores apresentam uma transmitância em torno de 70 - 80%, dependendo do ângulo de incidência. Testes iniciais mostraram um aumento médio no desempenho de iluminação natural de 3 vezes o de uma janela envidraçada comum, numa posição de medição 5m da janela e dentro de uma margem de ângulo de incidência entre 40°-70°.

Embora os resultados sejam encorajadores, para uma avaliação mais precisa do potencial de economia de energia, alguns outros aspectos, como desempenho térmico e custos de produção e instalação dos módulos, precisam ainda ser analisados.

Outro interessante e inovativo painel de deflexão da luz natural apresentado por Edmonds [1991], e consiste de um painel plano transparente no qual são feitos, através de uma técnica de corte por fio laser, uma série de cortes bem finos no sentido da largura do painel. O laser corta fundindo o material e produzindo superfícies internas altamente refletivas (ver Fig. 22).

A porção de luz refletida pelo painel cortado com laser, para um certo ângulo de incidência, depende da relação WS e do ângulo dos cortes. Equações simples são apresentadas pelo autor para determinar esta porção para cortes normais ao plano do painel.

Entretanto, para um controle efetivo da transmissão da luz solar (redirecionamento ou exclusão), o painel precisa ser montado num sistema basculante (Fig. 23). Assim, enclinando-se os painéis pode-se ajustar o sistema de acordo com exigências particulares de transmissão. Um aspecto importante é que a transparência entre os cortes é mantida num nível bem razoável, permitindo a visão através do painel.

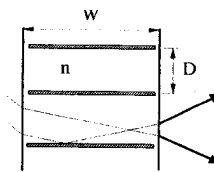


Fig. 22: Seção transversal de um painel defletor cortado a laser, onde n é o índice de refração do material.

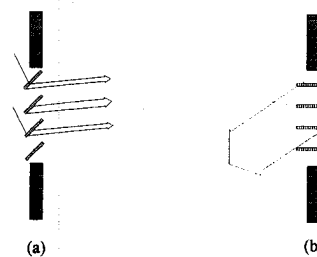


Fig. 23: Admissão (a) e exclusão (b) da luz direta solar por enclinação do painel defletor.

3.3.3 Sistemas espelhados

Certamente, a maneira mais simples e fácil de redirecionar luz colimada é através de superfícies refletoras especulares (espelhadas). Pequenas superfícies espelhadas são colocadas ao longo da abertura para defletir e redirecionar parte da luz direta do

sol na direção de refletores difusores secundários posicionados no fundo da peça.

Embora venezianas tenham sido propostas inicialmente para sombreamento, exclusão da luz direta do sol e controle de ofuscamento [Olgyay & Olgyay, 1963; Danz, 1967], venezianas com reflexão especular se tomaram o exemplo típico de sistemas de deflexão por espelhos, interceptando a luz solar e redirecionando-a para o teto para posterior redistribuição da luz natural (ver Fig. 24) [Rosenfeld & Selkowitz, 1977; Kimura & Shukutani, 1979; Rodgers et al, 1979; Smart & Bailing, 1983; Shukuya & Kimura, 1986; Lam, 1986; Ruck, 1986; Appellmann & Moore, 1987].

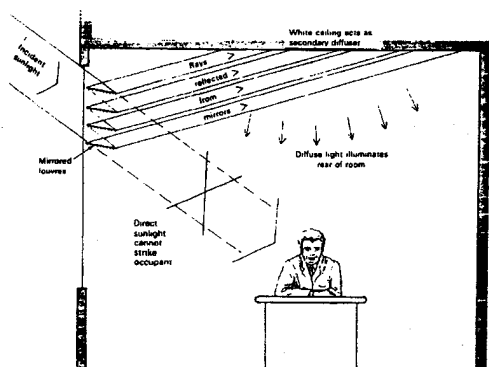


Fig. 24: Conceito de deflexão da luz direta do sol através de sistemas espelhados.

Diferentemente dos sistemas prismáticos, que tendem a distorcer as imagens, venezianas podem, dependendo da disposição, bloquear a visão ou introduzir ruído na informação visual [Markus, 1967; Kheira, 1991]. Portanto, devido a este aspecto e possíveis reflexões ao nível da visão (ofuscamento), venezianas refletoras devem também ser instaladas na porção superior das aberturas.

Como qualquer outro sistema baseado em espelhos para a deflexão da luz solar, venezianas refletoras necessitam de ajustes regulares, de acordo com a posição do sol, para garantir sua efetividade. Para períodos curtos o ajuste do ângulo pode ser suficiente, mas para mudanças sazonais da trajetória solar ajustes tanto na inclinação como no espaçamento entre as lâminas são necessários para evitar que a luz do sol passe direto por entre as lâminas e para manter a iluminação a uma profundidade constante (Fig. 25).

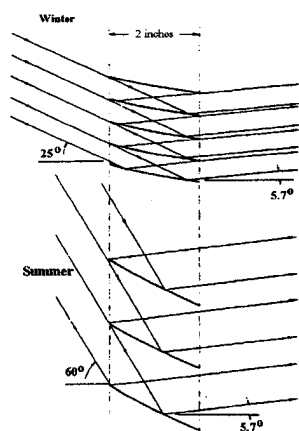


Fig. 25: Ajustes de inclinação e espaçamento necessários para manter a iluminação a uma profundidade constante dentro da peça tanto no inverno como no verão (40° de latitude).

Um aprimoramento do projeto de venezianas horizontais foi implementado por Fontoynt & Paule [1988] numa escola secundária na França. Fig. 26 ilustra a seção transversal da veneziana, mostrando o formato triangular definido para facilitar e melhorar o controle da admissão e exclusão da luz solar durante os períodos de verão e inverno.

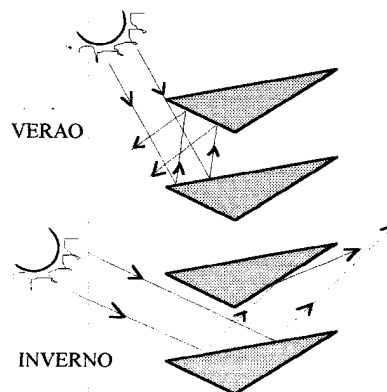


Fig. 26: Veneziana externa de seção triangular.

Não obstante, venezianas apresentam a dupla função de controle do ganho solar e da admissão de luz natural, e para uma avaliação de desempenho efetiva e confiáveis ambos os aspectos precisam ser levados em consideração.

Sistemas de venezianas espelhadas têm também sido empregados, com relativo sucesso, em iluminação zenital, normalmente associados com pátios internos. Um exemplo típico é o sistema utilizado no Chattanooga Office Complex, Tennessee, USA [Matthews & Calthorpe, 1979; Lam, 1986], onde o sistema de deflexão de luz do sol foi concebido em combinação com o de aquecimento solar passivo (Fig. 27).

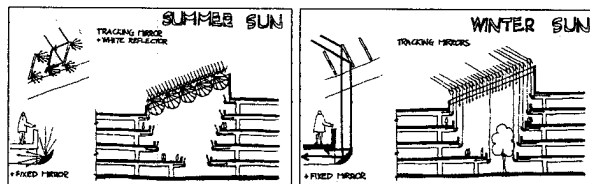


Fig. 27: Sistema de iluminação zenital por reflexão usado em associação com pátio central no Chattanooga Office Complex, Tennessee, USA [Lam, 1986].

Venezianas especulares tem sido utilizadas em estufas para plantas, interceptando a luz solar direta proveniente de baixas altitudes, que de outra forma passariam direto pelo envoltório envidraçado, e redirecionando-a para baixo na direção da plantação [Cave & Cockshull, 1989].

Uma aplicação não muito comum de superfícies espelhadas para incrementar a penetração de luz natural em edificações foi sugerida por Halldane [1985]; ela consiste em painéis espelhados colocados junto ao teto no sentido de captar a luz "fria" refletida pelo piso exterior a edificação e enviá-la para o fundo da peça (ver Fig. 28). Uma vez que esta proposta depende de um piso externo altamente refletivo como fonte de luz primária, não deve ser de muita utilidade em edifícios de múltiplos pavimentos, a não ser que bancadas de luz sejam usadas para proporcionar a iluminação necessária.

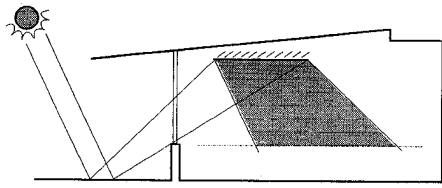


Fig. 28: Painéis refletores pendurados no teto para maior penetração da luz natural.

4. CONCLUSÕES

Vários sistemas de iluminação natural diferentes e imaginativos têm sido propostos para a valorização do ambiente lumínico interno. Cada um deles apresenta seus aspectos positivos e negativos.

Entretanto, antes que qualquer projetista se sinta tentado a substituir um sistema de aberturas convencional por algum destes sistemas inovativos de iluminação natural, deve-se ter razões e justificativas bem claras para tal investimento. Entrementes, uma vez entendido os benefícios da iluminação natural no atendimento das exigências tanto visuais como de economia de energia no ambiente construído, o projetista, no sentido de ser capaz de escolher o sistema de iluminação mais adequado a uma determinada situação, deve considerar as seguintes questões:

- requerimentos visuais especiais (escolas, escritórios, museus, sala de computação, etc.);
- existência de grandes obstruções externas;
- disponibilidade de luz direta do sol de acordo com posicionamentos geográfico e das aberturas;
- ambiente muito profundo para ser iluminado por janelas laterais (intensidade e uniformidade);
- geometria do espaço interno irregular e/ou divisórias internas produzindo áreas sombrias;
- exigências térmicas (controle de ganho solar), sistema de iluminação em substituição também do sistema convencional de sombreamento.

Uma vez que o sistema inovativo de iluminação natural esteja definido, o projetista deve ainda atentar para as seguintes orientações de projeto final do mesmo:

- o sistema deve apresentar uma elevada transmitância à luz natural e relativamente baixa transmitância à radiação solar;
- o sistema deve ser capaz de funcionar para a maioria das posições do sol;
- considerar estratégias de projeto que proporcionem maior uniformidade da distribuição da iluminação interna;
- o teto, atuando como refletor secundário difusor, trata-se de um componente decisivo no projeto;
- para obter economia de energia real no uso de iluminação natural é necessário uma adequada integração com o sistema de iluminação artificial;
- manutenção é um aspecto essencial para a efetividade de sistemas de iluminação por luz solar direta; superfícies expostas ao meio ambiente externo coletam pó e sofrem degradação física.

As considerações e orientações de projeto feitas acima, embora importantes, constituem-se nada mais do que um esboço qualitativo para o projeto de sistemas de iluminação natural.

Modelos de avaliação quantitativa entretanto são necessários para permitir uma verdadeira avaliação do desempenho real de um sistema inovativo de iluminação em termos de eficiência energética (desempenho térmico e lumínico) e custo-benefício.

5. REFERÊNCIAS

- Appelmann, D. & Moore, F.,** (1987). *Daylighting Design Guidelines: Modeling South Facing Mirror Blinds*. In: Proc. ASES Passive Solar Conference, Boulder, USA, pp.203-206.
- Baranov, V. K.,** (1976). *Features of systems for transmission of concentrated solar radiation*. Applied Solar Energy, Vol. 12(5), pp. 12-19.
- Benevolo, L.,** (1978). *The Architecture of the Renaissance*. Routledge & Kegan Paul Ltd., London.
- Bennett, D. J. & Eljaji, D. J.,** (1980). *Solar optics: Anere us light*. Underground Space, Vol. 4, pp.349-354.
- Bowman, M.,** (1985). *Underground daylight*. Building Services (CIBSE), Vol. 7(8), pp. 19-22.
- Cave, C. FL & Cockshuil, K. E.,** (1989). *The effect of using a venetian reflector assembly to improve winter light levels in a single-span glasshouse on the growth of a pot Chrysanthemum crop*. Solar Energy, Vol. 42(4), pp.319-325.
- Chavez, J. R. G.,** (1990). *The potential of beam core daylighting to reduce the energy consumption in buildings*. In: Proc. ISES International Conference on "Evolution of External Perimeter Components in Bioclimatic Architecture", Milan, Italy, pp. 179-182.
- CIBS,** (1984). *CIBS Code for Interior Lighting*. The Chartered Institution of Building Services, London.
- Cowling, I. R. & Veevers, P.,** (1990). *The Design and Performance of a Permanently Mounted Daylighting Device*. Architectural Science Review Vol. 33, pp.97-103.
- Danz, E.,** (1967). *Architecture and the Sun: An International Survey of Sun Projection Methods*. Thames and Hudson Ltd., London.
- Duguay, M. A. & Edgar, PL M.,** (1977). *Lighting with sunlight using sun tracking concentrators*. Applied Optics, Vol. 16(5), pp. 1444-1446.
- Edmonds, I. R.,** (1991). *Optical properties of laser cul lighi deflecting panels and applications t(daylighting*. In: M. Arden, S. Burley, & M. Coleman (Ed.), Proc. Solar World Congress: ISES Biennial Congress, Pergamon Press, Denver, USA, Vol. 3 (part 11), pp.3509-3514.
- Edwards, I.E. S.,** (1961). *The Pyramids of Egypt*. Penguin Books Ltd., Harmondsworth, UK.
- Fontoyont, M. & Paule, B.,** (1988). *Sunlighting techniques developed for the school of Collioure, France*. In: Proc. ASES - Passive Solar Conference, Cambridge, USA.

- Fraas, L. M.; Pyle, W. R. & Ryason, P. R.,** (1983). *Concentrated and piped sunlight for indoors illumination*. Applied Optics Vol. 22(4), pp.578-582.
- Haldane, J. F.,** (1985). *Ceiling Reflectors Panels for Daylight Penetration*. Electric Power Research Institute (EPRI), Report 2285-10.
- Reap, L. J.; Palmer, J. & Hildon, A.,** (1988). *Redistributed daylight - a performance assessment*. In: Proc. National Lighting Conference, Cambridge, UK, pp.243-256.
- Hill, G.; Rowland, D.; Carlson, Y- & Karpack, L.,** (1985). *An empirical study and analysis of daylight penetration through a light plenum*. In: Proc. 2nd Annual Symposium "Improving Building Energy Efficiency in Hot and Humid Climate", Texas, USA, pp.8-15.
- Ropkinson, R. G.; Petherbridge, P. & Longmore, J.,** (1966). *Daylighting*. Heinemann, London.
- Howard, T. C.; Place, W.; Andersson, B. & Coutiers, P.,** (1986). *Variable-Area, Light-Reflecting Assemblies (VALRA)*. In: Proc. 2nd International Daylighting Conference, Long Beach, USA, pp.306-309.
- Kheira, T.,** (1991). *The integration of view, window design and shading devices*. PhD. Thesis, University of Sheffield, School of Architectural Studies.
- Kimura, Y- & Shukutani, Y-,** (1979), *A project for the use of direct sunlight, daylight illumination and energy*. The Japanes Architectural Studies Centre (in Japanese), NO 283, pp.87-94.
- Lam, W. M. C.,** (1986). *Sunlighting as Formgiver for Architecture*. Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- Littlefair, P. J.,** (1990). *Innovative daylighting: Review of systems and evaluation methods*. Lighting, Research & Technology, Vol. 22(1), pp. 1- 17,
- Markus, T. A.,** (1960). *Daylight with Insulation*. Pilkington Brothers Ltd., St. Helens, UK.
- Markus, T. A.,** (1967). *The Function of Windows - A Reappraisal*. Building Science, Vol. 2, pp.97-121.
- Matthews, S. & Calthorpe, P.,** (1979). *Daylight as a Central Determinant of Design*. AIA Journal, September/79, pp.8693.
- Moore, F.,** (1991). *Concepts and Practice of Architectural Daylighting*. (211d ed.). Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- Ng, E. Y. Y.,** (1991). *The Romantic Meaning of Light*. PhD. Thesis, University of Cambridge, Dept. of Architecture.
- Ngai, P. Y.,** (1983). *Solar illumination for interior spaces*. LightinR, Design and Application, April/83, pp.26-33.
- Olgay, V. & Olgay, A.,** (1963). *Solar control and shading devices*. Princeton University Press, Princeton.
- Orioli, S.; Pecorella, G.; Santamaria, A. & Silvestrini, G.,** (1990). *Energy savings in buildings through the use of switchable window glazings*. In: A. A. M. Sayigh (Ed.), Proc. 1st World Renewable Energy Congress: Energy and the Environment into the 1990's, Reading, UK, Vol. 4, pp. 23 5 1 2355.
- Pereira, F. O. PL,** (1992). *Luminous and thermal performance of window shading and sunlighting reflecting devices*. PhD Thesis, School of Architectural Studies, University Of Sheffield.
- Robbins, C. L.,** (1986). *Daylighting: Design and Analysis*. Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- Rodgers, N. C.; Ballinger, J. A. & Dunkerley, C.,** (1979). *An Analysis of Innovative Methods in Natural Lighting*. Architectural Science Review Vol. 22, pp.44-48.
- Rodgers, N. C. & Phillips, K.,** (1981). *Bein Sunlighting as an Energy Conservation Technique*. IES Lighting Review, Vol. 43(1), pp.24-26.
- Rosenfeld, A. H. & Seikowitz, S. E.,** (1977). *Beam Daylighting: an Alternative Illumination technique*. Energy and Buildings, Vol. 1, pp.43-50.
- Ruck, N. C.,** (1985). *Beaming daylight into deep rooms*. CIB Building Research & Practice, May/June, pp. 144-147.
- Ruck, N. C.,** (1986). *Leffing in the daylight*. CIB - Building Research & Practice, July~Aug, pp.294-300.
- Ruck, N. C.,** (1989). *Daylight Performance*. In: Ruck, N-C. (Ed.), Building Design and Human Performance, Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp. 173-2 10.
- Selkowitz, S.; Navvab, M. & Matthews, S.,** (1983). *Design and performance of light shelves*. In: Proc. international Daylighting Conference, Phoenix, USA, pp.267-272.
- Selkowitz, S. E. & Griffith, J. W.,** (1986). *Effective Daylighting in Buildings - Revisited*. Lighting Design + Application, Vol. March, pp.34-47.
- Shukuya, M. & Kimura, IL,** (1986). *Lxperimental evaluation of daylighting with reflective louvers using Direct Sunlight Factor*. In: Proc. International Daylighting Conference, Long Beach, USA, pp.424-427.
- Shukuya, M. & Ohashi, I--,** (1991). *Indoor illumination by a lightshe~f combined with horizontal blind~*. In: Arden, M.; Burley, S. & Coleman, M. (Eds.), Proc. Solar World Congress: ISES Biennial Congress, Pergamon Press, Denver, USA, Vol. 3 (part 1), pp.2721-2726.
- Smart, M. & Ballinger, J. A.,** (1983). *7,acking mirror beam sunlighting for deep interior spaces*. Solar Energy, Vol. 30(6), pp.527-536.
- Sweitzer, G. E.,** (1992). *Fixed-angle prismatic panel daylighting: daylighting distribution in perimeter office and workshop areas*. In: Proc. CIBSE National Lighting Conference, Manchester, UK, pp.275-282.
- Whitehead, L. A.; Brown, D. N. & Nodweil, R. A.,** (1984). *A New Device For Distributing Concentraied Sunlight in Building Interiors*. Energy and Buildings, Vol. 6, pp. 119-125.