

## ILUMINAÇÃO NATURAL NO ESPAÇO URBANO

L. Brotas <sup>1,2</sup> e M. Wilson <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Low Energy Architecture Research Unit, London Metropolitan University 40-44 Holloway Road London N7 8JL United Kingdom tel +44 20 7753 7006 fax +44 20 7753 5780 Emails l.brotas@unl.ac.uk m.Wilson@unl.ac.uk

<sup>2</sup> Departamento das Energias Renováveis, Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial Estrada do Paço do Lumiar 1649-038 Lisboa Portugal

### RESUMO

Em Portugal não existe um regulamento relativo a iluminação natural somente referências em regulamentos de outras áreas mas que condicionam e influenciam o acesso da iluminação aos edifícios.

Os cálculos de iluminação são normalmente baseados em céus encobertos, mas em regiões onde as condições atmosféricas originam predominantemente céu limpo, a componente da luz do sol não pode ser excluída. Embora existam bastantes métodos de cálculo para prever a iluminação natural sob influência de céu limpo, ou necessitam do projecto bastante avançado ou são tendencialmente difíceis de utilizar por arquitectos. Um cálculo simples, que considere a componente da luz do sol é assim da maior importância nas fases iniciais de projecto.

Em geometrias urbanas de ruas os edifícios frontais originam considerável obstrução ao acesso de iluminação, contudo a luz reflectida pelos edifícios frontais e pelo pavimento pode ter um papel importante na iluminação dos edifícios, particularmente em orientações e alturas do dia em que o sol não é incidente na fachada. Acrescem as alturas em que a luz directa incidente nas janelas é parcialmente obstruída pela utilização de sistemas de sombreamento.

Valores reais recolhidos em Lisboa, apresentam uma linearidade entre a iluminância global horizontal,  $E_{gh}$ , e a iluminância total vertical,  $E_{tv}$ , na fachada do edifício, quando esta não está insolada. Esta relação pode ser descrita pela equação  $E_{tv} = k * E_{gh} + C$ , onde  $k$  é um factor dependente da reflectância da obstrução, da geometria da rua e da posição na fachada.  $C$  é maioritariamente a contribuição da luz difusa do céu, sendo mais significativa nos andares mais elevados.

Resultados das simulações efectuadas pelo programa RADIANCE [1] tal como de um cálculo analítico confirmam a existência uma relação linear semelhante, excepto em condições específicas que ocorrem principalmente no verão quando o pavimento está praticamente todo iluminado.

Este artigo apresenta um método simplificado de cálculo dos níveis de iluminação em fachadas para distribuições de céu limpo, tendo em consideração a luz reflectida pelas obstruções e pavimento e a luz difusa do céu.

### ENQUADRAMENTO

Os regulamentos existentes em Portugal aplicáveis aos edifícios e espaços circundantes são documentos legais que visam promover a saúde, conforto e segurança dos habitantes, a qualidade dos edifícios e a utilização racional de energia. Tratam de assuntos como adequada ventilação, redução do ruído, comportamento estrutural, conforto térmico ou a melhoria da eficiência dos sistemas de climatização. Contudo não existe nenhum regulamento relativo à iluminação natural, somente referências em regulamentos de outras áreas, mas que condicionam e influenciam o acesso da iluminação aos edifícios.

Atendendo a que em termos do Balanço Energético Nacional (1998) o consumo de energia dos edifícios representa 21% do consumo final total, dos quais 25% é relativo a iluminação e electrodomésticos, deverá incentivar-se não só o aumento da eficiência das luminárias, como o aproveitamento da iluminação natural como medida de poupança energética [2].

Tem-se vindo a verificar uma tendência ou incentivo à utilização de energia proveniente de fontes renováveis, em detrimento das produzidas por combustíveis fósseis. Justificável por estes serem recursos finitos, que durante o processo libertam grandes quantidades de poluentes para a

atmosfera, causando danos no ambiente à escala global, e por permitir reduzir a dependência da importação de energia. Contudo pouco se tem feito no sentido de efectiva e eficientemente utilizar a iluminação natural, que permite uma redução do consumo eléctrico para iluminação, conseqüente diminuição das cargas internas e eventual utilização ou aumento de potência dos sistemas de refrigeração.

A nível da Europa o aumento dos níveis de conforto e as preocupações com questões de racionamento e eficiência energética, como resultado aquecimento global, tem infelizmente levado a projectos e sistemas construtivos que tem originado uma redução do acesso à iluminação natural em edifícios do sector residencial. Sendo no vãos envidraçados que se verificam grandes perdas de calor tem havido uma tendência, nos regulamentos relativos a edifícios, para reduzir ou limitar a sua dimensão. Adicionalmente a substituição dos vidro simples por duplos ou vidros baixo emissivos originou uma redução na transmissão no espectro do visível na ordem dos 10-25%.

Em oposição a edifícios de serviços, onde se verificam muitos argumentos para os benefícios energéticos de edifícios iluminados naturalmente há pouca investigação dos benefícios em edifícios residenciais. De facto estes podem ser reduzidos, atendendo a que muitos apartamentos estão desocupados durante o dia. Contudo enquanto a maior fonte de luz for oriunda das lâmpadas incandescentes um considerável potencial de poupança é possível se houver uma ocupação permanente. Mas o maior argumento para edifícios residenciais iluminados naturalmente vem da preferência dos ocupantes. Um espaço bem iluminado naturalmente é fruído como mais saudável, dinâmico, e com maior contacto com exterior (clima e hora do dia). Mas é sobretudo a qualidade da luz, dificilmente quantificada pelos ocupantes, que os incentiva a preferir espaços iluminados naturalmente. Estudos efectuados confirmam ainda uma melhoria da produtividade e bem estar dos ocupantes em ambientes iluminados naturalmente. [3]

Os cálculos de iluminação são normalmente baseados em céus encobertos, mas em regiões onde as condições atmosféricas originam predominantemente céu limpo, a componente da luz do sol não pode ser excluída. Num céu encoberto (coberto de nuvens) o sol é invisível apesar da sua posição acima da nuvens afectar a luminosidade do céu, dependendo da turbidade da atmosfera. No céu encoberto standard da CIE<sup>1</sup>, a luminância varia consoante a altitude do ponto considerado em relação ao zenite, sendo independente da posição do sol e para a mesma altitude igual em todo o azimute. A luminância no zénite é três vezes superior à do horizonte. Ver fig. 1. Cálculos utilizando este tipo de distribuição usualmente consideram uma iluminância difusa horizontal de 10 000 lux. A luminância de um céu limpo varia em termos de altitude e azimute. O céu é mais luminoso à volta do sol, progressivamente escurecendo até ao ponto oposto em azimute. A luminância no horizonte tem um valor entre estes dois extremos. Ver fig. 1.

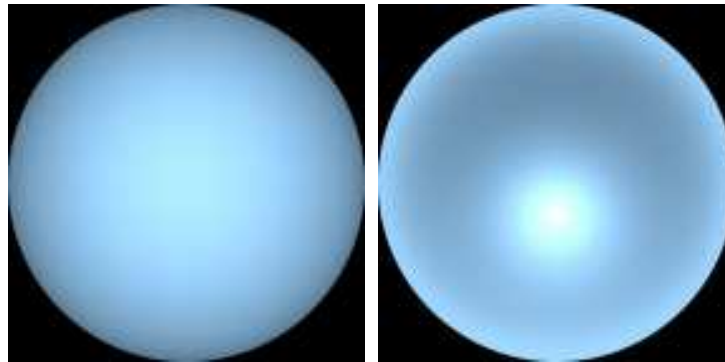


Figura 1: Distribuição de céu encoberto e limpo (em Lisboa no solstício de verão às 12h.) segundo distribuições do CIE geradas pelo programa RADIANCE.

Atendendo à exclusão da componente do sol, num céu encoberto a quantidade de luz que chega um plano é muito inferior à resultante de um céu limpo, fig. 2. Em termos práticos a utilização de um ou outro céu para cálculos de iluminação natural tem implicações não só a nível das características da

<sup>1</sup> Commission Internationale de l'Eclairage, Austria

luz considerada mas também em termos da quantidade de luz que chega ao envidraçado. Num céu limpo a orientação do vão tem um papel preponderante.

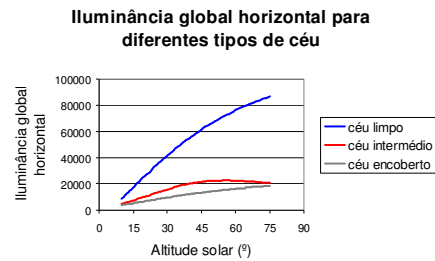


Figura 2: Iluminância produzida num plano horizontal desobstruído devido a diferentes distribuições de céu do programa RADIANCE para a localização Lisboa no solstício de verão.

Em geometrias urbanas de ruas, a luz do sol reflectida pelos edifícios frontais e pavimento pode ter um papel importante na iluminação dos edifícios, particularmente em orientações e alturas do dia em que o sol não é incidente na fachada.

No hemisfério norte um edifício orientado a norte só tem luz directa do sol nas primeiras e últimas horas do dia durante o período de verão. Uma fachada orientada a este é insolada no período da manhã e similarmente uma fachada a oeste terá luz directa no período da tarde.

Os edifícios frontais originam considerável obstrução ao acesso de iluminação por reduzirem a contribuição de luz difusa do céu, e por vezes bloqueando o acesso à luz directa do sol. Contudo a luz reflectida pelas obstruções é uma importante contribuição nas alturas do dia em que o sol está por detrás do edifício. Acresce ainda que as obstruções e pavimento permitem redireccionar a luz para outras superfícies, que a horizontal, promovendo uma melhor uniformidade da luz no interior.

Em áreas densas como as cidades, a orientação e dimensão da geometria da rua pode ser planeada para tirar partido da luz reflectida promovendo uma melhor uniformidade da luz natural durante o dia.

### SIMULAÇÕES DE COMPUTADOR

A geometria apresentada consiste numa rua com eixo longitudinal orientado este-oeste. A rua é relativamente longa, com 55m. Tanto os edifícios orientados a norte como os frontais, considerados obstruções, tem igual altura,  $h=18m$ . O plano térreo horizontal (pavimento) tem a largura,  $w$ , variável dependendo do ratio da rua ( $h:w$ ) considerado. Os resultados apresentados consideram pontos exteriores na fachada norte, a diferentes alturas, num corte transversal no centro da geometria. (fig. 3)



Figura 3: Imagem gerada pelo programa RADIANCE da geometria de rua para um ratio 1:1.

As simulações de iluminação foram efectuadas com o programa RADIANCE [1], considerando diferentes dimensões de rua. Uma rua estreita, com largura igual a metade da altura (1:0.5), de igual dimensões, com largura igual à altura (1:1), e uma rua larga, com largura igual a uma vez e meia a altura (1:1.5). Os resultados foram calculados para intervalos de 4 minutos em tempo solar local. Inicialmente as simulações foram feitas para os solstícios de Inverno e de Verão e um dia de equinócio, considerado uma representação aceitável da distribuição anual da iluminação natural. Adicionalmente os vigésimos primeiros dias de cada mês foram também analisados.

Todos os planos, verticais e térreo, foram considerados reflectores difusos. Os resultados apresentados são para a reflectância 0.2.

Os resultados apresentam uma relação linear entre a iluminância global horizontal,  $E_{gh}$ , e a iluminância total vertical,  $E_{tv}$ , na fachada norte na quando esta não tem luz do sol incidente. A linearidade pode ser expressa pela Equação 1:

$$E_{tv} = k * E_{gh} + C$$

Onde

$E_{tv}$  é a iluminância no plano vertical devido à luz directa do sol, difusa do céu e as inter-reflexões no espaço da rua;

$E_{gh}$  é a iluminância directa e difusa horizontal;

C e k são constantes.

A fig. 4 apresenta a relação linear entre a iluminância global horizontal e a iluminância total vertical numa fachada norte no primeiro, terceiro e quinto piso para os dias de solstício e equinócio. Há uma forte relação entre os valores estimados na recta de regressão e os valores simulados com um coeficiente de determinação,  $R^2$ , superior a 0.89 para todos os pisos.

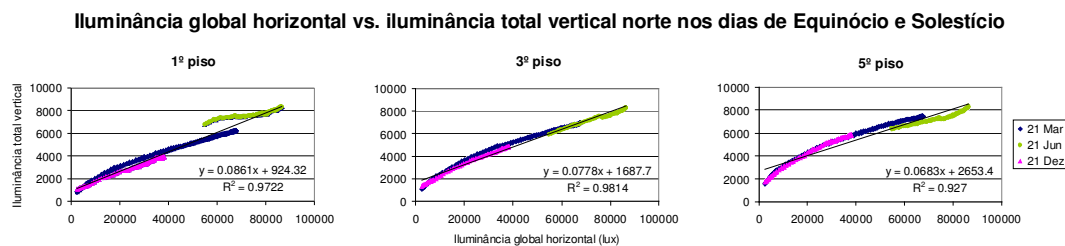


Figura 4 Relação entre a iluminância global horizontal e a iluminância total vertical no primeiro, terceiro e quinto pisos de uma fachada norte de uma rua em Lisboa quando o sol não está incidente na fachada nos dias de equinócio e solstício.

No solstício de Verão quando o sol é incidente na obstrução orientada a sul, a altitude solar é alta. Em particular a quantidade relativa de luz solar incidente no pavimento em oposição à obstrução é elevada quando o azimute solar situa-se a este ou oeste. Isto afecta particularmente os pisos mais baixos, e consequentemente a linearidade nessa altura do ano e orientação solar. No Inverno o sol atinge altitudes muito mais baixas e durante as horas de iluminação natural é exclusivamente incidente na obstrução.

Para uma geometria de rua com um ratio de 1:1, para a latitude 38.73° (Lisboa), a obstrução está sempre totalmente iluminada durante as estações da Primavera e do Verão e não há iluminação directa no pavimento durante o resto do ano. Sob condições de céu descoberto a maioritária contribuição para a iluminância na fachada norte provém da luz solar reflectida pela obstrução.

A fig. 5 apresenta a linearidade entre a iluminância global horizontal e a iluminância total vertical para os vigésimos primeiros dias de cada mês através de uma recta de regressão que pode ser representativa de todo o ano. Apesar de alguns valores desviarem da regressão particularmente nos

pisos térreos, devido à alta altitude solar incidente no pavimento durante o período do verão, eles não pesam significativamente na média anual.

**Iluminância global horizontal vs. iluminância total vertical norte no dia 21 dos meses**

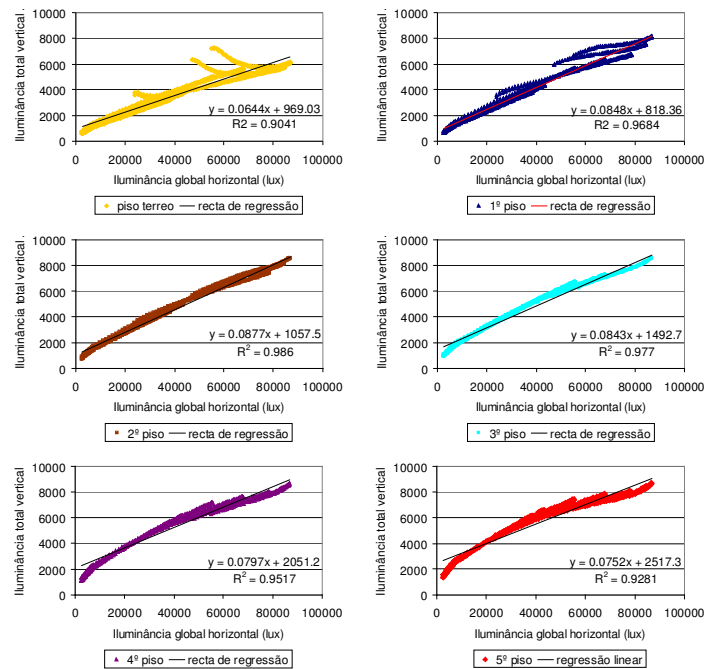


Figura 5: Iluminância global horizontal versus iluminância total vertical a diferentes alturas de uma fachada norte numa rua de 1:1 ratio em Lisboa para o vigésimo primeiro dia de cada mês.

Tabela 1: Coeficiente k e constante C para a eqn. 1 e coeficiente de determinação R<sup>2</sup> para diferentes ratios de rua (estreito, igual e largo) a diferentes alturas numa fachada norte.

Piso	1:0.5			1:1			1:1.5		
	k	C	R <sup>2</sup>	k	C	R <sup>2</sup>	k	C	R <sup>2</sup>
térreo	0.052	-	0.845	0.069	845	0.915	0.068	1404	0.878
1º	0.067	-	0.938	0.089	674	0.979	0.091	1085	0.939
2º	0.072	145	0.970	0.090	958	0.993	0.095	1294	0.967
3º	0.070	721	0.896	0.085	1412	0.985	0.093	1654	0.980
4º	0.066	1473	0.816	0.080	1975	0.961	0.089	1921	0.981
5º	0.062	2395	0.794	0.076	2438	0.939	0.086	2300	0.974

A tbl. 1 apresenta a variação do coeficiente de regressão, k, e da constante, C, na eqn. 1 para o período de um ano para três ratios de rua em diferentes pisos numa fachada norte em Lisboa.

Exceptuando o piso térreo, onde a luz reflectida do pavimento é significativa, aumentando a constante C, e o piso mais alto, onde a contribuição da luz difusa do céu é dominante, o k na eqn.1 é relativamente constante para todos os pisos. A constante C tende a aumentar para os pisos mais altos e para ruas mais largas devido à maior contribuição da luz difusa do céu e à reduzida contribuição da luz reflectida pela obstrução e pavimento.

## CÁLCULO ANALÍTICO

Os resultados seguintes da contribuição do sol para a iluminação que chega a um ponto na fachada foram derivados analiticamente baseados na geometria solar [4] e na transferência de fluxo entre um ponto e uma superfície quando o sol não está incidente na superfície que contém o ponto. [5, 6, 7] A formula usada calcula para superfícies difusas, com uma relativa precisão a primeira reflexão da luz do sol pela obstrução e pavimento e a contribuição das seguintes inter\_reflexões no espaço definido pela rua. Comparações dos resultados com as simulações efectuadas com o programa RADIANCE apresentam um erro inferior a 11% excepto para altitude ângulos inferiores a 10º onde RADIANCE considera a iluminância solar normal constante e a formula aproxima-se da realidade. [8]

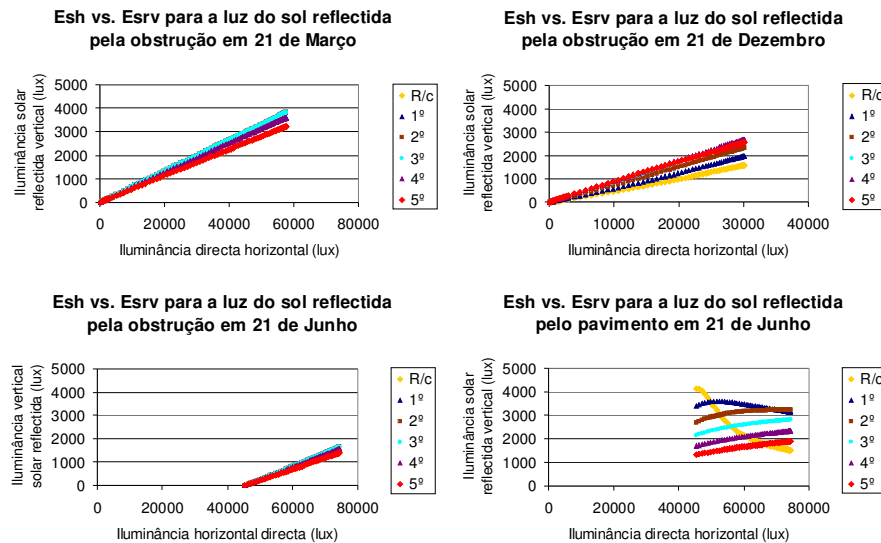


Figura 6: Contribuição da luz solar reflectida pela obstrução e/ou pavimento para a iluminância solar reflectida vertical, Esvr, e a iluminância solar horizontal, Esh, para diferentes alturas numa fachada norte nos dias de equinócio e solstício.

A fig. 6 apresenta a contribuição para a iluminância vertical na fachada norte devido à luz do sol reflectida da obstrução e do pavimento no equinócio da Primavera e solstícios de Inverno e Verão. Apesar de não apresentado na figura, verifica-se uma componente reflectida do pavimento no dia do equinócio que equivale a 10% da luz do sol reflectida pela obstrução.

Durante o verão mais luz solar é reflectida do pavimento que da obstrução. Portanto o piso térreo e numa menor proporção os pisos mais altos recebem mais luz que a prevista pela linha de regressão geral.

A diminuição da iluminância no piso térreo no solstício de Verão com o aumento da altitude solar é devida ao ponto de medição na fachada ser relativamente baixo (1.5m), conseqüentemente quando a área insoleirada no pavimento está mais afastada da fachada o factor de configuração é significativamente menor, logo reduzindo drasticamente a transferência do fluxo.

## MEDIÇÕES REAIS

Foram efectuadas medições exteriores da iluminância total vertical no primeiro e último piso de uma fachada norte em geometrias de rua tal como iluminâncias globais horizontais em Lisboa para períodos de 5 dias em Agosto e Dezembro.

Algumas discrepâncias entre os dados recolhidos e a regressão linear entre a iluminância vertical e horizontal podem ser explicadas devido às superfícies das obstruções não serem difusores perfeitos nem perfeitamente planos, tendo em consideração peitoris e o recuo das janelas. Também devido a diferentes localizações da instrumentação utilizada para as medições horizontais e verticais.

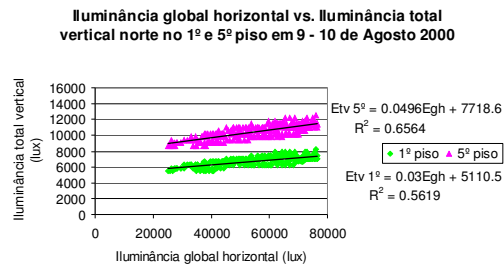


Figura 7: Relação entre a iluminância global horizontal e a iluminância total vertical no primeiro e quinto piso de uma fachada norte numa rua quando o sol não está incidente na fachada nos dias nove e dez de Agosto de 2000.

A fig. 7 apresenta dados reais recolhidos no primeiro e quinto piso de uma fachada (normal orientada 5º positivos do norte) com uma obstrução de igual altura, distante 1.5 vezes a altura.

O gráfico só apresenta resultados das medições na altura do dia em que o sol está por de trás do edifício, por conseguinte a luz do sol é reflectida pela obstrução e pavimento.

Como a obstrução é relativamente distante a contribuição da luz do céu é elevada e pesa significativamente na iluminância total que chega ao pontos de referência na fachada. A componente reflectida pelo pavimento também é elevada nesta altura do ano. As constantes k e C da eqn. 1 são pequenas e altas respectivamente.

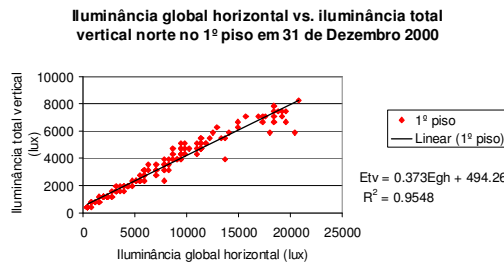


Figura 8: Iluminância global horizontal versus iluminância total vertical norte em trinta e um de Dezembro de 2000 em Lisboa.

A fig. 8 apresenta as medições para a anterior localização no primeiro piso em Dezembro. A recta de regressão tem um coeficiente k mais elevado e a constante C é quase negativa.

Isto pode ser devido às medições terem sido efectuadas num dia de céu parcialmente encoberto. Também durante essa altura do ano não se verifica incidência directa da luz do sol no pavimento.

## CONCLUSÕES

Verifica-se uma relação linear entre a iluminância global horizontal e a iluminância total vertical norte quando a fachada não recebe luz directa do sol.

Os resultados das simulações comprovam que esta linearidade não varia significativamente durante o ano e uma equação geral pode ser representativa do ano com um erro reduzido.

Apesar das medições reais apresentarem diferenças significativas em relação aos resultados simulados a linearidade está presente.

Exceptuando os pisos mais elevados no edifício a constante C pode ser ignorada, resultando uma relação simples entre Etv e Egh análoga ao factor de luz do dia, que relaciona a iluminância interna no plano de trabalho com a iluminância exterior num plano horizontal desobstruído. O valor no plano

de trabalho pode ser calculado com a formula de Sumpners ou uma derivação da formula do factor de luz do dia médio do BRE<sup>2</sup>, ambos baseados numa proporcionalidade directa entre a componente de céu vertical e a nível médio interno horizontal.

Apesar das simplificações e erros, que também existem no calculo do factor da luz do dia, este calculo poderá também permitir uma estimativa inicial de dimensões de janelas e uma caracterização do espaço em termos similares ao critério dos 2 e 5% do factor da luz do dia mas para um clima de céu limpo. Tal como o factor de luz do dia médio pode ser usado para caracterizar a percepção de quão um espaço está bem iluminado esta simples relação permite o desenvolvimento de uma caracterização semelhante para edifícios iluminados pelo sol.

## AGRADECIMENTOS

Luisa Brotas expressa o seu agradecimento aos seus colegas John Solomon e Axel Jacobs na concepção da instrumentação utilizada nas medições e apoio permanente no desenvolvimento do trabalho. Ao INETI - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial e à FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia do MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia pelo apoio para a realização e bolsa de doutoramento.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Larson G. W. and Shakespeares R. (1998). *Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufmann.
- [2] ADENE / INETI (2001). *Forum Energias Renováveis em Portugal - Relatório Síntese. Versão Online* no site do IGM ([http://www.igm.pt/edicoes\\_online/diversos/energias\\_renov/indice.htm](http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/energias_renov/indice.htm)).
- [3] Chartered Institution of Building Services Engineers (1999). *Daylighting and window design Lighting Guide LG 10*, CIBSE, London, UK.
- [4] Szokolay, S. V. (1996). *Solar Geometry*, Plea: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- [5] Tregenza, P. R. (1995). Mean Daylight Illuminance in Rooms Facing Sunlit Streets. *Building and Environment* **30:1**, 83-89.
- [6] Tregenza, P. R. and Sharples S. (1993). Daylight Algorithms. *ETSU S 1350*, School of Architectural Studies, University of Sheffield, U.K.
- [7] Matusiak, B. Aschehoug, Ø. (2002). Algorithms for calculation of daylight factors in streets. *Lighting Research & Technology* **34:2**, 135-147.
- [8] Hopkinson, R. G. et al. (1966). *Daylighting*, Heinemann, London, U.K.

---

<sup>2</sup> Building Research Establishment Ltd. England