



**ABNT – Associação
Brasileira de
Normas Técnicas**

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 28º andar
CEP 20003-900 – Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro – RJ
Tel.: PABX (21)3974-2300
Fax: (21) 2220-1762/2220-6436
Endereço eletrônico:
www.abnt.org.br

Copyright © 2003,
ABNT–Associação Brasileira
de Normas Técnicas
Printed in Brazil/
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

AGO/2003

Projeto 02:135.02-002

Iluminação natural – Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural

Origem: Projeto 02:135.02-002:2003

ABNT/CB-02 – Comitê Brasileiro de Construção Civil

CE-02:135.02 – Comissão de Estudos de Iluminação Natural de Edificações

02:135.02-002 – Daylighting – Part 1: Calculation of daylight availability -
Procedure

Descriptors: Daylighting calculation availability. Procedure

Palavra(s)-chave: Iluminação natural. Cálculo.
Disponibilidade. Procedimento

17 páginas

Sumário

Prefácio

1 Objetivo

2 Referências normativas

3 Definições

4 Determinação dos parâmetros relativos à geometria da insolação

5 Condições do céu: distribuição de luminâncias, céu claro, encoberto e céu parcialmente encoberto ou intermediário

ANEXOS

A - Tabela de valores da relação L_p / L_z para diferentes alturas

B - Referências bibliográficas

Prefácio

A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – é o Fórum Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB) e dos Organismos de Normalização Setorial (ONS), são elaboradas por Comissões de Estudo (ABNT/CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidades, laboratórios e outros).

Os Projetos de Norma Brasileira, elaborados no âmbito dos ABNT/CB e ONS circulam para Consulta Pública entre os associados da ABNT e demais interessados.

Esta Norma faz parte de um conjunto de quatro normas referentes à iluminação natural, a saber: Parte 1 - Conceitos básicos e definições, Parte 3 - Procedimento de cálculo para a determinação da luz natural em ambientes internos e a Parte 4 - Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações. Método de ensaio.

O anexo A é de caráter normativo e o anexo B é de caráter informativo.

Introdução

A luz natural que incide no ambiente construído é composta basicamente pela luz direta do sol e luz difundida na atmosfera (abóbada celeste). O primeiro passo no desenvolvimento do projeto de sistemas de iluminação natural consiste no conhecimento da disponibilidade de luz proporcionada por estas fontes.

A disponibilidade de luz natural é a quantidade de luz em um determinado local, em função de suas características geográficas e climáticas, que se pode dispor por um certo período de tempo. Dados e técnicas para a estimativa das condições de disponibilidade de luz natural são importantes para a avaliação do desempenho final de um projeto em termos de conforto visual e consumo de energia. Isto refere-se à maneira como varia a quantidade de luz durante o dia e

épocas do ano, quanto dura essa iluminação ao longo do dia e os motivos pelos quais as localidades dispõem de mais ou menos luz face aos parâmetros que influem no cálculo da disponibilidade da luz natural, tais como:

- a) os dados relativos à posição do sol;
- b) as épocas da determinação, como o dia e o mês do ano;
- c) latitude e longitude geográficas; e
- d) e tipo do céu.

1 Objetivo

Esta Norma estabelece procedimentos estimativos de cálculo da disponibilidade da luz natural em planos horizontais e verticais externos, para condições de céu claro, encoberto e parcialmente encoberto ou intermediário.

Esta Norma é uma referência básica para desenvolvimento de ferramentas de projeto e trabalhos de pesquisa, uma vez que não é direcionada apenas para projetistas, mas também para qualquer pesquisador interessado na área.

NOTAS:

1 Os valores estimados da disponibilidade de luz natural para uma localidade qualquer, de acordo com os procedimentos apresentados nesta Norma, não devem ser entendidos como valores instantâneos, mas como referenciais para projeto. São dados obtidos por algoritmos universalmente aceitos que, por sua vez, derivam de valores medidos e de modelos estimativos desenvolvidos em diversos países ao longo de várias décadas. Os valores assim determinados apresentam boa confiabilidade, pois levam em conta aspectos da órbita solar relativa a cada latitude, dia e mês do ano, assim como distintas condições atmosféricas.

2 Os algoritmos apresentados nesta Norma podem ser utilizados no desenvolvimento de programas computacionais.

2 Referência normativa

As normas relacionadas a seguir contêm disposições que, ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para esta Norma Brasileira. As edições indicadas estavam em vigor no momento desta publicação. Como toda norma está sujeita a revisão, recomenda-se àqueles que realizam acordos com base nesta que verifiquem a conveniência de se usarem as edições mais recentes das normas citadas a seguir. A ABNT possui a informação das Normas Brasileiras em vigor em um dado momento.

NBR 5461:1991 - Iluminação: Terminologia.

Projeto 02:135.02-001:1998 Iluminação natural - Parte 1: Conceitos básicos e definições

Projeto 02:135.02-004:1998 Iluminação natural - Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações. Método de ensaio.

IES RP-21:1991 – Calculation of Daylight Availability.

3 Definições

Para os efeitos desta Norma aplicam-se as definições da NBR 5641, do projeto 02:135.02-001 e as seguintes:

3.1 condições de céu: É a aparência da abóbada celeste quando vista por um observador situado na superfície terrestre, que está relacionada à distribuição espacial da sua emissão de luz.

NOTAS:

1 Devido à complexidade de distribuição de diferentes condições reais do céu, esta Norma referenciará três tipos de céus, quais sejam: céu claro, céu encoberto e céu parcialmente encoberto ou intermediário, não sendo levada em consideração a condição de céu uniforme, que se caracteriza pela uniformidade da luminância em todos os pontos da abóbada celeste, devido à inexistência dessa situação em condições reais.

2 O termo céu é adotado nesta Norma como sinônimo de abóbada celeste.

3.1.1 céu claro: Condição na qual dada a inexistência de nuvens e baixa nebulosidade, as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que apenas os baixos comprimentos de onda, ou seja a porção azul do espectro emirjam em direção à superfície da terra, conferindo a cor azul, característica do céu.

NOTAS:

1 Nestas condições, o céu apresenta sua porção mais escura a 90° do sol e sua parte mais brilhante ao redor deste, conforme indicado na figura 1. O céu tende a ser mais brilhante nas regiões próximas à linha do horizonte.

2 A luminância de qualquer ponto da abóbada celeste é correlacionada com a luminância do zênite, em função da posição do ponto considerado com relação ao zênite e ao sol, conforme expressão 19 (ver figura 6, item 5.2).

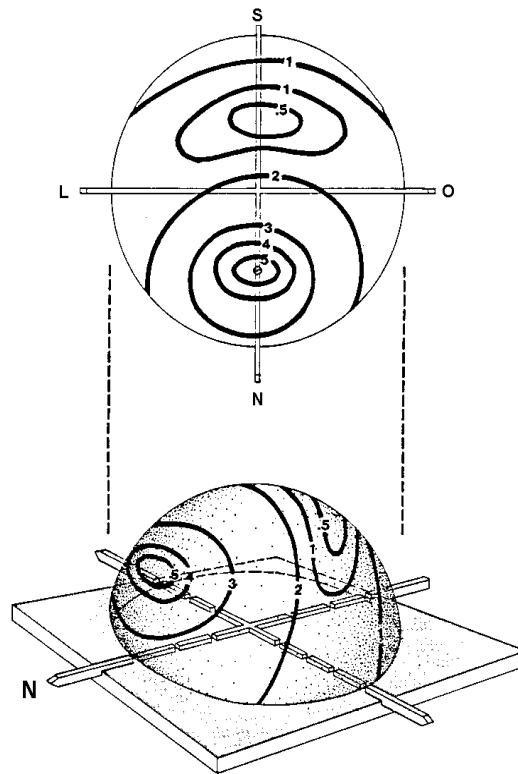


Figura 1- Distribuição de luminâncias para céu claro¹.

3.1.2 céu encoberto: Condição de céu na qual as nuvens preenchem toda a superfície da abóbada celeste.

NOTAS:

1 Este tipo de céu resulta da reflexão/refração da luz direta do sol, para todos os comprimentos de onda, em grandes partículas de água em suspensão na atmosfera. O resultado é uma abóbada cinza-claro, com a porção zenital apresentando uma luminância três vezes maior que a porção próxima à linha do horizonte, conforme mostrado na figura 2.

2 A luminância de um ponto qualquer da abóbada celeste é correlacionada com a luminância do zênite, dada em função da posição do ponto considerado em relação ao zênite, conforme expressão 27 (ver item 5.4.1).

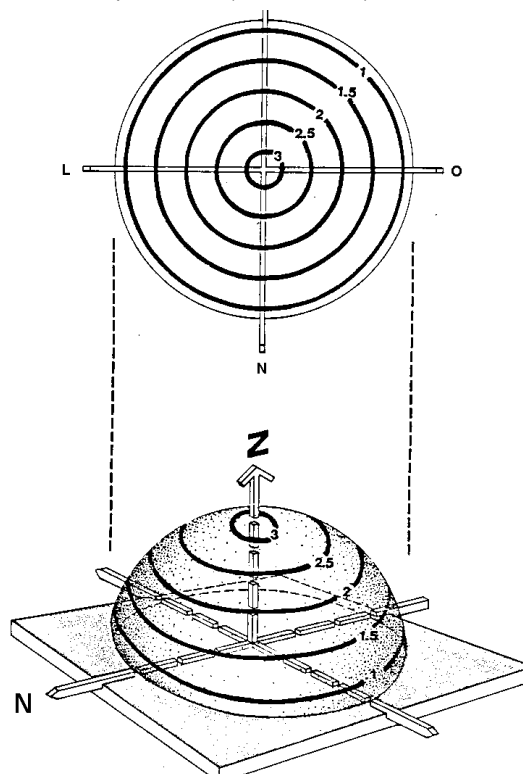


Figura 2 - Distribuição de luminâncias para céu encoberto¹.

¹ Fonte: Moore [1991]

3.1.3 céu parcialmente encoberto ou intermediário: Condição de céu na qual a luminância de um dado elemento será definida para uma dada posição do sol sob uma condição climática intermediária que ocorre entre os céus padronizados como céu claro e totalmente encoberto.

NOTAS:

1 A luminância do ponto depende da altura solar, da mesma maneira que para o céu claro padronizado.

2 O sol e sua auréola ao redor, são excluídos desta distribuição de luminâncias.

3.2 declinação solar (δ_s): É o ângulo entre o raio do sol, do ponto de vista do observador e com vértice neste, e o equador celeste, ou seja, a inclinação do eixo da terra em relação a elíptica da trajetória, compreendida entre os limites : $-23,45^\circ \leq \delta_s \leq +23,45^\circ$

NOTA: Os valores da declinação do sol são positivos quando o sol apresenta-se ao norte do equador celeste e negativos quando o mesmo apresenta-se ao sul, a figura 3 mostra este parâmetro geográfico do sol.

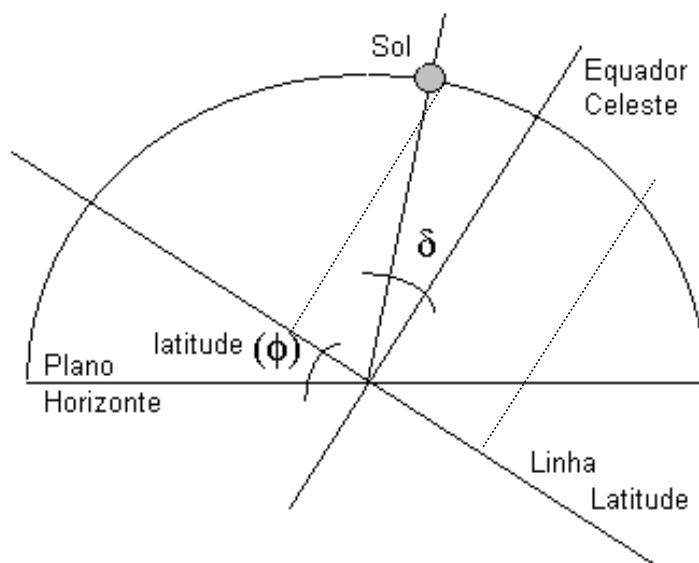


Figura 3 - Desenho esquemático apresentando o ângulo de declinação solar (δ).

3.3 altura solar (γ_s): É o ângulo entre o raio do sol e o horizonte, do ponto de vista do observador. É obtido em função da hora do dia, da época do ano e da latitude e longitude geográfica do local considerado.

NOTA: A variação da altura é de 0° a 90° , sendo que, quando o sol encontra-se no zênite sua altura é igual a 90° .

3.4 azimute solar (α_s): É o ângulo entre o norte geográfico e o plano vertical que passa pelo centro do sol, do ponto de vista do observador e com vértice neste, estando compreendido entre:

$0^\circ \leq \alpha_s \leq 360^\circ$ medido a partir do norte no sentido horário.

NOTA: O azimute solar é função da hora do dia, época do ano e coordenadas geográficas do local considerado.

A figura 4 mostra os parâmetros geográficos conceituados.

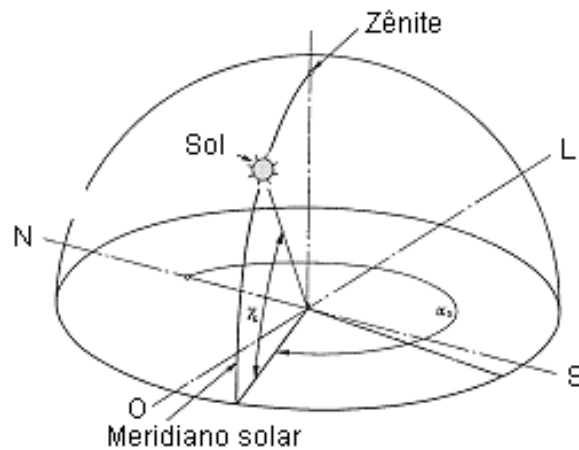


Figura 4 - Altura e azimute solar.

4 Determinação dos parâmetros relativos à geometria da insolação

4.1 Determinação da declinação solar

A declinação solar (δ_s), considerando-a como função exclusivamente da época do ano, é calculada através da seguinte expressão:

$$\delta_s = 23,45^\circ \cdot \text{sen}(29,7^\circ M + 0,98^\circ D - 109^\circ) \quad \dots 1)$$

Onde:

δ_s é a declinação solar, em graus;

M é o número do mês do ano, sendo igual a 1 para janeiro e 12 para dezembro; e

D é o número do dia do mês, variando de 1 a 30 ou de 1 a 31, exceto para o mês de fevereiro.

A tabela 1 indica, para cada mês, os valores numéricos (i) e (M) dos meses, a declinação solar (δ_s), as iluminâncias solares extraterrestres (E_{ext}) e as equações horárias (x_h), para os dias 21 de cada mês.

Tabela 1 - Iluminâncias solares extraterrestres (E_{ext}) e equações horárias (x_h).

Mês	M	Dia	i	δ_s	E_{EXT} [lx]	x_h [h]
Janeiro	1	21	0	-20,041	131.605	-0,185
Fevereiro	2	21	31	-11,376	130.327	-0,228
Março	3	21	59	0,278	128.482	-0,123
Abril	4	21	90	11,859	126.198	0,022
Mai	5	21	120	20,325	124.327	0,058
Junho	6	21	151	23,450	123.266	-0,025
Julho	7	21	181	20,414	123.359	-0,105
Agosto	8	21	212	12,014	124.586	-0,059
Setembro	9	21	243	0,458	126.623	0,112
Outubro	10	21	273	-11,218	128.833	0,258
Novembro	11	21	304	-19,947	130.746	0,239
Dezembro	12	21	334	-23,435	131.741	0,049

4.2 Determinação da altura solar

A altura solar é determinada pela seguinte expressão:

$$\gamma_s = \text{arc sen} [\text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta_s - \text{cos } \phi \cdot \text{cos } \delta_s \cdot \text{cos}(15^\circ \cdot h_s)] \quad \dots 2)$$

Onde:

γ_s é a altura solar, em graus;

ϕ é a latitude do local, em graus (negativo caso localizado ao sul do equador); e

h_s é a hora solar verdadeira, dada pela expressão:

$$h_s = h + \frac{(\lambda_p - \lambda)}{15} + x_h - c \quad \dots 3)$$

h é a hora local marcada no relógio;

λ é a longitude do local, em graus, (positivo caso localizado a oeste de Greenwich);

λ_p é a longitude do meridiano padrão do local, em graus e múltiplo de 15;

x_h é a expressão horária, dada por:

$$x_h = 0,170.\text{sen}[1,93 (J) - 154,4] - 0,129.\text{sen}[1,01 (J) - 8,08] \quad \dots 4)$$

Esta expressão horária é o termo de correção entre a hora solar e a hora do relógio, causada devido às flutuações da duração do dia solar e a órbita elíptica da terra compreendida entre os limites :

- 14 min 17 s $\leq x_h \leq$ + 16 min 25 s (ver tabela 1).

c é a correção do horário de verão, quando em vigor (igual a 1 para o verão e 0 para o inverno);

J é o dia Juliano, dado por $J = i + D$, onde i é o valor numérico mensal, fornecido pela Tabela 1 e D é o dia do mês.

4.3 Determinação do azimute solar

O azimute do sol é determinado através das seguintes expressões:

$$\alpha_s = \arccos \left[\frac{(\cos \varphi \text{ sen } \delta_s + \text{sen } \varphi \cos \delta_s \cos 15 h_s)}{\cos \gamma_s} \right] \quad \text{para } h_s \leq 12\text{h}00\text{min} \quad \dots 5)$$

$$\alpha_s^{12\text{h}00\text{min} - 24\text{h}00\text{min}} = 360^\circ - \alpha_s \quad \text{para } h_s > 12\text{h}00\text{min} \quad \dots 6)$$

5 Condições do céu: distribuição de luminâncias, céu claro, céu encoberto e céu parcialmente encoberto ou intermediário

5.1 Caracterização das condições do céu:

Para a caracterização das condições do céu, é utilizado o método da cobertura do céu preconizado pela NOAA (EUA), sendo que a cobertura é estimada visualmente pela observação do montante de cobertura de nuvens. Esta cobertura de nuvens é estimada em percentual e expressa numa escala de 0 a 100%.

Assim sendo apresenta-se as seguintes condições de céus:

- céu claro: 0% a 35%

- céu parcial: 35% a 75%

- céu encoberto: 75% a 100%

5.2 Distribuição de luminâncias

A abóbada celeste é considerada como um hemisfério de raio infinito e unitário, tendo no centro o ponto de estudo considerado.

A iluminância devida a esta abóbada, pode ser determinada a partir da distribuição de luminâncias do céu. Ao integrar-se a contribuição de luz proveniente de cada porção da abóbada por todo o hemisfério, através da sua luminância, tem-se a iluminância total no plano horizontal.

Para se determinar a distribuição de luminâncias do céu, a abóbada celeste deve ser subdividida em zonas, assumindo-se um valor de luminância único para cada zona.

A figura 5 apresenta uma subdivisão com 220 zonas com variações angulares de altura e azimute múltiplas de 10° ; esta é a subdivisão empregada no método gráfico apresentado no projeto 02:135.02-004. Observa-se que quanto maior a subdivisão maior a precisão atingida.

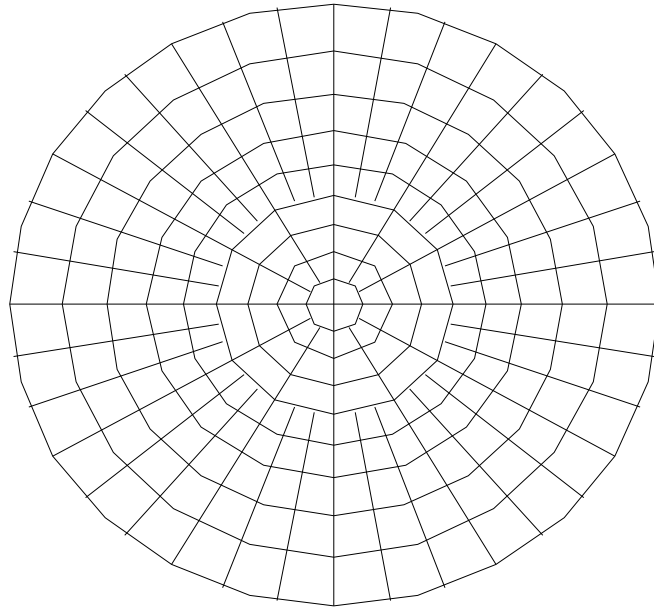


Figura 5 - Subdivisão da abóbada celeste em 220 zonas (projeção estereográfica).

Para a adequada compreensão das expressões da luminância do céu, precisa-se conhecer os ângulos de posição do sol (vide 3.2, 3.3 e 3.4) e de posição do ponto P (centro da zona), definidos pelos ângulos de altura da zona (γ_p) e diferença azimutal ($\alpha_s - \alpha_p$) entre o sol e o ponto P, conforme mostrado na figura 6.

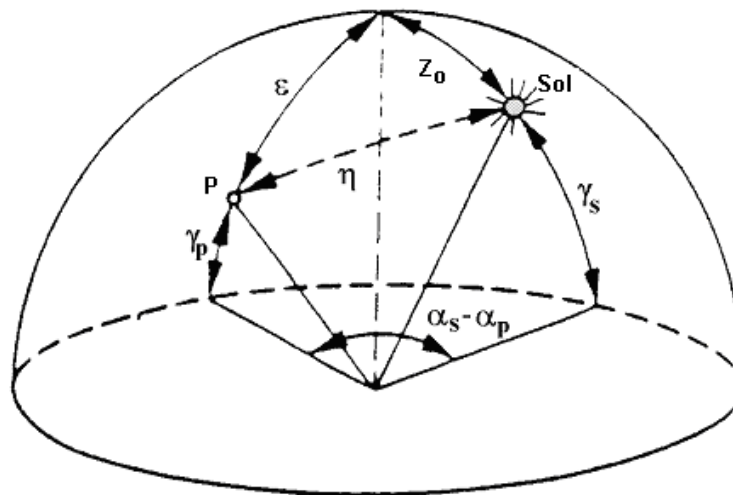


Figura 6 - Coordenadas do sol e de um ponto P (centro de uma zona) genérico no céu

$$E = \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{\gamma=0}^{\frac{\pi}{2}} L(\alpha, \gamma) \cdot \cos \gamma \cdot \cos \beta \cdot d\gamma \cdot d\alpha \quad \dots 7)$$

Onde:

$L(\alpha, \gamma)$ é a distribuição de luminâncias, em função do azimute α e da altura γ da zona do céu P;
 β é o ângulo entre as normais da zona do céu e da superfície iluminada (de incidência), em graus.

Resolvendo a integral dupla, vem:

$$E = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot L(\alpha_i, \gamma_i) \cdot \cos \gamma_i \cdot \cos \beta_i \quad \dots 8)$$

Onde:

n é o número de subdivisões da abóbada celeste;
 ω_i é o ângulo sólido através do qual é vista a zona i , esterradiano [sr].

5.3 Céu claro

A iluminação oriunda de céu claro é considerada como a soma das parcelas de iluminação devido à luz direta do sol e devido à irradiação do céu, chamada também de parcela difusa da luz natural.

5.3.1 Determinação da iluminância devido ao sol em um plano horizontal

É obtida através da seguinte expressão:

$$E_{sh} = E_s * \text{sen } \gamma_s \quad \dots 9)$$

Onde:

E_{sh} é a iluminância em um plano horizontal, em lux;

E_s é a iluminância devido ao sol, perpendicular ao plano de incidência, em lux, dada por:

$$E_s = E_{ext} * \exp(-c.m.T) \quad \dots 10)$$

E_{ext} é a iluminância solar extraterrestre, devido à órbita da terra, é dada em função da época do ano, em lux;

$$E_{ext} = E_{ext. \text{ média}} \{ 1 + 0,034 \cdot \cos[0,986 (J) - 1,973] \} \quad \dots 11)$$

$E_{ext. \text{ média}}$ é a constante de iluminação solar, tomada à meia distância entre a terra e o sol, em quilolux [klx], igual a 127.500 lux;

c é o coeficiente de extinção ou dissipação atmosférica, dado por:

$$c = 0,1 / (1 + 0,0045 m) \quad \dots 12)$$

m é massa de ar óptica, que simplificada para locais próximos ao nível do mar e alturas solares superiores a 10° , pode ser determinada por:

$$m = 1 / (\text{sen } \gamma_s) \quad \dots 13)$$

T é o fator de turvamento, coeficiente, adimensional, atmosférico através do qual a iluminação é atenuada.

O fator de turvamento é variável de acordo com as condições de poluição atmosférica do local, podendo ser considerado conforme indicado na tabela 2.

Tabela 2: Fatores de turvamento¹.

Região	Fator de turvamento T
ar perfeitamente limpo e seco	1,0
ar seco em áreas montanhosas	1,5
áreas rurais	2,5
áreas urbanas	3,0 a 5,5
áreas industriais	> 5,5

5.3.2 Determinação da iluminância devido ao sol em um plano vertical

A iluminância em um plano vertical pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$E_{sv} = E_s * \cos \beta \quad \dots 14)$$

Onde:

E_{sv} é a iluminância devido ao sol em um plano vertical, em quilolux [klx];

E_s é a iluminância devido ao sol, perpendicular ao plano de incidência, em quilolux [klx];

β é o ângulo de incidência, distância angular entre a normal à elevação e o raio do sol, dado por:

$$\beta = \text{arc cos} [\cos \gamma_s * \cos \alpha_z] \quad \dots 15)$$

α_z é o ângulo azimutal entre o sol e a normal à elevação;

$$\alpha_z = \alpha_s - \alpha_e;$$

α_e é o azimute da elevação (fachada).

Relacionando a iluminância devido ao sol em um plano vertical, com a iluminância devido ao sol em um plano horizontal, vem:

$$E_{sv} = E_{sh} \cdot \text{cotg } \gamma_s * \cos (\alpha_s - \alpha_e) \quad \dots 16)$$

¹ Fonte: Tregenza [1993]

ou se:

$$\cotg \gamma_s * \cos (\alpha_s - \alpha_e) = k \quad \dots 17)$$

Onde:

k é o coeficiente de relação entre a iluminância no plano vertical e horizontal, devido ao sol, em função da altura do sol (γ_s), e da diferença azimutal (α_z) entre o sol e a elevação (ver tabela 3).

$$\text{Esv} = \text{Esh} * k \quad \dots 18)$$

Tabela 3 - Fator k de relação entre iluminâncias no plano vertical e horizontal, devido ao sol, para a condição de céu claro.

Altura solar	azimute do sol - azimute da elevação									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
10°	5,67	5,59	5,33	4,91	4,34	3,65	2,84	1,94	0,98	0,00
15°	3,73	3,68	3,51	3,23	2,86	2,40	1,87	1,28	0,65	0,00
20°	2,75	2,71	2,58	2,38	2,10	1,77	1,37	0,94	0,48	0,00
25°	2,14	2,11	2,02	1,86	1,64	1,38	1,07	0,73	0,37	0,00
30°	1,73	1,71	1,63	1,50	1,33	1,11	0,87	0,59	0,30	0,00
35°	1,43	1,41	1,34	1,24	1,09	0,92	0,71	0,49	0,25	0,00
40°	1,19	1,17	1,12	1,03	0,91	0,77	0,60	0,41	0,21	0,00
45°	1,00	0,98	0,94	0,87	0,77	0,64	0,50	0,34	0,17	0,00
50°	0,84	0,83	0,79	0,73	0,64	0,54	0,42	0,29	0,15	0,00
55°	0,70	0,69	0,66	0,61	0,54	0,45	0,35	0,24	0,12	0,00
60°	0,58	0,57	0,54	0,50	0,44	0,37	0,29	0,20	0,10	0,00
65°	0,47	0,46	0,44	0,40	0,36	0,30	0,23	0,16	0,08	0,00
70°	0,36	0,36	0,34	0,32	0,28	0,23	0,18	0,12	0,06	0,00
75°	0,27	0,26	0,25	0,23	0,21	0,17	0,13	0,09	0,05	0,00
80°	0,18	0,17	0,17	0,15	0,14	0,11	0,09	0,06	0,03	0,00
85°	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	0,00
90°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

5.3.3 Determinação da iluminância devido ao céu (abóbada celeste) num plano horizontal

Esta relação citada, está mostrada pela expressão:

$$\frac{L_p}{L_z} = \frac{f(\eta) \cdot f(\varepsilon)}{0,27385 \cdot f(Z_0)} \quad \dots 19)$$

Onde:

L_z é a luminância do zênite, para a condição de céu claro, em quilocandela por metro quadrado [kcd/m^2], ou:

$$L_z = 0,3 + 3,0 * \tan \gamma_s \quad \dots 20)$$

$f(\eta)$ - função entre a posição do ponto P e o sol, dada por:

$$f(\eta) = 0,91 + 10 * \exp(-3 \cdot \eta) + 0,45 * \cos^2 \eta \quad \dots 21)$$

$f(\varepsilon)$ - função da distância angular entre o ponto P e o zênite ($\varepsilon = 90^\circ - \gamma_p$):

$$f(\varepsilon) = 1 - \exp(-0,32 \cdot \sec \varepsilon) \quad \dots 22)$$

$f(Z_0)$ - função da distância angular entre o sol e o zênite ($z_0 = 90^\circ - \gamma_s$):

$$f(Z_0) = 0,91 + 10 * \exp(-3 \cdot z_0) + 0,45 * \cos^2 z_0 \quad \dots 23)$$

Valores da relação L_p/L_z para diferentes alturas, obtidos pela equação 19, encontram-se no anexo A, tabelas de A.1 a A.6.

A luminância da abóbada celeste é função não somente da distribuição espacial com relação ao zênite e a posição do sol, como também da luminância absoluta do zênite.

Nesta Norma, a luminância absoluta do zênite pode ser obtida através da razão da iluminância horizontal produzida pela abóbada celeste E_{ch} e a luminância do zênite L_z , apresentada na tabela 4 em função da altura solar.

A E_{ch} é calculada através das expressões 24 e 25.

Tabela 4- Relação entre iluminância horizontal e luminância do zênite, aplicável a céu claro e parcialmente encoberto¹.

Altura solar (γ_s)	E_{ch}/L_z	Altura solar (γ_s)	E_{ch}/L_z
0°	2,212	50°	1,362
5°	2,272	55°	1,185
10°	2,299	60°	1,015
15°	2,293	65°	0,858
20°	2,242	70°	0,715
25°	2,155	75°	0,589
30°	2,036	80°	0,479
35°	1,887	85°	0,386
40°	1,721	90°	0,308
45°	1,543		

Desta forma, a distribuição de luminâncias para o céu claro pode ser determinada pela equação 19 e pelos valores da relação entre a iluminância horizontal e a luminância do zênite, obtida através da tabela 4.

Embora a maneira correta e completa de se determinar a iluminância devido ao céu seja a apresentada na expressão 19, a iluminância devido à abóbada celeste também pode ser estimada de maneira bem simplificada segundo as expressões:

$$E_{ch} = 0,8 + 15,5 * \sqrt{\text{sen}\gamma_s} \quad \text{para } T = 3,00 \quad (\text{condição de céu limpo}) \quad \dots 24)$$

$$E_{ch} = (0,9 + 6,5 * \tan\gamma_s) \quad \text{para } T = 5,50 \quad (\text{condição de céu turvo}) \quad \dots 25)$$

Onde:

E_{ch} é a iluminância devido ao céu, em um plano horizontal, em quilolux [klx];

γ_s é a altura do sol, em graus.

5.3.4 Determinação da iluminância devido ao céu em um plano vertical

É dada pela seguinte expressão e tabela 5:

$$E_{cv} = E_{ch} * V \quad \dots 26)$$

Onde:

E_{cv} é a iluminância devido ao céu, em um plano vertical, em quilolux [klx];

V é o fator iluminação vertical de meio céu, obtido em função da altura solar (γ_s) e a diferença azimutal entre o sol e a elevação ($|\alpha_s - \alpha_e|$), ver tabela 5.

Tabela 5 – Valores para V

γ_s	azimute do sol - azimute da elevação												
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
0°	1,76	1,71	1,58	1,38	1,14	0,89	0,68	0,55	0,49	0,47	0,46	0,46	0,46
15°	1,70	1,66	1,53	1,32	1,08	0,82	0,60	0,47	0,40	0,37	0,36	0,36	0,36
30°	1,35	1,32	1,22	1,06	0,88	0,68	0,52	0,41	0,35	0,32	0,31	0,30	0,30
45°	1,01	0,99	0,92	0,82	0,70	0,57	0,46	0,38	0,33	0,30	0,28	0,28	0,27
60°	0,74	0,73	0,69	0,63	0,56	0,49	0,42	0,37	0,33	0,30	0,29	0,28	0,28
75°	0,53	0,53	0,51	0,49	0,46	0,43	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32	0,31	0,31
90°	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38

¹ Fonte: IES - RP21[1991]

5.4 Céu encoberto

A iluminação oriunda de céu encoberto é determinada a partir da distribuição de luminâncias do céu.

5.4.1 Determinação da distribuição de luminâncias

A expressão abaixo representa a razão entre a luminância de um ponto P da abóbada celeste e a luminância do zênite, sendo função apenas da distância angular entre o ponto P e o horizonte (γ_p)

$$\frac{L_p}{L_z} = \frac{(1 + 2 \cdot \text{sen} \gamma_p)}{3} \quad \dots(27)$$

Onde:

L_z é a luminância do zênite, para céu encoberto, em quilocandela por metro quadrado [kcd/m^2], sendo dado pela expressão:

$$L_z = 0,123 + 8,6 \cdot \text{sen} \gamma_s \quad \dots(28)$$

γ_p é a altura do ponto P, em graus.

A luminância do zênite para céu encoberto também pode, alternativamente, ser estimada a partir da razão:

$$L_z = \frac{E_{ceh}}{0,778} \quad \dots(29)$$

Tabela 6 - Razão L_p/L_z para condição de céu encoberto

γ_p	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°
L_p/L_z	0,391	0,506	0,615	0,716	0,805	0,879	0,937	0,977	0,997

5.4.2 Determinação da iluminância em um plano horizontal

A iluminância em um plano horizontal, para a condição de céu encoberto, pode ser obtida integrando-se a distribuição de luminâncias conforme 5.2 (ver expressão 7), ou simplificada pode ser determinada pelas seguintes expressões:

$$E_{ceh} = 0,3 + 21 \cdot \text{sen} \gamma_s \quad \dots(30)$$

Onde:

E_{ceh} é a iluminância absoluta em um plano horizontal, em quilolux [klx], para céu encoberto;

γ_s é a altura do sol, em graus.

5.4.3 Iluminância em um plano vertical

A iluminância em um plano vertical (E_{cev}) é dada pela seguinte expressão:

$$E_{cev} = 0,396 \cdot E_{ceh} \quad \dots(31)$$

5.5 Céu intermediário ou parcialmente encoberto:

A iluminação oriunda de céu intermediário ou parcialmente encoberto é determinada a partir da distribuição de luminâncias para este tipo de céu.

NOTA: A distribuição de luminâncias para este tipo de céu, ainda a ser padronizada internacionalmente, só é válida, de acordo com a expressão a seguir para alturas solares de até 80°.

5.5.1 Determinação da distribuição de luminâncias:

A expressão abaixo representa a razão entre a luminância de um ponto P da abóbada celeste e a luminância do zênite, sendo função da distância angular do ponto P ao horizonte (γ_p), da altura solar (γ_s) e da distância angular entre o ponto P e o zênite (ϵ).

$$\frac{L_p(\gamma_s, \gamma_p, \epsilon)}{L_z(\gamma_s)} = \frac{L(\gamma_s, \gamma_p, \epsilon)}{L(\gamma_s, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} - \gamma_s)} \quad \dots(32)$$

Onde:

$L_p(\gamma_s, \gamma_p, \epsilon)$ é a luminância de um elemento do céu intermediário, em quilolux [klx];

$L_z(\gamma_s)$ é a luminância do zênite para o céu intermediário, em quilolux [klx];

$$L(\gamma_s, \gamma_P, \varepsilon) = a(\gamma_s, \gamma_P) * \exp[b.(\gamma_s, \gamma_P).\varepsilon]$$

$$a(\gamma_s, \gamma_P) = 0,43.(\gamma_P + 4,799 + 1,35.[\text{sen}(3,59\gamma_P - 0,009) + 2,31].\text{sen}(2,60\gamma_s + 0,316))$$

$$b(\gamma_s, \gamma_P) = -0,563.[(\gamma_P + 1,059).(\gamma_s - 0,008) + 0,812]$$

$$L(\gamma_s, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} - \gamma_s) = \{0,988.[\text{sen}(2,60\gamma_s + 0,316) + 2,772]\} * \exp[-1,481.(\gamma_s + 0,301).(1,571 - \gamma_s)]$$

Sendo a Luminância do zênite dada por:

$$L_z(\gamma_s) = 0,47.\{4,47.[(\text{tg}\gamma_s) * \exp(1,13)] + 0,14\} + 0,66.\{15,0.[(\text{sen}\gamma_s) * \exp(1,68)] + 0,07\} \quad \dots 33)$$

em quilocandela por metro quadrado [kcd/m²]

NOTA : Embora, como também nos outros tipos de céus, a maneira correta da determinação das iluminâncias para o céu intermediário seja a integração da distribuição de luminâncias do céu, as iluminâncias também podem ser determinadas de maneira simplificada conforme as expressões 34, 35, 36, 37 e 38.

5.5.2 Determinação da iluminância devido ao sol em um plano normal

A iluminância devido ao sol em um plano normal de incidência pode ser determinada através da seguinte expressão simplificada:

$$E_{\text{din}} = E_{\text{ext}} * \exp(-0,80.m) \quad \dots 34)$$

Onde:

E_{din} é a Iluminância do céu intermediário devido ao sol, em um plano normal, em quilolux [klx];

E_{ext} é a Iluminância solar extraterrestre, dada pela equação 11. em quilolux [klx];

m é um adimensional que representa a massa ótica de ar, dada pela expressão (13).

5.5.3 Determinação da iluminância devido ao sol em um plano horizontal

É dada através da seguinte expressão:

$$E_{\text{dih}} = E_{\text{din}} * \text{sen}\gamma_s \quad \dots 35)$$

Onde:

E_{dih} é a iluminância do céu intermediário devido ao sol, em um plano horizontal, em quilolux [klx];

E_{din} é a iluminância devido ao sol, em um plano normal, em quilolux [klx];

γ_s é a altura solar, em graus.

5.5.4 Determinação da iluminância devido ao sol em um plano vertical

É dada pela expressão:

$$E_{\text{div}} = E_{\text{din}} * \cos\beta \quad \dots 36)$$

Onde:

E_{div} é a iluminância do céu intermediário devido ao sol, em um plano vertical, em quilolux [klx];

E_{din} é a iluminância devido ao sol, em um plano normal, em quilolux [klx];

β é o ângulo de incidência, conforme expressão 15, em graus.

5.5.5 Determinação da iluminância devido ao céu em um plano horizontal

Dada pela expressão:

$$E_{\text{cih}} = 0,30 + 45,0.\text{sen}\gamma_s \quad \dots 37)$$

Onde:

E_{cih} é a iluminância do céu intermediário, devido ao céu, em um plano horizontal, em quilolux [klx];

γ_s é a altura solar, em graus.

5.5.6 Determinação da iluminância devido ao céu em um plano vertical

Do mesmo modo que no caso de céu claro, é dado pela relação:

$$E_{civ} = E_{cjh} * V \quad \dots 38)$$

Onde:

E_{civ} é a iluminância do céu intermediário, devido ao céu, em um plano vertical, em quilolux [klx];

E_{cjh} é a Iluminância do céu intermediário, devido ao céu, em um plano horizontal, em quilolux [klx];

V é o fator dado pela Tabela 5.

/ANEXO A

Anexo A (normativo)
Valores da relação L_p / L_z para condição de céu claro e diferentes alturas solares

As tabelas de A.1 a A.6 referem-se às alturas solares de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°, respectivamente.

Tabela A.1 - Razão L_p/L_z , altura solar de 15°

$\gamma_s = 15^\circ$	ε								
$ \alpha_s - \alpha_p $	85°	75°	65°	55°	45°	35°	25°	15°	5°
5°	30,09	29,33	16,47	8,64	4,86	2,96	1,95	1,40	1,09
15°	22,17	18,77	12,39	7,38	4,44	2,81	1,90	1,38	1,09
25°	15,19	12,24	8,65	5,76	3,79	2,55	1,80	1,35	1,09
35°	10,47	8,25	6,06	4,36	3,11	2,25	1,67	1,31	1,08
45°	7,45	5,80	4,36	3,31	2,53	1,95	1,54	1,25	1,07
55°	5,55	4,27	3,26	2,57	2,07	1,69	1,41	1,20	1,05
65°	4,35	3,32	2,55	2,07	1,73	1,48	1,29	1,14	1,04
75°	3,60	2,72	2,10	1,73	1,48	1,31	1,18	1,09	1,02
85°	3,16	2,36	1,82	1,50	1,31	1,18	1,10	1,04	1,01
95°	2,92	2,16	1,65	1,36	1,19	1,09	1,03	1,00	1,00
105°	2,82	2,07	1,56	1,28	1,12	1,02	0,98	0,97	0,98
115°	2,82	2,05	1,53	1,24	1,08	0,98	0,94	0,94	0,97
125°	2,89	2,08	1,54	1,23	1,05	0,96	0,91	0,91	0,96
135°	2,99	2,14	1,57	1,24	1,05	0,94	0,89	0,90	0,95
145°	3,11	2,21	1,61	1,26	1,05	0,93	0,88	0,88	0,94
155°	3,22	2,28	1,65	1,28	1,06	0,93	0,87	0,87	0,94
165°	3,31	2,33	1,68	1,30	1,07	0,93	0,87	0,87	0,93
175°	3,35	2,36	1,69	1,31	1,07	0,93	0,87	0,86	0,93

Tabela A.2 - Razão L_p/L_z altura solar de 30°

$\gamma_s = 30^\circ$	ε								
$ \alpha_s - \alpha_p $	85°	75°	65°	55°	45°	35°	25°	15°	5°
5	11,68	13,05	14,85	12,04	6,75	3,91	2,41	1,60	1,15
15	10,18	10,58	10,45	8,66	5,75	3,60	2,31	1,57	1,14
25	8,13	7,82	7,16	6,04	4,50	3,12	2,14	1,51	1,13
35	6,27	5,68	4,99	4,28	3,44	2,61	1,93	1,44	1,12
45	4,83	4,19	3,59	3,11	2,63	2,15	1,71	1,36	1,10
55	3,80	3,18	2,68	2,34	2,05	1,78	1,51	1,27	1,08
65	3,10	2,52	2,09	1,83	1,64	1,48	1,33	1,19	1,06
75	2,63	2,09	1,70	1,49	1,36	1,26	1,18	1,11	1,03
85	2,34	1,81	1,45	1,26	1,16	1,10	1,06	1,03	1,01
95	2,17	1,64	1,29	1,11	1,02	0,97	0,96	0,97	0,99
105	2,08	1,55	1,20	1,02	0,92	0,89	0,89	0,92	0,97
115	2,06	1,51	1,15	0,96	0,86	0,82	0,83	0,87	0,95
125	2,09	1,50	1,13	0,92	0,82	0,78	0,79	0,84	0,93
135	2,14	1,52	1,13	0,91	0,80	0,75	0,75	0,81	0,92
145	2,20	1,55	1,13	0,91	0,78	0,73	0,73	0,79	0,91
155	2,26	1,59	1,15	0,91	0,78	0,72	0,71	0,77	0,90
165	2,31	1,61	1,16	0,91	0,77	0,71	0,70	0,76	0,89
175	2,33	1,63	1,17	0,91	0,77	0,71	0,70	0,76	0,89

Tabela A.3 - Razão L_p/L_z altura solar de 45°

$\gamma_s = 45^\circ$	ϵ								
$ \alpha_s - \alpha_p $	85°	75°	65°	55°	45°	35°	25°	15°	5°
5°	4,20	4,47	5,09	6,36	7,61	4,86	2,88	1,79	1,19
15°	3,93	4,08	4,47	5,17	5,45	4,16	2,70	1,75	1,19
25°	3,49	3,49	3,62	3,91	3,95	3,33	2,41	1,67	1,17
35°	3,00	2,87	2,83	2,92	2,91	2,62	2,09	1,56	1,15
45°	2,55	2,33	2,21	2,21	2,19	2,06	1,78	1,44	1,13
55°	2,17	1,91	1,75	1,70	1,69	1,65	1,52	1,32	1,10
65°	1,87	1,59	1,41	1,35	1,34	1,34	1,30	1,20	1,07
75°	1,66	1,36	1,18	1,11	1,10	1,11	1,12	1,10	1,04
85°	1,51	1,21	1,01	0,94	0,92	0,94	0,98	1,01	1,01
95°	1,41	1,10	0,90	0,82	0,80	0,82	0,87	0,93	0,98
105°	1,35	1,03	0,83	0,74	0,71	0,73	0,78	0,86	0,95
115°	1,33	0,99	0,78	0,68	0,65	0,66	0,72	0,81	0,93
125°	1,33	0,97	0,75	0,64	0,60	0,61	0,67	0,76	0,91
135°	1,34	0,97	0,73	0,62	0,57	0,58	0,63	0,73	0,89
145°	1,36	0,97	0,73	0,60	0,55	0,55	0,60	0,70	0,88
155°	1,38	0,98	0,72	0,59	0,54	0,53	0,58	0,68	0,87
165°	1,40	0,98	0,72	0,59	0,53	0,52	0,57	0,67	0,86
175°	1,41	0,99	0,72	0,59	0,53	0,52	0,56	0,66	0,85

Tabela A.4 - Razão L_p/L_z altura solar de 60°

$\gamma_s = 60^\circ$	ϵ								
$ \alpha_s - \alpha_p $	85°	75°	65°	55°	45°	35°	25°	15°	5°
5°	1,49	1,48	1,58	1,90	2,51	3,49	3,24	1,96	1,23
15°	1,45	1,42	1,50	1,78	2,27	2,92	2,81	1,89	1,22
25°	1,37	1,32	1,37	1,58	1,93	2,34	2,33	1,76	1,21
35°	1,28	1,20	1,21	1,35	1,60	1,87	1,93	1,61	1,18
45°	1,17	1,07	1,05	1,14	1,31	1,50	1,60	1,45	1,15
55°	1,07	0,96	0,91	0,96	1,07	1,23	1,34	1,30	1,12
65°	0,99	0,85	0,79	0,81	0,89	1,01	1,13	1,17	1,08
75°	0,92	0,77	0,69	0,70	0,75	0,85	0,97	1,05	1,04
85°	0,86	0,71	0,62	0,61	0,65	0,73	0,84	0,95	1,01
95°	0,82	0,66	0,56	0,54	0,57	0,64	0,74	0,87	0,97
105°	0,79	0,62	0,52	0,49	0,51	0,57	0,66	0,80	0,94
115°	0,77	0,59	0,49	0,45	0,46	0,51	0,60	0,74	0,91
125°	0,76	0,58	0,47	0,42	0,43	0,47	0,56	0,69	0,89
135°	0,76	0,57	0,45	0,40	0,40	0,44	0,52	0,66	0,87
145°	0,76	0,56	0,44	0,39	0,38	0,42	0,49	0,63	0,85
155°	0,76	0,56	0,43	0,38	0,37	0,40	0,48	0,61	0,84
165°	0,76	0,55	0,43	0,37	0,36	0,39	0,46	0,60	0,83
175°	0,77	0,55	0,43	0,37	0,36	0,39	0,46	0,59	0,82

Tabela A.5 - Razão L_p/L_z altura solar de 75°

$\gamma_s = 75^\circ$	ε								
$ \alpha_s - \alpha_p $	85°	75°	65°	55°	45°	35°	25°	15°	5°
5°	0,55	0,50	0,49	0,55	0,69	0,94	1,36	1,97	1,26
15°	0,54	0,49	0,48	0,54	0,68	0,91	1,30	1,74	1,25
25°	0,53	0,48	0,47	0,52	0,64	0,86	1,19	1,54	1,23
35°	0,52	0,46	0,45	0,49	0,60	0,79	1,08	1,36	1,19
45°	0,51	0,45	0,43	0,46	0,56	0,72	0,96	1,22	1,15
55°	0,49	0,43	0,40	0,43	0,51	0,65	0,86	1,09	1,11
65°	0,47	0,41	0,38	0,40	0,46	0,58	0,77	0,98	1,07
75°	0,46	0,39	0,35	0,37	0,42	0,53	0,69	0,89	1,03
85°	0,45	0,37	0,33	0,34	0,39	0,48	0,62	0,82	0,99
95°	0,43	0,36	0,32	0,32	0,36	0,44	0,57	0,75	0,95
105°	0,43	0,34	0,30	0,30	0,33	0,40	0,52	0,70	0,92
115°	0,42	0,33	0,29	0,28	0,31	0,38	0,48	0,66	0,89
125°	0,41	0,32	0,28	0,27	0,29	0,35	0,45	0,62	0,86
135°	0,41	0,32	0,27	0,26	0,28	0,33	0,43	0,59	0,84
145°	0,40	0,31	0,26	0,25	0,27	0,32	0,41	0,57	0,83
155°	0,40	0,31	0,26	0,25	0,26	0,31	0,40	0,55	0,81
165°	0,40	0,31	0,26	0,24	0,26	0,30	0,39	0,54	0,81
175°	0,40	0,31	0,25	0,24	0,26	0,30	0,39	0,54	0,80

Tabela A.6 - Razão L_p/L_z altura solar de 90°

$\gamma_s = 90^\circ$	ε								
$ \alpha_s - \alpha_p $	85°	75°	65°	55°	45°	35°	25°	15°	5°
5°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
15°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
25°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
35°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
45°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
55°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
65°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
75°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
85°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
95°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
105°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
115°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
125°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
135°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
145°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
155°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
165°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79
175°	0,22	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,34	0,51	0,79

Anexo B (informativo)
Referências bibliográficas

B.1 Para a elaboração deste texto, foram analisadas e utilizadas as informações, algoritmos e propostas das seguintes fontes de referência:

CIE 110 - 1994. Spatial Distribution of Daylight - Luminance Distribution of Various References Skies, Vienna, Austria.

CIE S 003.3/E - 1996. Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky, Vienna, Austria.

DIN 5034 - Part 2 - 1985. Daylight in Interiors: Principles – Berlin, Germany.

IES RP-21 – 1991. Calculation of Daylight Availability – New York, USA.

KITTLER, R. - 1981. A Universal Calculation Method for Simple Predetermination of Natural Radiation on Building Surfaces and Solar Collectors – Building & Environment, Vol. 16, N^o 3, pp. 177-182, UK

KROCHMANN, J. - 1974. Quantitative data on daylight for illuminating engineering – CIBSE Lighting, Research & Technology, Vol. 6, N^o 3, pp. 165-171.

MOORE, F. – 1985. Concepts and Practice of Architectural Daylighting – New York, USA: Van Nostrand Reinhold.

TREGENZA, P. - 1993. Daylighting Algorithms, ETSU S 1350, Dept. of Trade
