

CANDEEIROS SOLARES – REVISÃO TECNOLÓGICA E ESTUDO DE CASO

JOÃO PEDRO CORREIA GOMES DA MOTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor José Manuel Marques Amorim de
Araújo Faria

AGOSTO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

Devemos o progresso aos insatisfeitos.

Huxley, Aldous

AGRADECIMENTOS

A todos os que possibilitaram a concretização de mais uma etapa importante da minha vida, deixo uma palavra de apreço:

Ao meu orientador, Professor José Amorim Faria pelo empenho e apoio prestado ao longo da realização da dissertação, através de conselhos, motivação e conhecimento transmitido.

Ao Eng. José Malheiros e Sr. Júlio, da empresa Fabor, pela total disponibilidade e cooperação no caso de estudo, especificamente na recolha de dados e opiniões.

Ao Sr. José Amorim, da empresa SOPSEC que me ajudou a efetuar as medições no ensaio para o caso de estudo.

À Polirigido, em especial ao Sr. Vítor que se mostrou sempre pronto para o fornecimento de dados e informação relativa aos produtos Solatube.

Aos meus colegas, Hugo Xavier por ter realizado comigo um trabalho sobre tubos solares que serviu de arranque a esta dissertação, e ao Nuno Soares pela paciência, ajuda e indicação de documentos que me permitiram entender os conceitos básicos de luminotecnia.

O apoio incondicional da minha família, em especial à minha mãe, ao meu pai e minha irmã, e pela educação que me proporcionaram e por permitirem todo o sucesso ao longo da minha formação.

Aos meus amigos da Faculdade, pelo apoio e companheirismo ao longo do meu percurso académico, destacando o José Carneiro e o Luís Teixeira.

Concluo com o agradecimento à Mónica Silva por estar presente em todos os momentos, com compreensão e dedicação, incentivando-me a fazer mais e melhor.

RESUMO

O presente documento incide sobre um sistema construtivo, o candeeiro solar, que transmite ao interior a luz natural disponível. Este sistema de iluminação é extremamente apelativo pelo seu desempenho na quantidade e qualidade de luz que projeta para um compartimento, independentemente da sua distância à fachada do edifício. Assim, este sistema inovador representa uma boa alternativa a outros dispositivos de iluminação natural e sistemas de iluminação elétrica.

Os candeeiros solares são constituídos essencialmente por 3 componentes, uma cúpula que capta a luz solar, um tubo refletor que conduz a luz e um difusor que a transmite ao ambiente interior. Quanto às exigências aplicáveis, este sistema tem como principal função a transmissão da luz para as superfícies de trabalho e áreas circundantes. A par disso, deve promover o conforto térmico interior, e deve apresentar propriedades que garantam a sua durabilidade e um rendimento o mais constante possível ao longo do seu período de vida.

Nesse contexto, ao nível dos trabalhos de pesquisa, neste trabalho faz-se nos dois capítulos iniciais após a introdução um estudo de síntese geral sobre sistemas inovadores de iluminação natural, devidamente integrado nos conceitos de carácter geral associados a luminotecnia e a iluminação artificial (capítulo 2) seguido de uma caracterização tecnológica completa de princípios de funcionamento, soluções de mercado e métodos de cálculo de candeeiros solares (capítulo 3).

Com o objetivo de validar e ilustrar a pesquisa efetuada, procedeu-se ao projeto e avaliação técnico-económica de uma solução de reabilitação de uma unidade industrial ao nível da iluminação, ou seja na definição de uma solução de candeeiros solares de mercado a juntar à solução de iluminação artificial e natural existentes com vista à melhoria do seu desempenho (capítulos 4 a 6).

PALAVRAS-CHAVE: ILUMINAÇÃO NATURAL, CANDEEIROS SOLARES, QUALIDADE DA LUZ, ILUMINÂNCIA, PROJETO DE ILUMINAÇÃO.

ABSTRACT

This document concerns an innovative construction system, the tubular light guide (light pipes) system, which transmits natural light indoors. This lighting system is very appealing due to its performance in terms of quality and quantity of light projected for a place, regardless of its proximity to the facade. Thus, this innovative system represents a good alternative to other natural lighting and electric lighting systems.

These light pipes have three essential components: a dome that captures sunlight, a reflector tube that conducts the light and a diffuser that transmits it to the indoor environment. The light transmission for work surfaces and surrounding areas is the main function of this system. Moreover it must have properties that don't influence negatively too much the thermal comfort and that maintain a consistent performance over its lifetime.

In this context, in the level of specific actions of research developed regarding this dissertation, the two initial chapters, after the introduction, concern a general study on innovative daylighting systems, fully integrated in the general concepts associated to artificial lighting and lighting technique (Chapter 2), followed by a broad technological characterization of operating principles, market solutions and methods of designing light pipes systems (Chapter 3).

In order to make an illustration of the research presented in those two chapters, the design, the technical detailing and an economic evaluation of a case study was prepared and is presented on Chapters 4-6. This case study refers to the rehabilitation, in terms of lighting solutions and systems, of an industrial unit. In other words, it has been designed a market solution of light pipes to be added to the existing solution of lighting to improve its performance.

KEYWORDS: DAYLIGHT, TUBULAR LIGHT GUIDE SYSTEM, THE LIGHT QUALITY, ILLUMINANCE, ILLUMINATION PROJECT.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS DE ESTUDO	2
1.3 BASES BIBLIOGRÁFICAS	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 SISTEMAS INOVADORES EM ILUMINAÇÃO NATURAL.....	5
2.1 ILUMINAÇÃO NATURAL	5
2.2 COMPONENTES DE UM PROJETO DE ILUMINAÇÃO.....	9
2.2.1 ASPETOS FUNCIONAIS	10
2.2.2 AMENIDADE VISUAL E AMBIENTE INTERIOR TÉRMICO.....	10
2.2.3 INTEGRAÇÃO ARQUITETÓNICA	10
2.2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	11
2.3 CONCEITOS DE LUMINOTECNIA	13
2.3.1 GRANDEZAS LUMINOTÉCNICAS	13
2.3.2 MODELOS DE CÉU	16
2.4 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO.....	18
2.5 SISTEMAS AVANÇADOS E INOVADORES DE ILUMINAÇÃO NATURAL	19
2.5.1 MATERIAIS ENVIDRAÇADOS AVANÇADOS (MEA)	19
2.5.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL INOVADORES.....	20
3 CANDEEIROS SOLARES	23
3.1 ENQUADRAMENTO.....	23
3.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	24
3.2.1 RELAÇÃO COM OUTRAS FORMAS DE ILUMINAÇÃO	26
3.3 SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO PORTUGUÊS	28

3.3.1	EMPRESAS FABRICANTES E FORNECEDORES DE TUBOS SOLARES EM PORTUGAL.....	28
3.4	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	40
3.5	DETERMINAÇÃO DA ILUMINÂNCIA FORNECIDA PELO SISTEMA	42
3.5.1	MÉTODO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS CANDEEIROS SOLARES (FLUXO LUMINOSO EMITIDO).....	43
3.5.2	MÉTODO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS CANDEEIROS SOLARES (ILUMINÂNCIA INTERIOR).	44
3.6	EXIGÊNCIAS E ESPECIFICAÇÕES RELEVANTES.....	45
3.6.1	ILUMINAÇÃO.....	45
3.6.2	SEGURANÇA ESTRUTURAL	46
3.6.3	SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	46
3.6.4	ESTANQUIDADE AO AR E À ÁGUA	46
3.6.5	DURABILIDADE E MANUTENÇÃO	47
3.7	NORMAS E REGULAMENTOS APLICÁVEIS.....	47
3.7.1	NORMAS E REGULAMENTOS MAIS RELEVANTES	47
3.7.2	NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA RECOMENDADOS.....	48
3.8	PATOLOGIAS ASSOCIADAS E MANUTENÇÃO.....	50
4	CASO DE ESTUDO - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	51
4.1	INTRODUÇÃO.....	51
4.2	A EMPRESA.....	51
4.3	NECESSIDADES DE ILUMINAÇÃO	54
4.4	SITUAÇÃO ATUAL.....	54
5	CASO DE ESTUDO - PROJETO DE MELHORIA DA ILUMINAÇÃO COM CANDEEIROS SOLARES.....	59
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	59
5.2	PREVISÃO DA ILUMINÂNCIA MÉDIA	60
5.3	PROJETO COM CANDEEIROS SOLARES.....	61
5.3.1	DEFINIÇÃO DO MODELO DO SISTEMA CONSTRUTIVO A UTILIZAR	61
5.3.2	CÁLCULO DO DESEMPENHO DO SISTEMA CONSTRUTIVO.....	62
5.3.3	DISPOSIÇÃO DOS CANDEEIROS SOLARES	73
5.3.4	ABORDAGEM MODULAR	74
5.4	ORÇAMENTOS	75
5.5	EXECUÇÃO DE TRABALHOS.....	76

5.6	MEDIDAS ADICIONAIS DE MELHORIA DA ILUMINAÇÃO	77
6	ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÓMICA	79
6.1	ESTUDO TÉCNICO-ECONÓMICO.....	79
6.1.1	LIFE CYCLE COST	79
6.1.2	CUSTO DA SOLUÇÃO ATUAL	80
6.1.3	CUSTO DA SOLUÇÃO INOVADORA	81
6.1.4	QUANTIFICAÇÃO DOS VALORES DE POUPANÇA	83
7	CONCLUSÃO	87
7.1	PRINCIPAIS RESULTADOS.....	87
7.1.1	ESTADO DE ARTE	87
7.1.2	APLICAÇÃO AO CASO REAL	89
7.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	ANEXO A.....	A.1
	ANEXO B.....	B.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1– Espectro de visão, radiação visível [1]	5
Fig. 2 – Torre das Antas, elevada percentagem de área envidraçada	7
Fig. 3 – Edifício Porto Antas, edifício recortado	7
Fig. 4 – a) Edifício da FMUP, b) Edifício Paços de São João	7
Fig. 5 – a) Claraboias no departamento de biologia da FCUP, b) Hall de entrada com candeeiros solares [5]	8
Fig. 6 – Ribeira do Porto, Claraboias em edifícios antigos	8
Fig. 7 - Projeto de Iluminação	9
Fig. 8 – Zonagem, combinação da iluminação natural e artificial (adaptado de [7])	12
Fig. 9 – Lei de Lambert [9]	14
Fig. 10 – Reflexão especular [9].....	15
Fig. 11 – Reflexão composta [9].....	15
Fig. 12 – Reflexão difusa [9].....	16
Fig. 13 – Reflexão mista [9].....	16
Fig. 14 – Céu uniforme [7].....	16
Fig. 15 – Céu encoberto [7].....	16
Fig. 16 – Céu limpo [7]	17
Fig. 17 – Céu limpo com Sol [7]	17
Fig. 18– Panteão, Roma, Itália [12].....	18
Fig. 19 – Helióstato [14]	20
Fig. 20 – Painéis prismáticos [3]	21
Fig. 21 – Estores refletoras [7]	21
Fig. 22 – a) Sala sem palas refletoras [13], b) Funcionamento das palas [15], c) Sala com palas refletoras [13].....	22
Fig. 23 – Candeeiro Solar [16]	22
Fig. 24 – Sistema estático de captação de luz [25].....	25
Fig. 25 – Reflexões dentro do tubo [17]	25
Fig. 26 – Tipo de projeção de acordo com o comprimento do tubo, para um diâmetro fixo [17]	26
Fig. 27 – Entrada de luz para envidraçados verticais (adaptado de [10])	26
Fig. 28 – Penetração da luz solar em envidraçados verticais solares (adaptado de [10])	27
Fig. 29 – Níveis de iluminação de uma sala em profundidade, com e sem iluminação zenital (adaptado de [7])	28
Fig. 30 – Transmissão de luz através de um túnel de luz da VELUX (adaptado de [5])	33

Fig. 31 – Desenho de um tubo solar [27]	34
Fig. 32 – Corte vertical de um tubo solar [27].....	34
Fig. 33 – Cúpula acrílica [26]	34
Fig. 34 – Pormenor de ligação da cúpula ao tubo [27].....	34
Fig. 35 – Detalhe da base de cobertura [27]	35
Fig. 36 - Ligação do difusor com o teto [27]	35
Fig. 37 – Difusor Vusion [29]	36
Fig. 38 – Difusor OptiView [29]	36
Fig. 39 – Aeroporto de Barajas, Madrid com candeeiros solares [26]	36
Fig. 40 – Golas [29]	37
Fig. 41 – Golas de extensão [29].....	37
Fig. 42 – Regulador de entrada de luz natural [29]	37
Fig. 43 – Kit de ventilação [29]	37
Fig. 44 – Kit de luz elétrica com leds [29].....	37
Fig. 45 – Kit de luz elétrica com lâmpada [29].....	37
Fig. 46 – Desempenho do Solatube 750 DS [28]	39
Fig. 47 – Hipermercado com candeeiros solares	41
Fig. 48 – Cobertura de uma cave em jardim, Porto [26]	42
Fig. 49 – Avaliação da iluminância de um candeeiro solar	43
Fig. 50 – Fachada das Instalações da Fabor	51
Fig. 51 – Cobertura com luminárias e claraboias	52
Fig. 52 – Planta da cobertura da nave Recil	52
Fig. 53 – Corte da nave Recil	53
Fig. 54 – Planta da cobertura da nave Fabor 1	53
Fig. 55 – Planta da cobertura da nave da Fabor 2	54
Fig. 56 – Luxímetro [38].....	55
Fig. 57 – Medições de iluminância na área de fabricação para zonas de iluminação geral.....	56
Fig. 58 – Iluminância mínima prevista com o novo sistema de iluminação geral	60
Fig. 59 – Rendimento da Cúpula 750 DS (adaptado de [32])	63
Fig. 60 – Rendimento do tubo, segundo a equação (3.9)	63
Fig. 61 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 1	66
Fig. 62 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 2	67
Fig. 63 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 3	69

Fig. 64 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 4	71
Fig. 65 – Distribuição dos candeeiros solares pelas naves da fábrica	73
Fig. 66 – Disposição dos candeeiros solares em corte.....	74
Fig. 67 – Fases da colocação do novo sistema de iluminação.....	75
Fig. 68 – Colocação dos tubos na nave Recil (adaptado de [27])	77
Fig. 69 – a) Sem reflexão; b) com reflexão da luz	78
Fig. 70 – Life Cycle Cost para a situação atual.....	81
Fig. 71 – Life Cycle Cost para solução nova.....	83
Fig. 72 – Custos de exploração entre a solução nova e a solução atual	84
Fig. 73 – Gráfico de comparação entre os sistemas de iluminação em estudo	84
Fig. 74 – Custo de investimento e valores de poupança a médio prazo	85
Fig. 75 – Life Cycle Cost para apenas 2 naves da fábrica	86
Fig. 76 – Custos de investimento e valores de poupança a médio prazo	86
Fig. 77 – Carta solar para a cidade do Porto (41,1 N) [40]	2
Fig. 78 – Transferidor para a determinação de ângulos de incidência solar sobre superfícies horizontais [40]	3
Fig. 79 – Gráfico da iluminância externa recomendada para cálculo de acordo com o CIE [41]	4
Fig. 80 – Gráfico da iluminância externa para a Bélgica de latitude 50° [7]	5
Fig. 81 – Método fator de utilização para iluminação artificial com rendimento de 45% [39]	2
Fig. 82 – Níveis de iluminância recomendados para iluminação interior de acordo com CIE [35].....	3

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Tabela de fatores de reflexão (adaptado de [10])	15
Quadro 2 – Componentes dos tubos solares de acordo com o catálogo da empresa Chatron (adaptado de [25])	29
Quadro 3 – Sistemas de iluminação contínua (adaptado de [25])	30
Quadro 4 – Área de cobertura de luz de modelos de tubos solares (adaptado de [25])	31
Quadro 5 – Fluxo luminoso segundo diferentes fontes de luz (adaptado de [25])	31
Quadro 6 – Características dos tubos solares da empresa VELUX (adaptado de [5])	32
Quadro 7 – Acessórios de tubos solares da empresa VELUX (adaptado de [5])	33
Quadro 8 – Modelos Solatube (adaptado de [27])	38
Quadro 9 – Eficiência visível e conforto térmico (adaptado de [28])	38
Quadro 10 – Níveis médios de iluminância (adaptado de [34])	48
Quadro 11 – Níveis de iluminância recomendados pelo CIE (adaptado de [35])	49
Quadro 12 – Níveis de Iluminância médios (valores gerais) (adaptado de [34])	49
Quadro 13 – Modelo de candeeiros solares a aplicar nas coberturas da fábrica.....	61
Quadro 14 – Inclinação do Sol em função do horário diurno e da altura do ano (adaptado de [38]) ...	62
Quadro 15 – Determinação do fator de utilização para cada zona de estudo.....	64
Quadro 16 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 1)	66
Quadro 17 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 2)	68
Quadro 18 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 3)	70
Quadro 19 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 4)	71
Quadro 20 – Quantidade de candeeiros solares em cada área de estudo	73
Quadro 21 – Orçamento com sistemas Solatube	76
Quadro 22 – Custo de substituição anual (iluminação elétrica).....	80
Quadro 23 – Custo de utilização anual (iluminação elétrica).....	80
Quadro 24 – Custo de exploração anual (iluminação elétrica)	81
Quadro 25 – Rendimento de cada fase de colocação	82
Quadro 26 – Custo de cada fase de colocação dos candeeiros solares.....	82

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

TLGS – *Tubular light guide systems* (candeeiro solar)

SIN – Sistemas de iluminação natural

SSPS – Sistemas de seguimento da posição do sol

EOH – Elementos óticos holográficos

CIE – Comissão Internacional de Iluminação

Luminotecnia

F (ou ϕ) – fluxo luminoso (lm)

ϕ_r – fluxo luminoso recebido

E ou E_m – iluminância média (lux)

I – intensidade luminosa (cd)

L – luminância (cd/m²)

ρ – fator de reflexão

UGR – Unified Glare Rating (índice de desconforto ao ofuscamento)

R_c – índice de restituição da cor

V_t – transmissão de luz (%)

U – coeficiente de transmissão térmica (W/(m².°C))

Modelos de avaliação de desempenho

TTE – eficiência de transmissão do tubo (%)

Z – ângulo zenital pelo qual entra a luz do dia

R – reflexão da superfície interior do tubo (%)

T_c – transmitância da cúpula (%)

T_o – transmitância do difusor (%)

MF – fator de manutenção (%)

E_g – eficiência geral de um candeeiro solar (%)

E_h – iluminância exterior (lux)

Fe -fluxo total exterior captado (lm)

Fi – fluxo transmitido para o interior (lm)

η_{TLGS} – rendimento global do candeeiro solar (%)

$\eta_{cúpula}$ – rendimento de transmissão da cúpula (%)

η_{tubo} – rendimento de reflexão do tubo (%)

η_{difusor} – rendimento de transmissão do difusor (%)
 $\eta_{\text{b,cúpula}}$ – rendimento da cúpula para luz direta (%)
 $\eta_{\text{d,cúpula}}$ – rendimento da cúpula para luz difusa (%)
 $E_{\text{b,out}}$ – iluminância no exterior consequente de luz direta (lux)
 $E_{\text{d,out}}$ – iluminância no exterior consequente da luz difusa (lux)
 $E_{\text{g,out}}$ – iluminância total exterior (lux)
 ρ – fator de reflexão (%)
 y_s – inclinação do Sol (°)
 L – comprimento do tubo refletor (m)
 D – diâmetro do tubo refletor (m)
 D_{eff} – diâmetro efetivo (m)
 τ_{difusor} – coeficiente de transmissão do difusor (%)
 N – número de tubos
 UF – fator de utilização
 A_{TLGS} – área de superfície de captação do candeeiro solar (m²)
 A_{wp} – área da do local a iluminar (m²)
 K – coeficiente de forma do local a iluminar
 E_{wp} – iluminância média na superfície de trabalho (lux)

Modelo de viabilidade económica

LCC – Life Cycle Cost
 C_g – custo global (€)
 C_{exp} – custo exploração (€)
 C_i – custo inicial (€)
 C_m – custo de manutenção (€)
 C_s – custo de substituição (€)
 C_u – utilização (€)
 C_e – custo da energia (€/kWh)
 $C_{e,i}$ – custo da energia atual (€/kWh)
 Q – consumo (W)
 α_1 – taxa de capitalização (%)
 α_2 – taxa de variação de custo (%)
 n – número de anos

1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A iluminação é fundamental para o conforto visual no interior dos edifícios e para o seu adequado funcionamento. Deste modo, o projeto de iluminação deve ser olhado com especial atenção, pois é importante garantir níveis adequados de iluminação e ao mesmo tempo a sua sustentabilidade económica.

Atualmente encontram-se vários edifícios onde o projeto de iluminação é desadequado. A desvalorização da iluminação natural leva a custos elevados em consumo de luz elétrica, e por outro lado, a sobrevalorização desta (em países quentes como Portugal), leva a custos desproporcionados em sistemas de climatização.

O aumento do custo da energia elétrica gerado pela crise financeira instalada, potenciada pela fraca estabilidade dos mercados e constantes aumentos do custo dos combustíveis, levou a uma procura de novas soluções em vários campos, incluindo na iluminação, que permitam redução dos custos associados aos edifícios, analisados numa perspetiva de custo global (incluindo os custos de exploração, limpeza, manutenção e substituição intermédia).

A par desta preocupação económica, destacam-se também políticas ambientais que promovem a poupança energética através do uso de iluminação natural, com o objetivo de reduzir emissões de gases com efeito de estufa.

Os candeeiros solares são um sistema de iluminação natural inovador que pretende responder a estas preocupações energéticas e ambientais, sem colocar em causa a qualidade da iluminação no interior dos edifícios. Este sistema construtivo apresenta um elevado desempenho na projeção da luz solar para o ambiente interior, sem realizar qualquer tipo de poluição, e apresenta ainda uma boa previsão de longevidade. Devido às suas características, que se associam a uma redução da energia introduzida na construção em simultâneo com a função iluminação, permite ainda controlar melhor a temperatura interior, no verão, ao contrário de outras formas de iluminação.

Com origem na Austrália e desenvolvido nos Estados Unidos, este sistema construtivo começa a ser integrado também na Europa. Com uma história ainda diminuta na Europa, a investigação científica sobre os candeeiros solares tem-se multiplicado nos últimos anos. Este interesse recente deve-se à sua evolução tecnológica, que melhorou o rendimento do sistema, e também à situação atual de crise na Europa a que se associa uma preocupação muito forte de redução de custos.

Portugal é um país que apresenta um ótimo clima para a implementação deste sistema nos edifícios, pela sua insolação (tempo médio de céu limpo com Sol incidente - cerca de 50% a 60%). Esta situação

permite aumentar e melhorar o usufruto das potencialidades deste sistema de iluminação em comparação com outros países menos “ensolarados” o que no entanto não implicou um aumento importante do seu uso em Portugal, talvez devido ao facto de os conceitos de candeeiros solares e de condutas de guia de luz estarem ainda pouco difundidos no país, observando-se que a sua implementação está assim atualmente só presente num número bastante reduzido de edifícios.

1.2 OBJETIVOS DE ESTUDO

Contextualizada no âmbito da eficiência energética e promoção de sistemas construtivos inovadores, esta dissertação revela a importância da iluminação natural e do seu adequado dimensionamento no conforto interior dos edifícios.

Neste documento é realizada uma descrição tecnológica dos candeeiros solares, abordando os parâmetros que permitem prever o seu desempenho quando aplicados a um dado edifício.

Recorreu-se a um estudo de mercado como fonte de informação sobre os produtos e resultados experimentais realizados pelos fabricantes, devido ao carácter inovador deste sistema construtivo e do seu constante desenvolvimento.

A dissertação apresenta um caso de estudo real, com o objetivo de apresentar o dimensionamento de um projeto de iluminação integrando os candeeiros solares com uma previsão do seu desempenho.

Este estudo pretende assim promover o aumento da utilização de candeeiros solares em Portugal, mais especificamente em edifícios industriais, através da realização de um projeto específico para uma situação real existente a que se associou um estudo de viabilidade técnico-económica que o compara a outras soluções de iluminação e concretiza o período de tempo em anos de retorno do investimento em novos candeeiros solares, comparando a poupança em custos energéticos com o investimento a realizar, bem como a caracterização dos ganhos de desempenho correspondentes à incorporação da nova solução no existente.

Este documento foi realizado com elevada motivação pois explora temas de interesse atual, com um carácter inovador utilizando energias limpas e renováveis para desempenhar a sua função de iluminação, fruto do desenvolvimento tecnológico, proporcionando a melhoria do conforto nos edifícios.

Os candeeiros solares permitem reduzir custos de exploração e garantem uma qualidade visual através de uma adequada intensidade e temperatura de cor, originando maior conforto visual dos utilizadores do edifício. É um tema que abrange vários campos do conhecimento, aliando a arquitetura e a iluminação natural à engenharia eletrotécnica, aos conceitos de luminotecnia e às tecnologias e sistemas construtivos e sua compatibilização com outros elementos da construção (questões construtivas).

1.3 BASES BIBLIOGRÁFICAS

Na realização do estado de arte relativo à iluminação natural, as principais referências foram o livro do autor Licínio Cantarino de Carvalho [3] e a comunicação “*A iluminação nos edifícios*” de António José Santos [4].

Para o desenvolvimento dos cálculos no capítulo 5, foram consultados os apontamentos da disciplina de Luminotecnia e Instalações Industriais do professor Armínio de Almeida Teixeira [7] e o artigo científico “*Light transmission efficiency of daylight guidance systems*” de Valerio Lo Verso et all. [32].

Tendo em conta a recente entrada deste produto no mercado, principalmente a nível nacional, a pesquisa passou também por consulta de normas de níveis de iluminação, catálogos e páginas WEB de fornecedores e fabricantes.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em sete capítulos:

No capítulo 1 é efetuado um enquadramento geral do tema do trabalho, apresentando os objetivos, âmbito e estrutura do mesmo.

O capítulo 2 apresenta o estado de arte relativo à iluminação natural, nas áreas mais relevantes relacionadas sobretudo com fontes inovadoras de luz e refere as grandezas e conceitos básicos fundamentais de luminotecnia, mais relevantes para uma mais fácil leitura e interpretação do documento.

A caracterização do sistema construtivo em estudo e respetivo estudo de mercado é feita no capítulo 3.

O caso de estudo é definido em termos gerais no capítulo 4, incluindo a caracterização arquitetónica da unidade industrial analisada e a caracterização da solução de iluminação atual da fábrica, incluindo a definição das claraboias e luminárias bem como da caracterização geral dos níveis de iluminância medidos no local com recurso a equipamentos adequados para esse efeito.

No capítulo 5 apresenta-se uma proposta de uma solução de iluminação complementar da existente com recurso exclusivo a candeeiros solares, evidenciando as suas potencialidades como solução de reabilitação e melhoria de desempenho luminotécnico de áreas de trabalho. Neste capítulo pretende-se demonstrar o excelente contributo que a iluminação natural pode trazer a um edifício com vários postos de trabalho, melhorando em simultâneo o conforto visual e os gastos energéticos associados à função iluminação.

O capítulo 6 apresenta a avaliação técnica (desempenho) e económica da referida solução, considerando a situação atual como base de trabalho e de comparação de desempenhos.

Por fim, no capítulo 7 são referidas as principais conclusões obtidas com este estudo, e é proposto o desenvolvimento de estudos futuros que possam vir a contribuir para o sucesso de soluções funcionais e rentáveis economicamente, através do uso de sistemas inovadores na construção.

2

SISTEMAS INOVADORES EM ILUMINAÇÃO NATURAL

2.1 ILUMINAÇÃO NATURAL

A iluminação natural pode ser definida como o preenchimento de um determinado espaço com luz, a qual é consequência da luz do dia, ou seja, luz proveniente do Sol, que é normalmente dividida em luz difusa (luz do céu) e luz direta (radiação solar), tendo em conta que a segunda nem sempre está presente. Esta combinação de luz permite o conhecimento da forma e textura das superfícies que nos rodeiam [1].

O Sol emite energia sob a forma de radiação, da qual resulta a luz natural. Na composição da radiação existe uma pequena gama de espectro magnético que é perceptível pela visão humana. A esta gama de comprimentos de onda dá-se o nome de radiação visível [2].

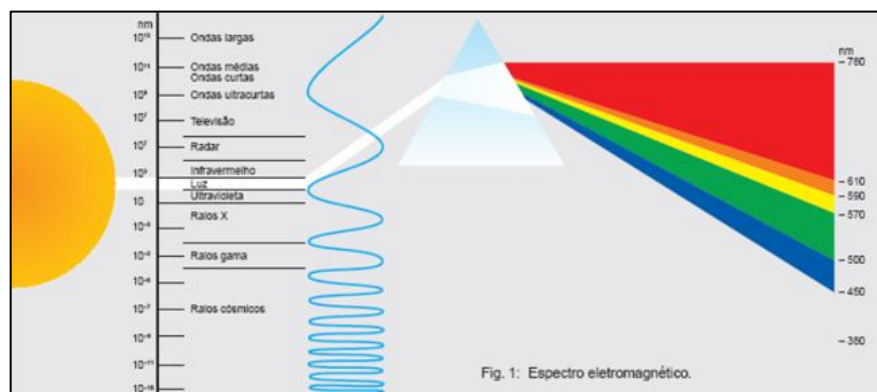


Fig. 1— Espectro de visão, radiação visível [1]

A luz do céu ou luz de difusão é resultante de um conjunto infinito de luminâncias sem uma única direção definida, mas de todo um hemisfério, o qual apresenta iluminâncias iguais em todas as direções. A caracterização da luz direta ou radiação solar é bastante mais simples, pois conhecida a posição do sol, obtém-se a iluminância que produz num plano perpendicular à direção em que incide [3].

De modo a perceber qual é a luz natural disponível para um dado edifício é fundamental entender o meio ambiente exterior, isto é, a localização geográfica, a latitude, se o edifício está numa zona costeira ou, por outro lado, no interior, o tipo de clima e a qualidade do ar, pois estes fatores estão diretamente ligados à intensidade e duração da luz do dia. A quantidade de luz recebida por um

edifício depende ainda do local onde se encontra, da sua orientação, da quantidade e dimensão dos obstáculos circundantes e da refletividade das superfícies envolventes [1].

Na gestão da qualidade do ambiente interior de um edifício, o parâmetro iluminação natural é fundamental, uma vez que influencia de forma determinante o conforto dos ocupantes. Assim sendo, este parâmetro tem a principal função de proporcionar um ambiente visual interior adequado, assegurando as condições de iluminação necessárias à realização das atividades visuais [4]. Estas condições devem proporcionar um bom ambiente visual, minimizando a necessidade da utilização de iluminação artificial, e permitir um bom relacionamento com o espaço através do contacto com o ambiente exterior (vãos envidraçados).

No seguimento do parágrafo anterior, também deve ser valorizado de igual modo o fator economia. O bem-estar pode ser definido pelo conforto interior, isto é, conforto visual e térmico adequados, evitando possíveis situações de encandeamento das pessoas, homogeneizando a iluminação ao longo do espaço, e brilho constante entre as superfícies. Possibilitam-se assim as condições ideais para a máxima produtividade das tarefas realizadas no espaço em questão. Os objetivos anteriores devem ser alcançados sem esquecer o fator económico, por isso, a iluminação natural deve ser encarada no âmbito da eficiência energética, tendo em atenção os ganhos e as perdas térmicas e a sua articulação com a iluminação artificial.

Resumindo, considera-se perceptível que a iluminação natural é um aspeto positivo e muito importante nos edifícios (ou da sua maior parte) independentemente da sua função e tipo de utilização. No entanto, o uso descontrolado desta iluminação, não representa uma solução com sucesso, pois existem fatores que ficam diretamente condicionados. Assim o projeto de dimensionamento tem de ser devidamente elaborado, para que esta forma de iluminação seja favorável à qualidade global do meio interior.

A iluminação natural de um edifício é realizada através de elementos que possibilitam a passagem da luz para o ambiente interior, por outras palavras, é feita por vãos de envidraçados e aberturas. A entrada de luz pode ser horizontal através das fachadas (em elementos como janelas ou elementos translúcidos), ou na direção zenital através das coberturas (em elementos como claraboias e tubos solares). Para auxiliar estas entradas de luz, os edifícios têm ainda a sua forma geométrica e elementos de sombreamento que lhes permitem atingir adequados níveis de fenestração.

Nas imagens seguintes, são apresentadas diversas formas de iluminação natural para demonstrar as múltiplas soluções que podem existir nesta matéria.

Há edifícios com elevada percentagem de envidraçado na sua fachada. No exemplo da Fig. 2, verifica-se uma fachada-cortina, a qual é maioritariamente revestida por envidraçados que tapam os elementos opacos (estruturais e outros), não sendo desta forma visíveis do lado exterior.



Fig. 2 – Torre das Antas, elevada percentagem de área envidraçada

Existem edifícios “recortados” de modo a proteger os envidraçados, da penetração direta da radiação solar, Fig. 3.



Fig. 3 – Edifício Porto Antas, edifício recortado

Outra solução adotada é a introdução de dispositivos de sombreamento que permitam o resguardo interior da radiação solar, solução que possibilita aos ocupantes desfrutar da iluminação natural (luz difusa) e visão do ambiente exterior, sem colocar em causa o conforto térmico ou situações de encandeamento. A Fig. 4 a) expõe um edifício com elementos fixos na fachada, enquanto a Fig. 4 b) apresenta um sistema de dispositivos móveis que regulam a entrada da radiação solar no edifício.

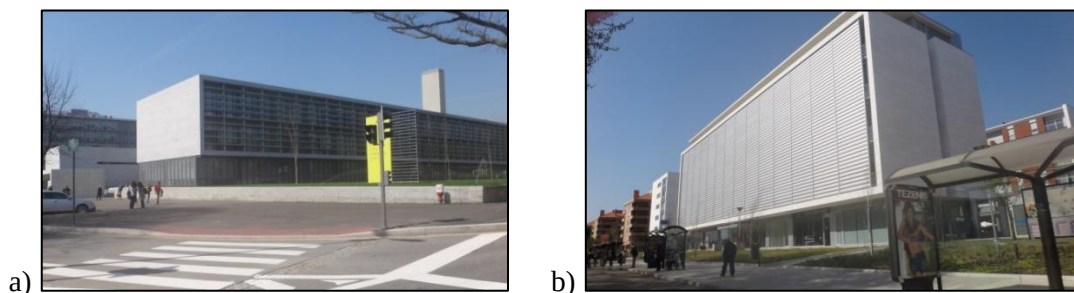


Fig. 4 – a) Edifício da FMUP, b) Edifício Paços de São João

Os edifícios podem apresentar dispositivos (interiores ou exteriores) que permitam reduzir a intensidade de luz no ambiente interior. Por esta razão, edifícios que exteriormente aparentam ter entrada de luz diferente, podem ter um tipo de fenestração bastante semelhante. Inversamente, o mesmo acontece em edifícios que exteriormente parecem ter os mesmos níveis de fenestração, devido a elementos opacos interiores fixos (paredes) ou móveis (dispositivos como persianas e cortinas), e que podem ter ambientes interiores com diferenças relevantes de iluminação natural.

Como se verifica foram apresentados apenas exemplos de iluminação com entrada horizontal, são bastante distintos das situações em que a entrada de luz natural é feita na vertical, na qual se englobam as claraboias e o sistema construtivo a aprofundar no âmbito desta Tese, os candeeiros solares.



Fig. 5 – a) Claraboias no departamento de biologia da FCUP, b) Hall de entrada com candeeiros solares [5]

As claraboias podem apresentar vários formatos, com uma geometria retangular ou em cúpula como aparece bem claro em múltiplos edifícios na Fig. 6.



Fig. 6 – Ribeira do Porto, Claraboias em edifícios antigos

2.2 COMPONENTES DE UM PROJETO DE ILUMINAÇÃO

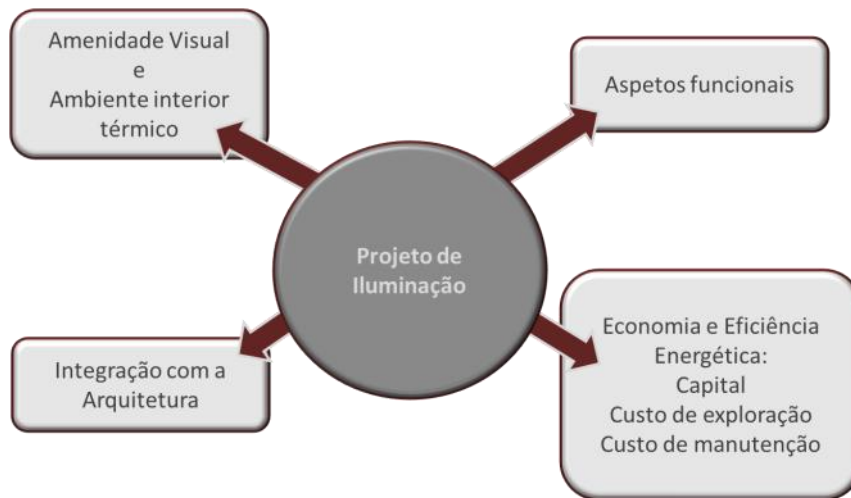


Fig. 7 - Projeto de Iluminação

Segundo António José Santos [4], um projeto de iluminação deverá responder aos seguintes objetivos:

- Proporcionar as iluminâncias necessárias ao desenvolvimento das diferentes tarefas visuais;
- Garantir as condições de conforto visual;
- Assegurar que o aproveitamento da iluminação natural não se refletirá negativamente noutros aspetos do ambiente interior;
- Optar por sistemas de iluminação artificial eficientes e flexíveis, sem prejuízo das necessidades quantitativas e qualitativas da iluminação [4].

Abordando o tema, relativamente aos edifícios, a iluminação de um edifício pode ser apenas através de iluminação natural, ou apenas por iluminação artificial, ou a articulação das duas formas de iluminação. Certamente que a última hipótese é a que apresenta melhores resultados, uma vez que possibilita uma infinidade de combinações, equilibrando o conforto interior do edifício com o fator económico. A iluminação natural deve prevalecer perante a fonte artificial, funcionando a segunda como um suplemento da primeira. Isto por uma perspetiva da eficiência energética, pois não só permite iluminação sem custos de utilização, como permite ganhos e perdas térmicas que podem ser favoráveis. A iluminação artificial apresenta outras vantagens incondicionais, uma vez que pode funcionar em qualquer hora do dia permite uma iluminação mais homogénea, e atinge facilmente compartimentos interiores ao edifício, que não estejam próximos da fachada do mesmo. Assim, a iluminação elétrica deve ser implementada de modo eficaz e flexível nas situações em que a fonte natural não permite as condições mínimas e necessárias que assegurem o conforto dos ocupantes.

De seguida são apresentados aspetos e requisitos que um projeto de iluminação necessita, para ser adequado e bem sucedido, baseados na comunicação de António José Santos sobre a iluminação nos edifícios: aspetos funcionais, amenidade visual e ambiente interior térmico, integração arquitetónica, eficiência energética [4].

2.2.1 ASPETOS FUNCIONAIS

Os aspetos funcionais estão diretamente ligados com a luz, isto é, permitem uma caracterização quantitativa e qualitativa da iluminação. Para isso é fundamental saber qual é a luz natural disponível, ou seja a componente de iluminação do ambiente exterior, por esta permitir o conhecimento, compreensão e previsão de fenómenos climáticos. A quantidade e qualidade da luz natural derivam:

- da latitude;
- da estação do ano;
- do período do dia;
- das condições meteorológicas locais;
- das condições de nebulosidade, apresentando um regime dinâmico devido principalmente à última condicionante;
- da quantidade e dimensão dos obstáculos que o rodeiam;
- da refletividade das superfícies adjacentes.

Para além de fatores externos, a qualidade e quantidade de luz dependem das características do próprio edifício:

- da geometria do edifício e compartimentos;
- da localização, orientação e características de transmissão da luz dos vãos;
- das características reflectométricas das superfícies interiores [4].

2.2.2 AMENIDADE VISUAL E AMBIENTE INTERIOR TÉRMICO

O ambiente visual interior depende da entrada de luz e do contacto com o ambiente exterior. A iluminação dos espaços deve ser tal que lhes possibilite ter uma atmosfera adequada e uma boa aparência de claridade e de brilho das superfícies. O conforto visual e o ambiente propício à realização das tarefas têm de ser considerados fundamentais, embora não deva ser esquecido que a iluminação deve realçar os espaços e o bem-estar e satisfação dos ocupantes, aumentando o seu campo de visão e diminuindo a sensação de enclausuramento. Tudo isto contribui para a amenidade visual [4].

A entrada de luz e radiação para o interior dos edifícios pode ser algo positivo, na medida em que possibilita ganhos e perdas térmicas que favoreçam o meio interior. Mas o efeito adverso também pode ser originado, pois a captação da luz natural pode condicionar o conforto térmico, afetando globalmente a temperatura, ou causando localmente temperaturas radiantes e velocidades do ar excessivas [3].

2.2.3 INTEGRAÇÃO ARQUITETÓNICA

O projeto de iluminação tem um papel importante na imagem do edifício, devendo contribuir para o realce dos espaços e geometria do edifício e dos seus compartimentos, atuando como um elemento valorizador da arquitetura. Os projetos de iluminação e arquitetura devem ser pensados de modo conjunto, uma vez que ambos influenciam a qualidade e o conforto visual do interior. As formas geométricas, a localização, a orientação e as dimensões dos vãos envidraçados, captadores de luz e elementos de sombreamento têm implicações profundas no desempenho final do edifício em termos de iluminação natural, e consequentemente, na maior ou menor necessidade de iluminação artificial assim como no conforto dos ocupantes [4].

2.2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Nem sempre o custo da energia foi um problema, contudo, nos últimos anos o custo da energia tem aumentado de forma significativa, e por isso, os custos de manutenção e utilização de vários sistemas têm começado a surgir como condicionantes para o bom funcionamento de várias atividades. Neste sentido, surgiu o conceito de eficiência energética e sustentabilidade que se baseiam na utilização racional da energia, maximizando as fontes renováveis ou naturais, com o objetivo de minimizar os custos e gastos energéticos sem nunca colocar em causa a qualidade da iluminação e a satisfação das exigências de conforto visual dos utilizadores.

Desta forma, deve ser seguida uma estratégia de implementação da luz natural, favorecendo o ambiente interior, com auxílio da iluminação artificial devidamente conjugada, respondendo às exigências, sem prejudicar o conforto térmico e reduzindo os custos de instalações e de exploração e emissões de gases prejudiciais à atmosfera (na produção da energia).

a) Características climáticas

O clima em Portugal tem uma predominância de céus limpos (cerca de 60% a 70%, em contraste com a Europa do Norte onde o céu encoberto é predominante [2]). Os Invernos são relativamente curtos e moderados, enquanto os Verões são quentes, secos, longos e soalheiros e as estações intermédias apresentam-se amenas. A zona sul do país é, no contexto europeu, uma das zonas com maior número de horas de Sol (radiação solar). Tendo em conta que a iluminação natural depende significativamente da radiação solar e do tipo de céu predominante na região, Portugal é um país que apresenta ótimas condições para o aproveitamento da luz solar para a iluminação de espaços interiores. Contudo, a captação em demasia desta fonte de luz, pode trazer prejuízos indesejáveis, provocando desconforto visual (encandeamento, sensação de calor), desconforto térmico (sensação de calor), e consequentemente aumento dos custos energéticos (necessidade de arrefecimento do edifício) [4, 6].

b) Tipos de edifícios

O tipo de função e utilização de cada edifício implica que alguns tenham um melhor aproveitamento da luz natural, pois aqueles que funcionem em períodos coincidentes com as horas de maior disponibilidade de luz natural (escritórios, plataformas comerciais, algumas indústrias) têm a possibilidade de gerar maiores economias na iluminação, sem prejudicar a qualidade da mesma [4].

c) Tipos de sombreamento e sistemas de controlo

Os elementos de sombreamento são extremamente úteis no dimensionamento da luz solar, uma vez que permitem a penetração da luz solar quando esta é benéfica e a sua restrição total ou parcial, quando a sua captação prejudica o conforto interior. De forma mais aprofundada, estes elementos permitem a proteção contra ganhos solares indesejáveis, encandeamento e permitem o controlo e modelação da iluminação natural e garantia de privacidade. Os dispositivos de sombreamento podem estar no exterior ou no interior do edifício e ser estáticos (palas) ou dinâmicos, com dispositivos manuais ou automáticos (estores e persianas) [4].

d) Iluminação artificial

A utilização da iluminação artificial e sistemas de controlo associados deve ser sempre suplementar à iluminação natural, sendo que deve ser utilizado apenas quando a iluminação natural não cumpre as condições de iluminação exigidas. As lâmpadas utilizadas devem ser energeticamente eficientes, ou seja, consumindo pouco (baixa potência) e permitindo elevada iluminância. A iluminação artificial pode ser assegurada de forma manual ou através de sistemas automáticos, os quais permitem reduzir

custos energéticos de forma significativa. No entanto, devido ao seu custo de investimento e manutenção, e ao “feedback” dos utilizadores nem sempre positivo, o seu uso é bastante limitado [4].

A combinação da luz artificial com a iluminação natural pode atingir um nível superior com a implementação do conceito de “zonagem”.

Esta metodologia permite a ativação da luz artificial por diferentes zonas do edifício, tendo em conta a variação da fonte natural. Desta forma, estabelecem-se locais com a mesma atividade ou período de ocupação, de acordo com o efeito pretendido. A aplicação da zonagem requer que as armaduras estejam colocadas paralelamente à fachada tal como é demonstrado na Fig. 8.

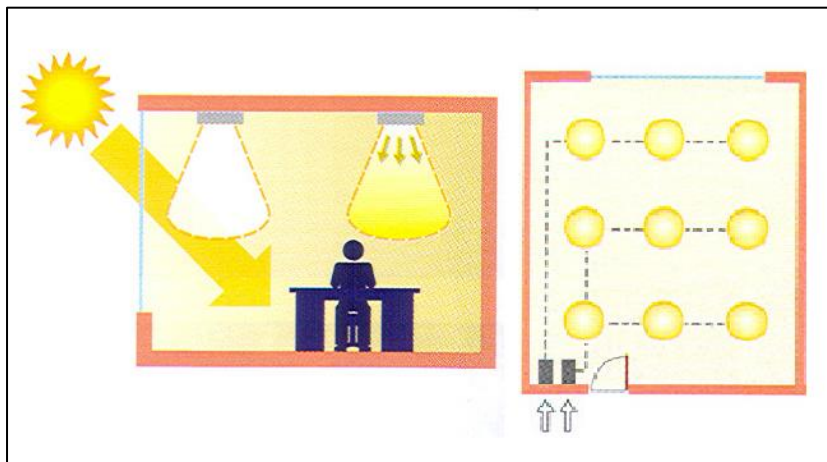


Fig. 8 – Zonagem, combinação da iluminação natural e artificial (adaptado de [7])

Este dimensionamento permite a iluminação de zonas interiores para as quais a iluminação natural não é suficiente em determinados períodos do dia, e por outro lado, possibilita a não iluminação de zonas desocupadas.

e) Atitudes dos ocupantes

Assim como o conforto visual é fundamental para os utilizadores de um espaço, também o ambiente térmico é importante para a produção e realização das tarefas. Neste sentido, e dependendo da atividade dos ocupantes, nem sempre é possível obter a melhor iluminação e um adequado conforto térmico usando apenas uma fonte natural. A sensação desconfortável de calor (ou o encandecimento) tem como consequência a oclusão da iluminação natural por parte dos ocupantes. Nestes casos, a ativação da iluminação elétrica é realizada para aumentar o conforto global, indo contra o conceito de eficiência energética [4].

Desta forma, é possível perceber as múltiplas condicionantes e os aspetos a ter em conta num plano de iluminação, abordando temáticas exatas (quantidade de luz) e por outro lado, aspetos mais subjetivos e difíceis de prever (qualidade e conforto).

2.3 CONCEITOS DE LUMINOTECNIA

2.3.1 GRANDEZAS LUMINOTÉCNICAS

O objetivo de proporcionar o bem-estar dos ocupantes tem uma vertente quantificável e outra qualificável, sendo a segunda subjetiva, pois depende de características psicológicas de cada pessoa. Quanto aos fatores objetivos e quantificáveis, destacam-se as grandezas:

- fluxo luminoso;
- intensidade luminosa;
- iluminância;
- luminância [8].

De todas estas grandezas, a vista humana consegue apenas entender a luminância, ou melhor, as diferenças de luminâncias entre objetos circundantes. A este fenómeno é dado o nome de brilho [8]. À luminância está também associado o encandeamento que, para valores elevados de luminância, é uma alteração prejudicial da perceção visual.

O fluxo luminoso (F ou Φ) é a quantidade de luz emitida por uma fonte num segundo. O seu valor é dado em lumens (lm).

A iluminância média, expressa em lux, é o fluxo luminoso recebido (Φ_r) por unidade de superfície (m^2).

$$E = \frac{\Phi_r}{S} [\text{lux}] \quad (1.1)$$

A intensidade luminosa (I) representa a quantidade de lúmens projetados numa dada direção dividida pelo ângulo sólido (W). A sua unidade é a candela (cd).

$$I = \frac{\Phi}{W} [\text{cd}] \quad (1.2)$$

Por fim, a luminância (L) representa a sensação de claridade que determinada fonte de luz produz nos olhos e define-se por:

$$L = \frac{I}{S_a} [\text{cd}/m^2] \quad (1.3)$$

Em que I é a intensidade luminosa, e S_a a superfície aparente (m^2), superfície projetada num plano perpendicular à visão [9].

A acrescentar a estas grandezas, são ainda considerados três parâmetros:

- **UGR (Unified Glare Rating)** – nível de desconforto por ofuscamento, no qual o valor mais baixo corresponde à situação menos perceptível, e o valor alto à situação de maior desconforto visual.
- **Rc (índice de restituição de cor)** – Este parâmetro serve principalmente para avaliação da iluminação artificial, devido à diferente qualidade e tipo de lâmpadas existentes no mercado.
- **Temperatura de cor** – este parâmetro define o tipo de luz, pois, as lâmpadas tendem a apresentar algumas tonalidades. Os leds têm uma temperatura de cor alta, ou seja, a luz tem uma tonalidade entre o azul e o roxo. Por outro lado, as luzes de baixo consumo e incandescentes apresentam um tom amarelado, consequência de uma temperatura baixa. De toda a gama de temperatura, a cor branca (temperatura neutra) é a mais desejável por permitir melhor perceção das cores. Como a temperatura de cor influencia a perceção das cores (uma luz branca reduz o cansaço do cérebro) é um aspeto fundamental na qualidade visual de um espaço habitável.

A iluminação interior e o conforto visual não dependem só das fontes luminosas, mas também de todas as superfícies existentes, com características próprias de reflexão e de transmissão da luz. Por isso é relevante introduzir os conceitos de fonte primária e de fonte secundária. Isto é, uma fonte primária é uma fonte luminosa, por exemplo, uma lâmpada, enquanto uma fonte secundária são corpos iluminados, superfícies refletoras.

Para superfícies que possibilitam igual luminância (refletida ou emitida) seja qual for o ângulo a partir do qual sejam observadas, diz-se que a Lei de Lambert é respeitada (ver Fig. 9).

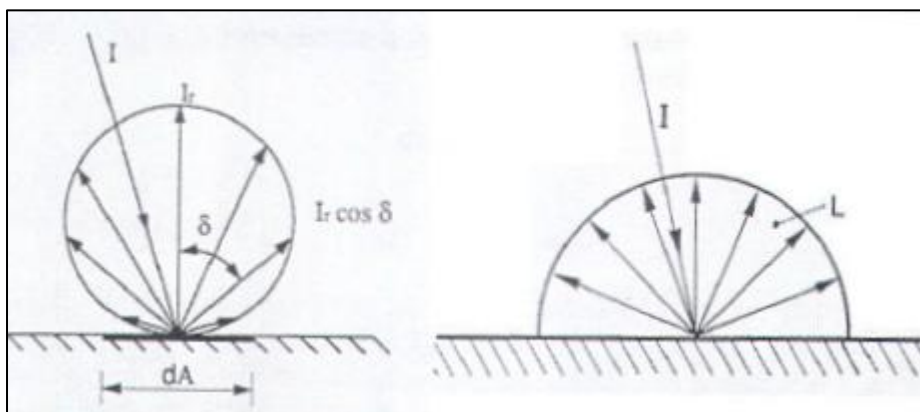


Fig. 9 – Lei de Lambert [9]

Nos casos de superfícies translúcidas (envidraçados) que obedecem a esta lei, a luminância é dada por:

$$L = \frac{\tau \times E}{\pi} \quad (1.4)$$

Em que τ é o fator de transmissão do material que constitui a superfície, ou seja, a relação entre o fluxo transmitido e o fluxo incidente:

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (1.5)$$

Na situação de superfícies com características refletoras que respeitem a lei acima descrita, a luminância é dada pela equação:

$$L = \frac{\rho \times E}{\pi} \quad (1.6)$$

Em que ρ é o fator de reflexão do material que constitui a superfície, isto é, a relação entre o fluxo emitido e o fluxo incidente:

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (1.7)$$

Este fator de reflexão é tanto maior quanto menor for a absorção de uma dada superfície. Num dado ambiente interior, a economia de luz artificial é tanto maior quanto maior for o fator de reflexão médio das superfícies desse compartimento, existindo um melhor aproveitamento da luz, uma vez que cada superfície iluminada devolve parte da luz incidente [10].

Quadro 1 – Tabela de fatores de reflexão (adaptado de [10])

Valores indicativos de fatores de reflexão em superfícies interiores		
Cores	Tetos	Paredes
Muito Claras	70%	50%
Claras	50%	30%
Médias	30%	10%

A iluminação pode ser classificada segundo o grau de difusão da luz emitida pela fonte luminosa, dependendo do fluxo luminoso dirigido para baixo [10]:

- Direta: mais de 90%;
- Semidirecta: de 60% a 90%;
- Mista: de 40% a 60%;
- Semi-indireta: de 10% a 40%;
- Indireta: menos de 10%.

Quanto ao tipo de reflexão da luz das superfícies, podem ocorrer de 4 tipos:

a) Reflexão especular

O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência acontece em superfícies polidas e espelhadas, tal como demonstra a Fig. 10.

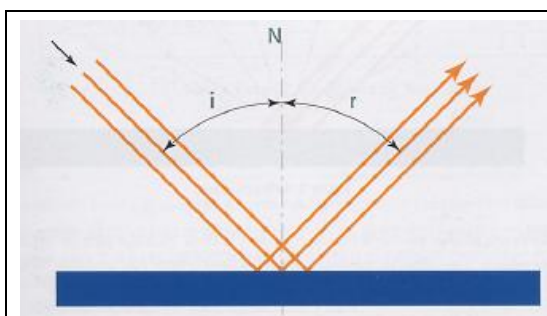


Fig. 10 – Reflexão especular [9]



Fig. 11 – Reflexão composta [9]

b) Reflexão composta

Neste tipo de reflexão observa-se da mesma forma o ângulo de reflexão igual ao de incidência, no entanto não existe uma imagem da fonte de luz.

c) Reflexão difusa

A reflexão difusa é obtida em superfícies como paredes e tetos, geralmente de cor clara. A luz é refletida em todas as direções satisfazendo a lei de Lambert.

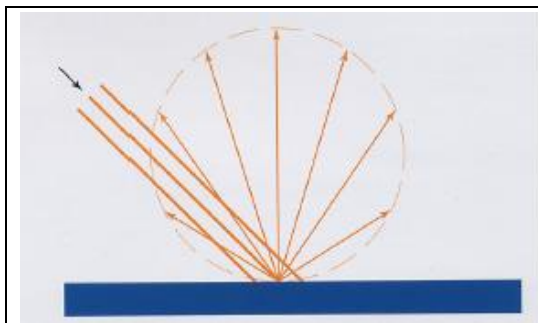


Fig. 12 – Reflexão difusa [9]

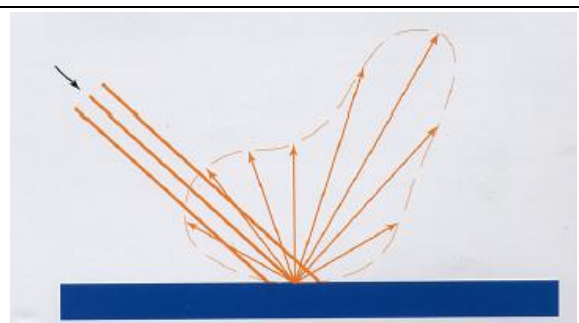


Fig. 13 – Reflexão mista [9]

d) Reflexão mista

Esta reflexão representa uma situação intermédia entre a reflexão especular e a difusa. Os metais não polidos e o papel brilhante são um bom exemplo deste tipo de reflexão [9].

A luz no interior dos edifícios depende ainda do fator manutenção. No caso de sistemas de iluminação natural, o principal motivo pelo qual se verifica uma redução do rendimento luminoso é a acumulação de sujidade nas superfícies. Nos envidraçados a acumulação de sujidade provoca a diminuição do fluxo luminoso que entra para o interior do edifício. Na situação das superfícies refletoras (pilas, paredes e tetos), a sujidade diminui o coeficiente de reflexão [10].

2.3.2 MODELOS DE CÉU

Tal como referido anteriormente, a iluminação interior depende das características do meio exterior. Para o estudo da iluminação natural são considerados 4 tipos de céu standard [7].

a) Céu uniforme

Nesta situação, Fig. 14, a luminância é constante independentemente do ponto de céu considerado. O céu uniforme corresponde a um céu encoberto por uma camada espessa de nuvens, sem que o Sol seja visível.



Fig. 14 – Céu uniforme [7]

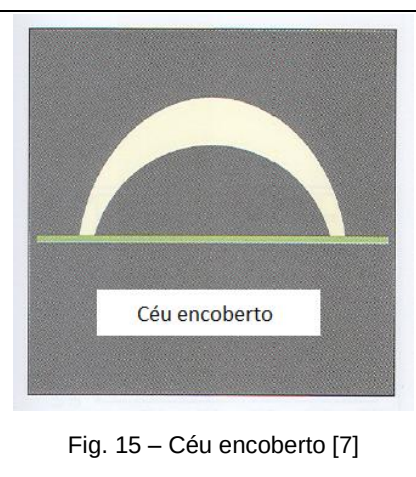


Fig. 15 – Céu encoberto [7]

b) Céu encoberto

O céu encoberto, Fig. 15, condiz com a presença de nuvens claras que escondem o sol. Neste caso, a orientação de elementos de iluminação zenital não tem qualquer efeito na luz interior devido à simetria em torno da direção zenital.

c) Céu claro

A terceira situação standard definida pelo CIE (Comité Internacional de Iluminação) é o céu claro, Fig. 16, que emite uma radiação difusa dependente da variação da posição do sol, mas não considera a radiação solar direta. Para este tipo de céu, os valores de luminância são influenciados pelos parâmetros geométricos e da posição do sol.

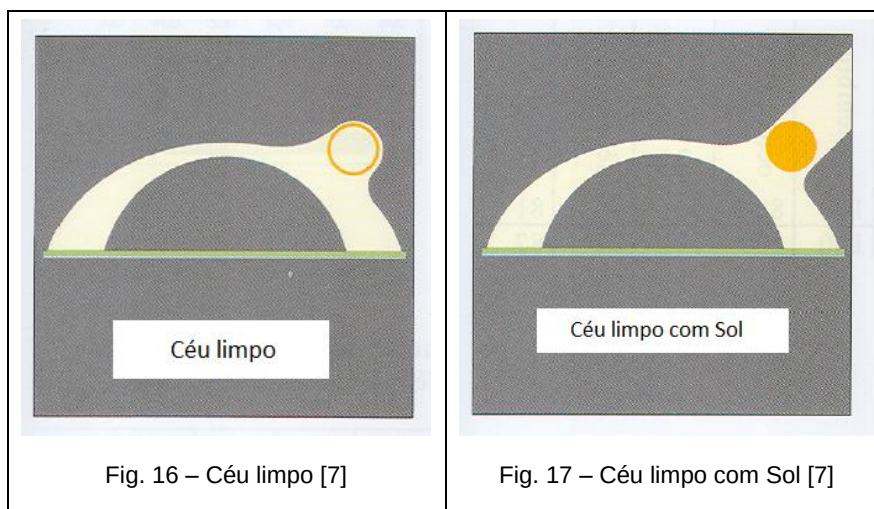


Fig. 16 – Céu limpo [7]

Fig. 17 – Céu limpo com Sol [7]

d) Céu claro com sol

Na Fig. 17 é exposta a última situação admitida que é o céu claro com sol. Este modelo tem em conta a iluminação natural, isto é, a componente de luz difusa e a radiação solar.

Para o cálculo de iluminação natural, o CIE, propõe a adoção de céu encoberto, o qual apresenta um nível de iluminância de 5000 lux sobre a superfície exterior horizontal, num local sem obstruções.

No cálculo de iluminação natural, para o caso de Portugal, a utilização deste valor é muito conservativo e pouco realista. Tal como referido no ponto “características climáticas”, o clima e o céu predominante no território Português é bastante diferente daquele que é comum no Centro da Europa, para o qual estes valores foram definidos.

2.4 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A iluminação natural faz parte da história da arquitetura e da engenharia. Com a construção de abrigos, veio a necessidade de os iluminar interiormente. Inicialmente, a sua iluminação era feita pelo uso do fogo e por aberturas com contato com meio exterior (iluminação natural).

No Grande Templo de Ammon, 1530 A.C. (Egipto Antigo), já se verificava o recurso da iluminação natural, através de formas engenhosas de captação da luz natural e dos raios solares. Também na Grécia Antiga (séc. VI – IV A.C.), os raios solares eram aproveitados para iluminar as estátuas no interior (Partenon). Assim como na Roma Antiga, o caso de “Panteão” (Fig. 18) onde se verifica a iluminação zenital, através de uma cúpula aberta no seu topo. No Cristianismo, situados ao longo das paredes, os envidraçados foram fonte de luz nas igrejas [11].

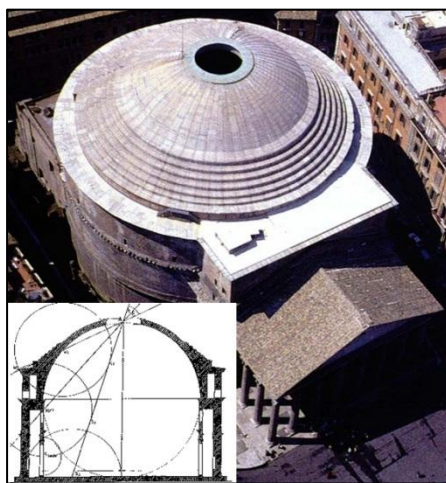


Fig. 18– Panteão, Roma, Itália [12]

A Segunda Guerra Mundial simboliza um marco na história da iluminação no Mundo, tendo em conta que até este acontecimento, a iluminação natural era a principal fonte de iluminação de espaços interiores, condicionada fundamentalmente pela arquitetura dos edifícios. Com o fim da Segunda Guerra Mundial, os países começaram a apresentar um elevado crescimento e desenvolvimento, o qual apresentava mais exigências de iluminação, exigências que não podiam ser satisfeitas apenas pela iluminação natural [8].

Em 1879, Thomas Edison cria a lâmpada elétrica incandescente. Posteriormente é inventada a lâmpada fluorescente que apresenta melhor rendimento. Assim, a partir do início do século XX, começa uma nova abordagem na iluminação através da introdução da lâmpada e consequentemente, de sistemas de iluminação artificial. Esta evolução veio trazer enormes vantagens e qualidade à vida do ser humano, contudo veio também gerar uma perda de preocupação do uso da iluminação natural [8].

Na década de 70, devido à primeira grande crise energética, identificou-se que grande parte da energia era consumida em iluminação artificial dos edifícios. Na década de 80, inicia-se uma crescente preocupação ecológica e ambiental, a procura de uma eficiência energética mais apurada e o usufruto dos recursos naturais de modo sustentado. Este ideal contribuiu igualmente para que a iluminação natural volte a ser objeto de projeto e dimensionamento preocupado e adequado [6].

No sentido da sustentabilidade e eficiência energética, começaram a surgir sistemas automáticos de iluminação artificial, sistemas avançados de iluminação natural, e um cuidado em articular estas duas fontes de iluminação minimizando custos sem o prejuízo da qualidade e do conforto do ambiente interior.

2.5 SISTEMAS AVANÇADOS E INOVADORES DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Como já foi referido em pontos anteriores, ao longo dos últimos anos tem-se verificado uma crescente preocupação com a eficiência energética, e com o apoio da evolução tecnológica atual têm-se produzido alguns sistemas que permitem conciliar uma boa qualidade de iluminação e um adequado conforto visual interior, com uma poupança substancial do custo da energia.

As novas tecnologias e soluções têm permitido uma distribuição melhorada da luz natural, maior conforto visual e controlo solar mais eficiente. Melhorias que se fazem sentir principalmente em aspetos frágeis dos tipos de iluminação mais antigos e correntes [4].

2.5.1 MATERIAIS ENVIDRAÇADOS AVANÇADOS (MEA)

Juntando aos tipos de envidraçados já existentes, atualmente verifica-se uma nova gama de envidraçados que, pelas suas propriedades e características, permitem dar resposta a novas situações e a novas exigências.

a) Envidraçados com Revestimentos de Baixa Emissividade e Espectralmente Seletivos

Os primeiros envidraçados deste tipo, tinham o objetivo de reduzir o custo do aquecimento nos edifícios, uma vez que a baixa emissividade do vidro, permitia a entrada de luz e calor, mas reduzia a sua dissipação para o exterior. Estes vidros eram adequados para climas frios, mas não para climas quentes ou moderados. Por essa razão, foi desenvolvido um envidraçado espectralmente seletivo, o qual permite a redução considerável de ganhos solares térmicos (40%) e assim a sua utilização nos países de clima quente e ameno [4].

Como qualquer outro sistema, também estas inovações apresentam algumas desvantagens, sendo o seu elevado custo e a errada perceção do ambiente exterior (sensação que está sempre céu nublado) as principais desvantagens desta tecnologia.

b) Elementos Óticos Holográficos (EOH)

Os EOH são uma tecnologia recente ainda pouco desenvolvida, para ser utilizada e considerada uma boa solução de sistema de iluminação natural. Apesar de ainda não estar totalmente estudado, este sistema apresenta um enorme potencial uma vez que permite a interceção da luz do Sol e a difração de parte dessa radiação noutra direção. Isto possibilita uma boa homogeneização da luz projetada para um dado espaço interior [13].

c) Envidraçados de características óticas dinâmicas

Este tipo de envidraçados, vulgarmente conhecido por envidraçados inteligentes, tem despoletado um interesse crescente no mercado, e representa a tecnologia de envidraçados mais promissora para o futuro [4].

Os “envidraçados inteligentes” alteram dinamicamente as suas propriedades óticas dando resposta às exigências pretendidas. Esta alteração de propriedades dá diretamente resposta às variações climáticas (dispositivos passivos), ou pode ser controlada dinamicamente de acordo com a vontade do gestor de iluminação natural do espaço em questão.

2.5.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL INOVADORES

A maior parte dos edifícios existentes apresenta lacunas na iluminação natural dos espaços, principalmente porque os projetos de iluminação não estão dimensionados, ou estão mal dimensionados pelo que, consequentemente, geram um aproveitamento pouco eficaz da luz natural. Os principais problemas são a falta de uniformidade das iluminâncias, a incidência de radiação solar direta e a incapacidade de iluminar de modo eficaz compartimentos que não apresentem vãos na envolvente exterior [4].

Os novos sistemas de iluminação natural baseiam-se na condução da luz do Sol e/ou luz difusa para o meio interior para os locais pretendidos. Deste modo, estes sistemas permitem melhorias significativas na distribuição da luz natural, do conforto visual e térmico. Estes sistemas inovadores podem ser distinguidos em dois grupos: SSPS e SIN. Os SSPS, abreviatura de sistemas de seguimento da luz do Sol, funcionam segundo um conjunto de espelhos e/ou lentes que seguem de modo contínuo a posição do Sol, e redirecionam o fluxo luminoso para a área do espaço pretendido. Os sistemas de iluminação natural (SIN) são sistemas mais simples que transmitem para o interior a luz difusa e, na maior parte das vezes, a luz do Sol. Os últimos têm a vantagem de funcionarem com o céu encoberto (aproveitam a luz do céu, a luz difusa), mas não tiram o melhor partido da radiação solar, uma vez que não acompanham a orientação do Sol, normalmente modificam ou completam uma janela ou abertura zenital [4].

De seguida são apresentados alguns destes sistemas inovadores, a título de exemplo.

a) Sistemas de canalização da luz

São um exemplo de um SSPS, e são compostos por 3 dispositivos principais:

- um helióstato, que é um sistema motorizado que segue, capta e concentra a luz do Sol através de deflectores e espelhos refletores (Fig. 19);
- uma conduta de luz, a qual permite a condução da luz captada;
- um emissor, normalmente um difusor que transmite a luz Solar para o meio interior do edifício [4, 6].

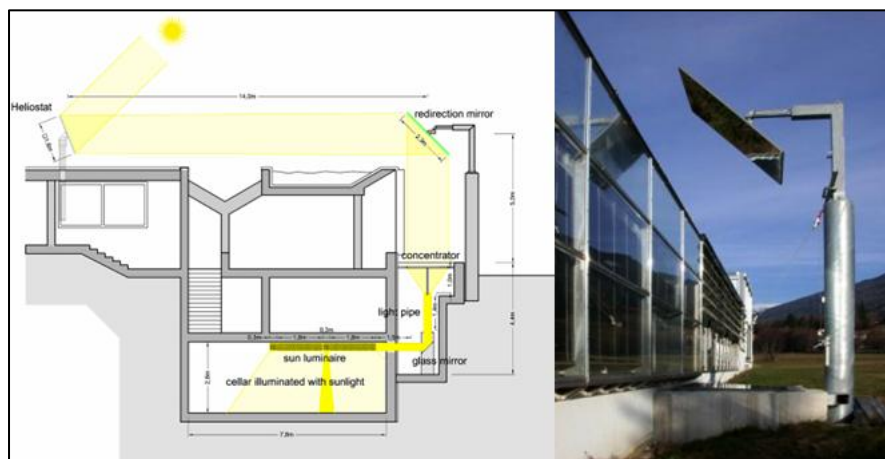


Fig. 19 – Helióstato [14]

b) Painéis prismáticos

Os painéis prismáticos (ver Fig. 20) permitem o controlo da fenestração, pois consistem na reflexão da luz proveniente de determinadas direções e a transmissão da luz derivada de outros ângulos. Estes painéis possibilitam o contacto visual com o exterior, a entrada da luz difusa, apenas bloqueando a luz direta. Deste modo, é possível iluminar de forma natural o meio interior eliminando o risco de encandeamento devido à luz do Sol [4].

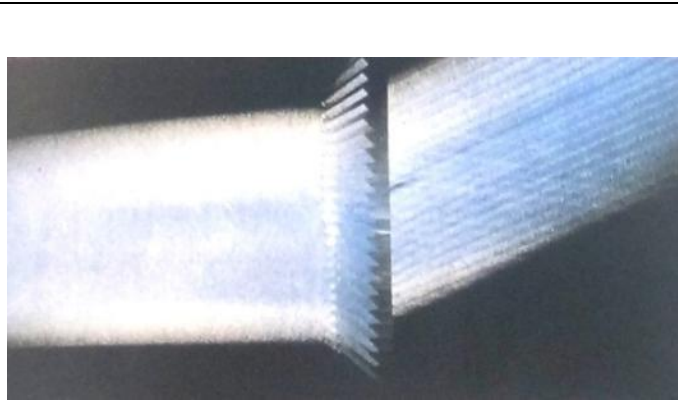


Fig. 20 – Painéis prismáticos [3]

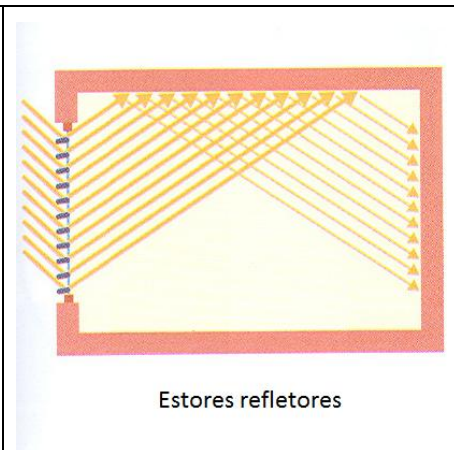


Fig. 21 – Estores refletores [7]

c) Estores refletores

Este dispositivo incorporado em vãos de envidraçados verticais permite o sombreamento (evita a entrada da radiação solar direta) e redireciona a luz natural para zonas mais profundas do ambiente interior, tal como exposto na Fig. 21. Os estores são compostos por lâminas de material refletor de modo a permitirem a reorientação da luz natural, podendo as lâminas ainda ser inclinadas, para um melhor sucesso das suas funções [7].

d) Palas refletoras

Tal como o sistema anterior, as Palas refletoras são elementos que têm a função de evitar situações de total entrada de luz direta (risco de encandeamento). O sistema permite sombrear e refletir a luz na sua superfície superior redirecionando-a para o teto tal como indica a Fig. 22. A sua posição e dimensões dependem da configuração e pé direito do compartimento, sendo que o seu cuidadoso dimensionamento é um fator decisivo para alcançar o desempenho pretendido. De salientar ainda que as palas refletoras situadas no exterior do edifício aumentam a quantidade de luz que entra no interior do compartimento enquanto que, situadas no interior, as palas refletoras reduzem a quantidade de luz recebida no interior, em comparação com a solução de uma janela tradicional [4, 6].

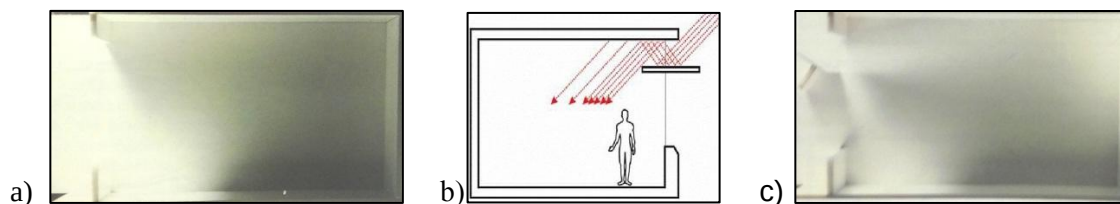


Fig. 22 – a) Sala sem palas refletoras [13], b) Funcionamento das palas [15], c) Sala com palas refletoras [13]

e) **Candeeiros Solares**

Constitui o principal âmbito desta dissertação aprofundar um dos sistemas mais avançados e inovadores de iluminação natural, o Candeeiro Solar, e validar o seu desempenho e contributo num projeto de iluminação que responda positivamente às exigências com um baixo custo de utilização.

O candeeiro solar (ou tubo solar) é um sistema do tipo SIN, que capta a luz difusa (e luz direta quando possível) na cobertura do edifício numa pequena cúpula acrílica e, através de um tubo com propriedades refletoras, conduz o fluxo luminoso até ao difusor, que por sua vez transmite a luz natural para o compartimento. Este sistema é esteticamente muito parecido com um candeeiro de teto (um foco) e possibilita uma iluminação bastante equilibrada e homogénea em compartimentos de profundidade considerável [6].



Fig. 23 – Candeeiro Solar [16]

Na Fig. 23 é possível entender o funcionamento do sistema inovador de iluminação natural que será objeto de estudo nesta dissertação.

3

CANDEEIROS SOLARES

3.1 ENQUADRAMENTO

Os candeeiros solares são um sistema construtivo inovador principalmente pelo seu formato relativamente simples e pelos seus componentes enormemente eficazes na função que desempenham (captação, reflexão e difusão da luz) e por não conterem mecanismos complexos. Seguem a ideologia da eficiência energética, aproveitando ao máximo as energias renováveis e limpas, neste caso a luz emitida pelo Sol e presente no céu, reduzindo a utilização das outras fontes de energia.

Constata-se que sistemas de condução da luz começaram a ser desenvolvidos desde o fim do século XIX, sendo o primeiro datado de 1901 na Noruega [17]. Aperfeiçoados na Austrália e Estados Unidos, graças ao desenvolvimento dos materiais utilizados, os tubos solares foram introduzidos na Europa há cerca de duas décadas atrás [18].

De acordo com a publicação do Comité Internacional de Iluminação (CIE 173:2006), os candeeiros solares são o sistema de captação de iluminação natural com maior sucesso comercial, estando instalados em edifícios em várias partes do mundo [19].

Contudo, apresentam algumas desvantagens, principalmente relacionadas com a pouca experiência acumulada da parte dos projetistas e a disponibilidade de dados relativos à iluminação presente no ambiente exterior para qualquer clima e região, sendo também o método de montagem e integração na concessão estrutural do edifício, um processo novo para todos. A par destas desvantagens, em determinadas implementações dos candeeiros solares, devem ser tidos em conta cuidados especiais contra a propagação do fogo entre compartimentos [18].

Este sistema pode ser usado em edifícios que apresentem coberturas leves, com uma estrutura que permita a sua integração segura (também é possível a sua integração intersectando lajes de betão armado, contudo a execução dos trabalhos e a segurança estrutural penalizam bastante esta hipótese). Em países em que a pré-fabricação e a utilização da construção leve são correntes (Estados Unidos por exemplo), os tubos solares são utilizados em vários tipos de edifícios incluindo residenciais. No entanto, em Portugal têm sobretudo potencial em superfícies comerciais e pavilhões industriais, devido à cultura de construção, e ao período em que estes são utilizados.

Os candeeiros solares são um sistema que procura minimizar gastos desnecessários de energia, e reduzir a consequente emissão de gases com efeito de estufa, tirando o melhor proveito da luz disponível no ambiente exterior. Começa a ser um sistema utilizado principalmente em pavilhões novos com atividades industrial, comercial e de prestação de serviços.

Num passado muito recente, têm-se multiplicado os estudos sobre o desempenho deste sistema construtivo e respetiva viabilidade económica. Dentro de vários investigadores, destaca-se Joel Callow, que em 2003 fez um estudo sobre este sistema, no âmbito dos sistemas inovadores de iluminação natural [20]. Estudou as características do clima do Reino Unido e Singapura e o espectro de luz dos componentes dos candeeiros solares. Apresentou valores de transmissão relacionados com o comprimento do tubo, e comprovou as limitações dos eventuais modelos matemáticos a desenvolver devido à constante renovação e desenvolvimento dos materiais, que interferem nos parâmetros do rendimento do sistema. O investigador D. J. Carter [18] também desenvolveu um trabalho interessante, estudando vários edifícios de escritórios no Reino Unido onde foram instalados tubos solares. A sua investigação revelou que os tubos solares não são, em geral, um bom investimento considerando o custo da eletricidade, e tendo apenas em conta os custos relacionados com a eletricidade. Contudo demonstrou a vantagem da qualidade da luz e o conforto dos trabalhadores, podendo gerar um aumento significativo do rendimento dos mesmos. Assim, o retorno do investimento pode ser muito mais apelativo que as perspetivas iniciais, na medida em que o principal custo, neste tipo de empresas é o salário dos colaboradores. Transportando a situação para o nosso país, pode-se afirmar que o rendimento dos candeeiros solares é bastante superior, devido às características da intensidade do Sol e tipo de céu, largamente vantajosas em comparação com as do Reino Unido. Em Portugal ao longo do ano, verifica-se entre 50% a 70 % de céu limpo (70% em Lisboa), enquanto no Reino Unido na maior parte do tempo se verifica o céu nublado (37% de céu limpo em Londres) [3].

Em 2009, M. Kocifaj [21] desenvolveu programas de cálculo (HOLIGILM e mais recentemente o mais completo ROOF_v3) apoiados por métodos matemáticos que permitem atingir valores fiáveis da iluminação fornecida pelos candeeiros solares. No mesmo ano, Jitka Mohelnikova [17] estudou o caminho percorrido pelo fluxo luminoso dentro do tubo refletor, dando um grande contributo para a noção da importância do comprimento do tubo, e a ineficácia de diâmetros muito pequenos. Verificaram-se outros artigos de vários autores como Stanislav Darula et all. (2010) [22] que estudaram a distribuição da luz no difusor de acordo com a inclinação e comprimento do tubo e a orientação do Sol. Foi concluído que se o elemento de interface tubo/interior do compartimento fosse um vidro transparente, iriam aparecer “pontos quentes” nas superfícies, provocando encandeamento e possível deterioração de objetos/alimentos. No mesmo país, seguiram-se outras publicações que têm permitido o maior conhecimento do desempenho deste sistema construtivo [23] e o desenvolvimento de métodos simplificados para a sua avaliação [24].

Deste modo, entende-se que os estudos sobre os candeeiros solares, o seu funcionamento e a sua viabilidade económica são bastante recentes. Estas investigações permitiram entender melhor o trajeto das linhas do fluxo luminoso e a importância das dimensões do tubo, bem como a sua capacidade de reflexão. A nível nacional, o conhecimento é ainda muito reduzido, e o facto de Portugal apresentar um tipo de clima significativamente diferente do Norte e Centro da Europa dificulta o dimensionamento e distribuição dos candeeiros solares num projeto de iluminação, e inviabiliza o uso de recomendações do CIE e programas existentes.

3.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Os candeeiros solares são um sistema de iluminação natural passivo, isto é, recebem a luz do dia de modo estático, uma vez que não seguem a inclinação do Sol. A captação da luz é realizada através de uma cúpula em material transparente e resistente aos choques (acrílico). A luz captada depende das

condições do ambiente exterior, sendo esta o somatório da luz difusa (luz do céu) e da luz direta disponível (radiação solar).

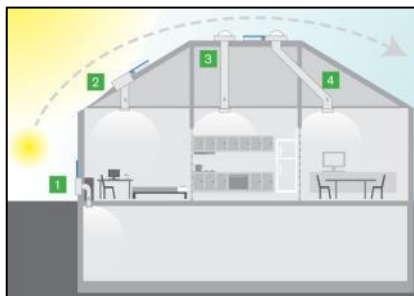


Fig. 24 – Sistema estático de captação de luz [25]

Depois de captada, a luz é conduzida através de um tubo com uma reflexão interior elevada, para reduzir as perdas de luz ao longo do processo de condução da luz. Este tubo permite vencer alguns metros, possibilitando não só a iluminação de compartimentos junto à cobertura, como a iluminação de compartimentos em pisos inferiores (embora neste último caso, de forma menos eficaz).

O último processo é a transmissão da luz para o interior, da forma mais homogênea possível. Esta etapa é assegurada por um difusor embutido no teto.

O sistema de tubos solares ideal é composto por um tubo rígido vertical, sem curvas e inclinações variáveis com uma proporção de diâmetro / comprimento máxima de 1/10 de acordo com o estudo feito pela investigadora Jitka Mohelnikova [17]. De acordo com o estudo anteriormente referido, a condução do fluxo luminoso é efetuada segundo múltiplas reflexões, isto é, a luz captada é refletida um número determinado de vezes dentro do tubo, e isso permite que a luz projetada pelo difusor seja a mais homogênea possível.

A Fig. 25 demonstra o trajeto das linhas de luz dentro do tubo. A primeira imagem representa o corte do tubo, no qual se verificam reflexões para cada linha de luz. Na segunda imagem, em planta, verifica-se que o fluxo luminoso é conduzido de modo circular por toda a superfície refletora.

Quanto maior o número de reflexões, mais equilibrada vai ser a distribuição da luz no espaço interior enquanto que, em contrapartida, o rendimento do tubo vai ser menor pois em cada reflexão existe uma perda no fluxo luminoso original.

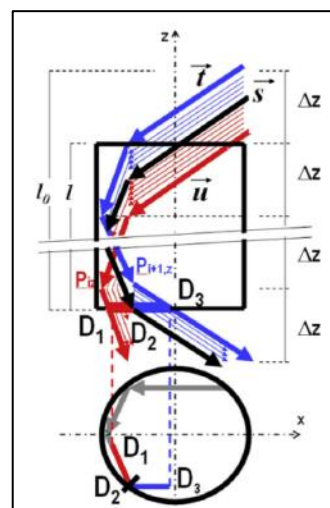


Fig. 25 – Reflexões dentro do tubo [17]

Um tubo curto em relação ao diâmetro, que não permita (para determinadas inclinações do Sol) qualquer reflexão, vai funcionar tal como uma claraboia e, na situação de permitir apenas uma reflexão, o fluxo luminoso vai estar concentrado numa zona do tubo e vai gerar uma iluminação mal distribuída aumentando o risco de encandeamento e deterioração de objetos devido à intensidade da luz projetada em forma de arco numa zona da superfície iluminada.

A Fig. 26, retirada do estudo com a autoria de Jitka Mohelnikova, expõe a distribuição do fluxo luminoso que chega ao difusor, numa situação em que o diâmetro do tubo é fixo, e o que varia é o comprimento do mesmo. Com esta imagem é simples de entender a importância da relação diâmetro/comprimento do tubo, podendo salientar-se que tubos curtos apresentam um mau desempenho comparados com tubos de maior comprimento.

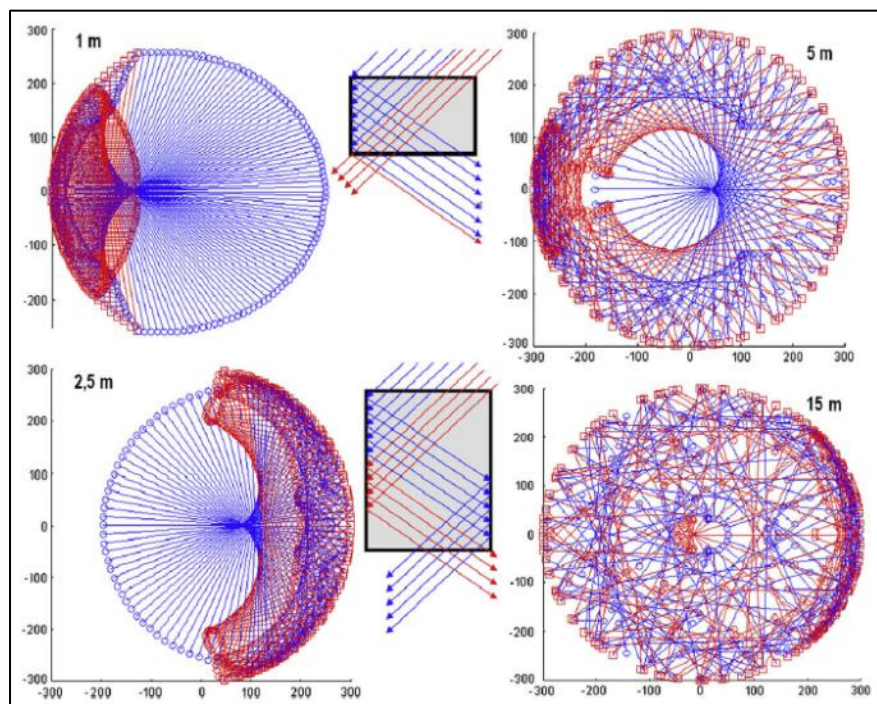


Fig. 26 – Tipo de projeção de acordo com o comprimento do tubo, para um diâmetro fixo [17]

3.2.1 RELAÇÃO COM OUTRAS FORMAS DE ILUMINAÇÃO

As Fig. 27 e Fig. 28 revelam a entrada de luz de envidraçados verticais (janelas) e envidraçados horizontais (claraboias) respetivamente, destacando pontos fortes e fracos destas soluções.



Fig. 27 – Entrada de luz para envidraçados verticais (adaptado de [10])

Os envidraçados verticais têm um bom comportamento térmico, uma vez que a entrada de luz é relativamente homogênea durante todo o ano (admitindo orientação a sul):

- Estação de arrefecimento (Verão) – A temperatura exterior e a radiação solar é maior;
- Estação de aquecimento (Inverno) – O ângulo de penetração da luz solar é maior.

No que diz respeito às outras orientações é importante ter em conta que as janelas voltadas a Norte, não recebem radiação solar no Inverno mas recebem durante o Verão, logo têm mau comportamento térmico (perdas térmicas no Inverno e ganhos solares no Verão). Nos envidraçados voltados a Este ou a Oeste, é necessário ter proteções solares para evitar o encandeamento, devido ao ângulo da radiação, para as horas da manhã e fim de tarde respetivamente.



Fig. 28 – Penetração da luz solar em envidraçados verticais solares (adaptado de [10])

Os envidraçados horizontais apresentam um mau comportamento térmico, pois a radiação solar e a sua penetração é maior na estação de arrefecimento (aumenta a temperatura no Verão) e menor na estação de aquecimento (aumenta as perdas térmicas no Inverno).

O problema de aquecimento excessivo no Verão torna-se menos perceptível em situações onde o pé direito é maior. No caso da estação de aquecimento, a iluminação é apenas devida à luz difusa, uma vez que o ângulo da radiação solar não atinge a superfície do solo (local de trabalho) do edifício.

Os candeeiros solares são um sistema que pode trazer vantagens para a qualidade da iluminação interior de um edifício, contudo, não é um sistema totalmente alternativo às outras fontes de iluminação. Neste sentido, este sistema construtivo nem sempre pode ser projetado para funcionar isoladamente, devendo em geral, funcionar em harmonia com outras fontes de iluminação natural e artificial.

Os envidraçados verticais têm a vantagem de permitir ao utilizador a visão para o meio exterior, criando um melhor conforto visual e espacial. O facto de os projetistas terem muita experiência com este sistema construtivo e o respetivo efeito no edifício, torna-os ainda mais interessantes pela viabilidade da sua implementação.

Os candeeiros solares podem funcionar em conjunto com o sistema referido acima, permitindo uma adequada iluminação em zonas do edifício que estejam longe dos envidraçados verticais. Além disso, e uma vez que a projeção da luz no interior é realizada a partir de um difusor, a sua iluminação é mais homogênea, sem riscos de encandeamento, permitindo assim uma iluminação contínua ao longo do edifício, independentemente da sua profundidade face às fachadas com aberturas. A Fig. 29 representa níveis de iluminação para uma situação de compartimento com janela, com e sem uma claraboia. Tal como a claraboia, o tubo solar também é uma forma de iluminação zenital, no entanto num candeeiro solar, a luz é direcionada sempre na vertical, aproveitando a luz difusa (tal como na claraboia) e maximizando o aproveitamento da radiação solar (se disponível).

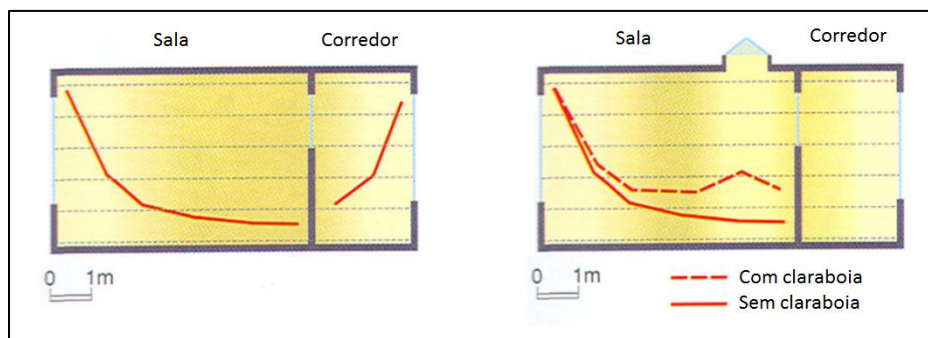


Fig. 29 – Níveis de iluminação de uma sala em profundidade, com e sem iluminação zenital (adaptado de [7])

Por maiores em número e tamanho que sejam os tubos solares num determinado compartimento, haverá sempre períodos (período noturno ou céu muito nublado) em que estes não transmitem iluminação suficiente para o bom funcionamento e realização de tarefas dos ocupantes. Isto é, a luz fornecida pelos tubos solares só existe no período diurno e depende das condições atmosféricas, sendo que a fenestração não é contínua (assim como nas outras formas de iluminação natural).

Por esta razão, este sistema deve ser auxiliado por iluminação artificial, se possível regulado automaticamente, que seja mínimo quando a luz dos tubos solares é ótima, e assegure a qualidade da luz interior quando os tubos solares não iluminam suficientemente. Obtendo uma iluminação interior em que o papel principal é das fontes naturais (e não poluentes), assistida pela fonte artificial sempre que necessário.

Os tubos solares permitem assim uma luz limpa e agradável, reduzindo custos de utilização da fonte artificial.

3.3 SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO PORTUGUÊS

Por este ser um sistema de iluminação relativamente recente, a sua composição, acessórios e funcionamento vão ser abordados de acordo com os formatos disponíveis no mercado.

Atualmente em Portugal existem fundamentalmente duas empresas fabricantes: a Chatron e a Velux, e outras duas empresas: a Polirígido e a Teclusol, que representam a marca Solatube no nosso país. Neste subcapítulo vão ser apresentados os candeeiros solares de cada marca, explorando com mais pormenor as soluções da Solatube. A escolha foi influenciada pela disponibilidade de fornecimento de dados por parte da Polirígido, e por este trabalho ter um objetivo académico, sendo necessário obter dados concretos e o mais reais possíveis, em que o tempo é uma condicionante.

No nosso país, este sistema construtivo está a suscitar um interessante crescente, sendo um argumento de mais-valia na compra e venda de moradias, e um sistema cada vez mais utilizado em áreas comerciais e industriais, como por exemplo, em grupos como a Jerónimo Martins, SONAE e Galp que já estão a introduzir os candeeiros solares nas suas áreas comerciais.

3.3.1 EMPRESAS FABRICANTES E FORNECEDORES DE TUBOS SOLARES EM PORTUGAL

A informação apresentada neste subcapítulo baseia-se nos catálogos das empresas e conteúdos disponíveis nos respetivos sites na web, sendo por isso, informação da exclusiva responsabilidade das mesmas.

a) **Chatron**

A Chatron é uma empresa de produção de equipamentos de climatização industrial. Opera em Portugal desde 1998, tem desenvolvido novos produtos e está equipada com o seu próprio laboratório de medidas e testes de tubos solares. Neste momento, os produtos que comercializa são equipamentos de ventilação, filtragem e tratamento de ar ambiente, condutas de ventilação e recentemente tubos solares. O Quadro 2 demonstra os constituintes dos seus candeeiros solares [25].

Quadro 2 – Componentes dos tubos solares de acordo com o catálogo da empresa Chatron (adaptado de [25])

Definição do Componente	
	<u>Cúpula</u> A cúpula é realizada em material acrílico para resistir a impactos. A par disso, permite a filtragem dos raios UV (até 380nm) nocivos à saúde e que levam à descoloração dos objetos.
	<u>Acessório de segurança</u> Este acessório de segurança evita a entrada de possíveis intrusos tais como pessoas/animais.
	<u>Tubo refletor</u> O tubo solar é revestido interiormente por um material extremamente refletor, que minimiza a dispersão dos raios e permite o fornecimento de luz a distâncias consideráveis, sem transmissão de calor.
	<u>Registo manual de entrada de luz</u> O registo de entrada de luz, versão manual, permite regular a quantidade de luz quando se requer menor entrada de luz.
	<u>Curvas refletoras</u> As curvas refletoras são utilizadas em situações onde é necessário desviar o tubo sem diminuir o desempenho do mesmo.
	<u>Difusor</u> O difusor oferece uma elevada difusão de luz, garantindo assim uma ótima distribuição de luz no espaço interior.

A Chatron apresenta algumas inovações, acessórios que permitem que os tubos solares tenham maior desempenho. Isto é, iluminação durante as 24 horas do dia, com recurso a um kit fotovoltaico composto por um módulo fotovoltaico, um regulador de carga, uma placa eletrónica, uma bateria e um conjunto de lâmpadas.

Quadro 3 – Sistemas de iluminação contínua (adaptado de [25])

Explicação do funcionamento	
 Tubo Solar Iluminação 100 % natural. Nova Cúpula para melhor captação de luz. Funcionamento ininterrupto, 24H dia.  Dia Noite ECO PRODUTO	<u>Tubo solar híbrido</u> Esta é uma versão recente do tubo solar, associada a um kit fotovoltaico e com um kit de lâmpadas ECO de baixo consumo que permite a iluminação nos períodos noturnos ou diurnos de luz natural reduzida.
Tubo Solar - ROOF WINDOW HÍBRIDO 100% Iluminação Natural. Trata-se de uma nova versão de aplicação de cúpula. Esta muito parecida com a tradicional janela de sótão.  BATIMAT ECO PRODUTO	<u>Tubo solar – roof window híbrido</u> Esta solução segue o mesmo funcionamento da primeira, tendo como característica de diferenciação, o seu aspeto mais concordante com uma janela de telhado, sendo um sistema mais compacto e robusto que o anterior.

De modo a ser possível efetuar algumas comparações em termos de vantagens económicas e capacidade dos tubos solares em relação à iluminação artificial, a Chatron apresenta 2 quadros de características técnicas. O Quadro 4 demonstra a área que os modelos podem iluminar, e o Quadro 5 o fluxo luminoso para diversos sistemas.

Quadro 4 – Área de cobertura de luz de modelos de tubos solares (adaptado de [25])

Modelo	Diâmetro [mm]	Comprimento do tubo [mm]	Área de cobertura de luz [m ²]
TS 250	250	625	10
TS 300	300	625	18
TS 400	500	625	40
TS 530	530	625	50
TS 750	750	625	65
TS 1000	1000	625	85

Quadro 5 – Fluxo luminoso segundo diferentes fontes de luz (adaptado de [25])

Fonte de luz	Energia [W]	Quantidade de luz (lm)	Consumo (A)	Durabilidade
Incandescente	100	1700	0,42	750 h
Fluorescente	30	2300	0,16	9800 h
TS 250	0	4600	0	Indefinida
TS 300	0	5900	0	Indefinida
TS 400	0	9100	0	Indefinida
TS 530	0	11040	0	Indefinida
TS 750	0	19651	0	Indefinida
TS 1000	0	30912	0	Indefinida

b) Velux

Em Portugal desde 1991, a VELUX é uma empresa que assenta na visão da luz do dia, ar fresco e qualidade de vida. Os seus produtos principais são as janelas de sótão, os tubos solares, as cortinas e estores exteriores e os sistemas solares, bem como soluções elétricas assim como os respetivos acessórios [5].

Este fabricante distingue quatro tipos de sistemas construtivos. No Quadro 6 observam-se as opções de tubos rígidos ou tubos flexíveis, e colocação em coberturas planas ou inclinadas.

Quadro 6 – Características dos tubos solares da empresa VELUX (adaptado de [5])

Características do sistema	
	<u>Tubo solar rígido para coberturas inclinadas</u> No exterior tem um vidro plano, com uma “moldura” de base de telhado. A condução de luz é feita por 2 curvas e 1 tubo com 99% de reflexão. No total o comprimento deve estar entre 0,9 e 1,85m (podendo ir até 6m). O diâmetro pode ser de 25 ou 35 cm. No final tem um difusor de vidro fosco.
	<u>Tubo solar flexível para coberturas inclinadas</u> No exterior tem um vidro plano, com uma “moldura” de base de telhado. A condução de luz é feita por 1 tubo flexível de 2m, em que a distância entre o telhado e o tecto deve ser entre 0,4 e 1,5m. No final tem um difusor de vidro fosco.
	<u>Tubo solar rígido para coberturas planas</u> Esta opção varia em relação à primeira na parte exterior, uma vez que apresenta uma cúpula em acrílico com 2 espelhos que permitem captar raios solares mais inclinados. Apenas disponível para um diâmetro de 35 cm.
	<u>Tubo solar flexível para coberturas planas</u> Esta opção varia em relação à segunda na parte exterior, uma vez que apresenta uma cúpula em acrílico com 2 espelhos que permitem captar raios solares mais inclinados. Apenas disponível para um diâmetro de 35 cm.

Para completar os sistemas apresentados, a empresa disponibiliza alguns acessórios que permitem melhor estética e conforto ao utilizador. No difusor é possível escolher o tipo de acrílico, se cristalizado ou prismático e a moldura que pode ser de vários tons. O quadro seguinte revela outros acessórios que adicionam outras funcionalidades ao tubo solar.

Quadro 7 – Acessórios de tubos solares da empresa VELUX (adaptado de [5])

Função do Acessório	
	<u>Cortina de escurecimento</u> Permite escurecer a divisão.
	<u>Entrada de ar</u> Possibilita a entrada de ar para dentro de uma divisão. O tubo de ar tem um diâmetro de 10 cm, e apenas pode ser instalado em tubos solares de 35 cm de diâmetro.
	<u>Kit de luz</u> Este acessório oferece a integração de um candeeiro elétrico com o candeeiro solar, tendo assim uma única fonte de iluminação.

Tal como a empresa anterior, a VELUX também apresenta dados de transmissão de luz, relacionando a capacidade dos seus candeeiros solares, com outras fontes de iluminação.

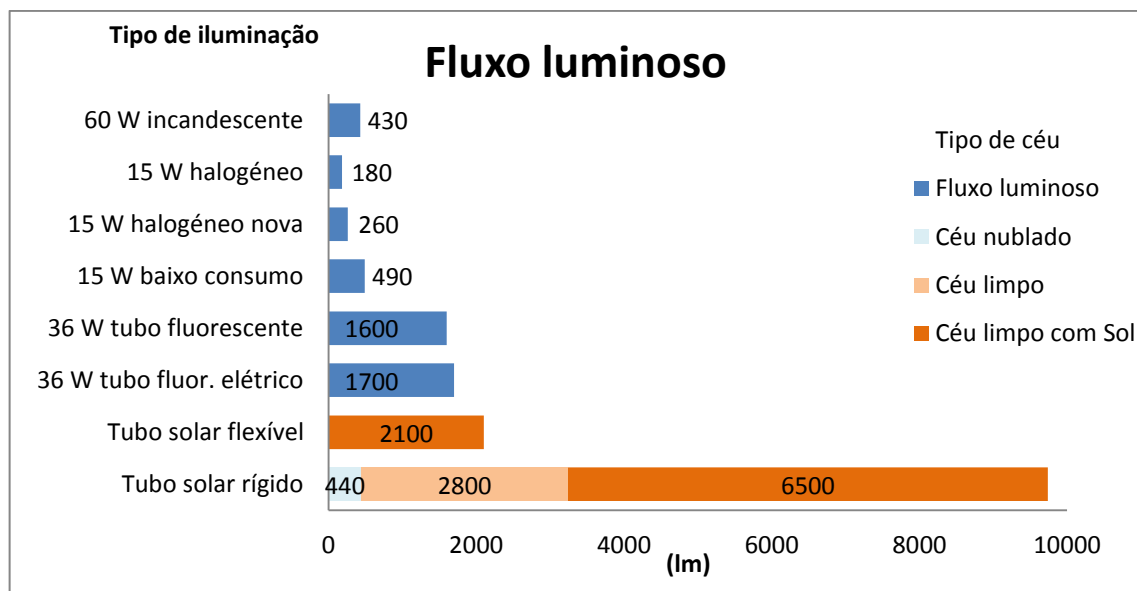


Fig. 30 – Transmissão de luz através de um túnel de luz da VELUX (adaptado de [5])

A Fig. 30 compara fontes de iluminação artificial (as 5 primeiras barras) com o tubo solar flexível (sexta barra) e o tubo solar rígido (a última barra), fornecendo valores do fluxo luminoso transmitido ao espaço interior.

c) Polirígido - Solatube

A empresa foi fundada em 1980, e nasceu para realizar equipamentos que proporcionem eficiência energética dos edifícios, e melhorem a qualidade de vida. Fabrica produtos para isolamento térmico, que decorrem de métodos eficazes de isolamento, conservação e aproveitamento energético [26].

Mais recentemente, a Polirígido comercializa o sistema “Solatube” que permite a presença da luz natural, pois transmite toda a magnitude da luz solar para qualquer divisão ou gabinete [26].

A Solatube tem origem na Austrália, estando sediada neste momento nos Estados Unidos, e a sua afirmação na Europa é um acontecimento bastante recente [26].

Este sistema construtivo tem normalmente uma estrutura igual à ilustrada nas figuras Fig. 31 e Fig. 32, e apresenta uma constituição base definida por uma cúpula transparente, uma tubagem, a base de ligação à cobertura e um difusor de teto:

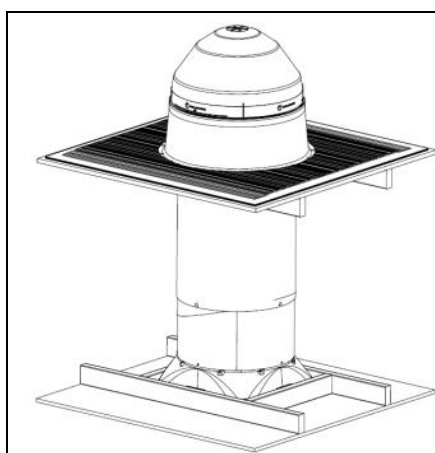


Fig. 31 – Desenho de um tubo solar [27]

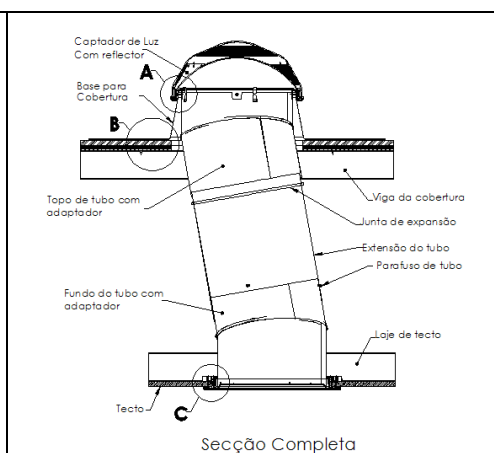


Fig. 32 – Corte vertical de um tubo solar [27]

c.1) Principais constituintes do sistema da Solatube

- **Cúpula transparente no seu topo** – normalmente fabricada em material acrílico por processo de injeção, para resistir a impactos e filtrar os raios UV (até 380nm). Tem a funcionalidade de captar a luz difusa e a radiação solar quando disponível. Pode ter um refletor no interior da cúpula, orientado para intercepar e direcionar a luz solar com ângulos baixos. A sua manutenção é bastante baixa, pois mantem-se limpo graças à humidade natural, chuva e vento [28].



Fig. 33 – Cúpula acrílica [26]

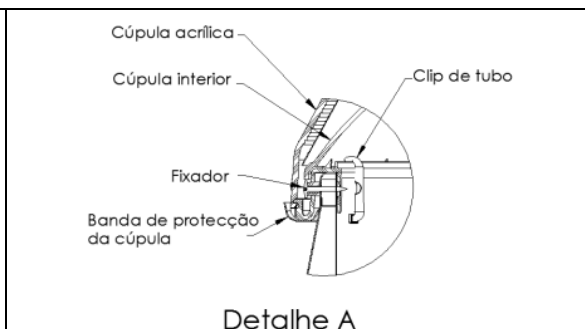


Fig. 34 – Pormenor de ligação da cúpula ao tubo [27]

- **Tubagem** – permite a condução do fluxo luminoso do exterior para o interior, atravessando elementos do edifício, com o mínimo de perdas. Estas tubagens são normalmente realizadas em folhas metálicas de elevada reflexão de modo a maximizar a condução da luz (99,7%). O tubo pode apresentar diâmetros variados, 25 e 35 cm para locais de pé direito baixo e áreas médias, e 60 cm para pavilhões de grandes dimensões com necessidades de iluminação elevadas. Quanto ao seu comprimento, pode ser um qualquer, sendo adaptável ao local da sua colocação. Para vencer curvas e inclinações, estão disponíveis adaptadores de ângulos, realizados no mesmo material, que garantem o mesmo rendimento de reflexão do tubo [28].

A ligação entre estes 2 componentes é realizada por encaixe, seguida de uma fixação através de parafusos e uma banda de proteção da cúpula, tal como indica a Fig. 34.

- **Base de ligação à cobertura do edifício** (Fig. 35) – este suporte é estampado sem soldaduras, com o objetivo de permitir o adequado funcionamento do sistema, sem causar problemas de corrosão, estabilidade e infiltrações de água. A Solatube oferece uma vasta gama de bases de cobertura, com a possibilidade de integrar uma gola que permita a máxima captação de luz solar, independentemente da orientação do telhado e de possíveis sombras provocadas por outros objetos [28].

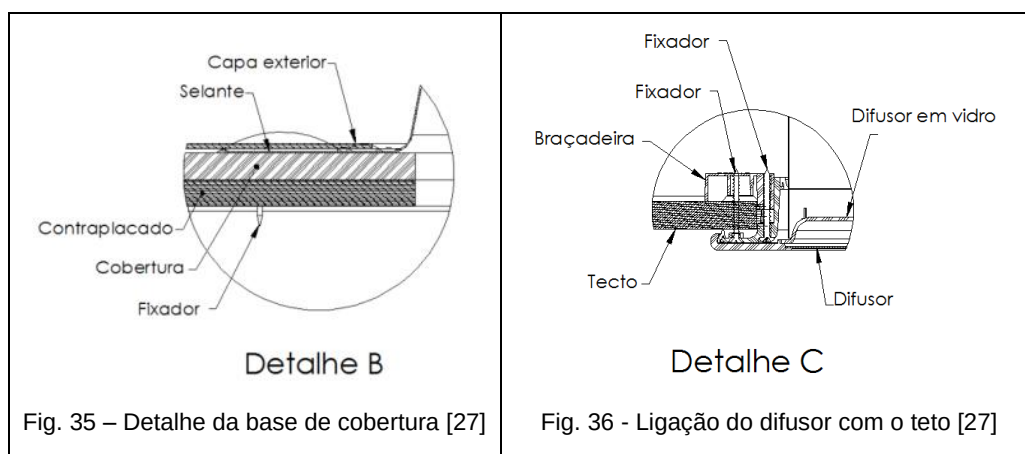


Fig. 35 – Detalhe da base de cobertura [27]

Fig. 36 - Ligação do difusor com o teto [27]

- **Difusor de teto** – completa o sistema na parte inferior. Este último componente fica embutido no teto, transmitindo a luz natural para dentro do compartimento. Este componente, geralmente de material acrílico, oferece elevada difusão de luz, garantindo uma ótima distribuição de luz pelo espaço a iluminar [28].

A Solatube dispõe de duas opções de difusor, o Vusion que oferece uma grande difusão da luz e o OptiView que utiliza lentes Fresnel de policarbonato, proporcionando uma luz natural ainda mais limpa. É possível integrar um difusor secundário para reduzir o brilho e a intensidade da luz, caso seja necessário [26].



Fig. 37 – Difusor Vusion [29]

Fig. 38 – Difusor OptiView [29]

Os candeeiros solares têm uma estética bastante agradável, pois do lado interior, assemelham-se visualmente a focos de teto (iluminação artificial). A Fig. 39 demonstra a estética do difusor do tubo solar no Aeroporto de Barajas em Madrid. Estes representam uma solução de candeeiro solar com ligação ao teto, no caso de pavilhões, ou outros edifícios que tenham apenas a cobertura, apresentando um desenho próprio, sem necessidade de ligação ou suporte a outra estrutura. É de salientar que estes candeeiros têm em média 3 a 4 quilos de peso, o que permite ficarem apenas suportados pela zona superior da cobertura.

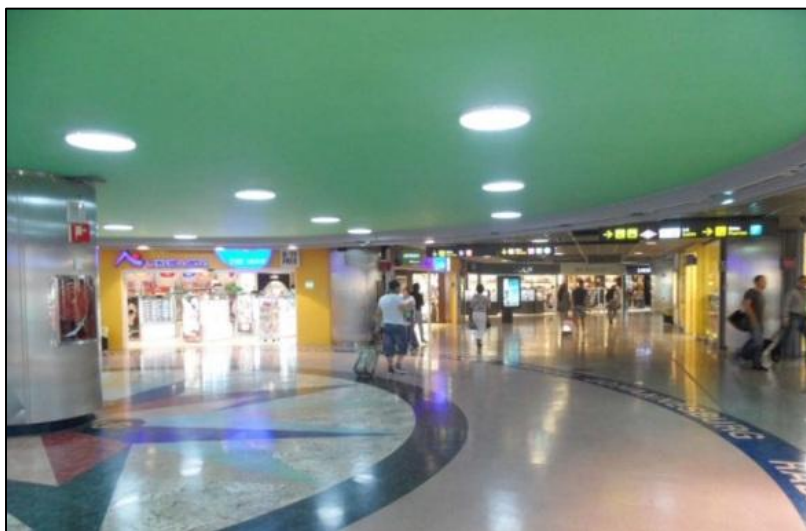


Fig. 39 – Aeroporto de Barajas, Madrid com candeeiros solares [26]

c.2) Acessórios para candeeiros solares

Os candeeiros solares são sujeitos a várias situações de instalação, e por esse motivo, também a Solatube dispõe de dispositivos adicionais, que permitem melhores desempenhos e novas funcionalidades. Dentro destes acessórios destacam-se a torreta, o regulador de entrada de luz, o kit de ventilação e o kit de luz elétrica:

- **Gola** – acessório para a base de telhado. Permite maior robustez e pode ser realizado em material plástico, metálico ou em alvenaria, de acordo com o meio envolvente. Pode ainda realizar a função de extensão, para evitar sombras de elementos próximos, ou em que a cúpula fique tapada por neve [28].



Fig. 40 – Golas [29]



Fig. 41 – Golas de extensão [29]

- **Regulador de entrada de luz** – diafragma de borboleta colocado no interior do tubo que permite regular a quantidade de luz que é debitada para o compartimento [28].
- **Kit de ventilação** – permite integrar a iluminação e a ventilação num só componente de teto [28].



Fig. 42 – Regulador de entrada de luz natural [29]



Fig. 43 – Kit de ventilação [29]



- **Kit de luz elétrica** – este componente possibilita iluminar o compartimento através de lâmpadas quando a luz do dia deixa de ser suficiente para responder às condições de conforto visual. Neste caso também pode haver uma perda da eficiência da condução da luz, caso haja corpos dentro do tubo de condução (lâmpadas e ligações). Este componente permite que o candeeiro solar e o candeeiro elétrico sejam o mesmo objeto, evitando uma elevada quantidade de dispositivos no teto [29].



Fig. 44 – Kit de luz elétrica com leds [29]



Fig. 45 – Kit de luz elétrica com lâmpada [29]



De acordo com a iluminação pretendida, a Solatube apresenta várias soluções de diâmetro, superfície de captação e comprimento dos tubos, dependendo das áreas a iluminar e da homogeneidade de iluminação pretendida.

No Quadro 8 são apresentadas gamas de valores, tendo em conta os sistemas comercialmente disponíveis da Polirígido.

Quadro 8 – Modelos Solatube (adaptado de [27])

Modelo	Superfície de captação [cm ²]	Diâmetro [mm]	Área iluminada (residencial) [m ²]	Comprimento máximo do tubo [m]
160 DS	1032	250	14 a 19	6
290 DS	1871	350	23 a 28	9
330 DS	2129	530		15
750 DS	4838	530		15

Com o objetivo de demonstrar o trabalho desenvolvido, a Solatube apresenta gráficos de eficiência e rendimento dos seus produtos novos, em comparação com os anteriores. A Solatube dispõe de gráficos que estabelecem as relações entre a transmissão de luz e a transmissão térmica, comparando o seu produto com outras formas de iluminação natural. O Quadro 9 realça o ótimo comportamento térmico dos candeeiros solares, quando comparados com claraboias que são o sistema tradicional de iluminação natural zenital mais usual.

Quadro 9 – Eficiência visível e conforto térmico (adaptado de [28])

Sistema	Transmissão de luz (Vt)	Coef. de transmissão térmica (U)	Índice relativo (Vt/U)
Janela baixa trans. térmica*	22%	0,16	1,38
Janela de vidro triplo	63%	0,36	1,75
Janela de vidro duplo	71%	0,49	1,45
Claraboia dupla**	71%	0,51	1,39
Solatube 750 DS	60%	0,20	3,00

Fonte: NFRC spectral weighting Function Research Project, Sezione 2.0 Marzo 2007

* com vidro duplo e película refletora; **vidro translúcido/prismático;

Na Fig. 46 é possível verificar a quantidade de luz (fluxo luminoso) transmitida para o interior, dependendo da estação do ano e da hora do dia. O novo sistema de captação de luz (a traço mais escuro), permite reduzir a entrada de luz prejudicial nas estações de maior intensidade do Sol, e permite ainda o máximo aproveitamento da luz do Sol, ao longo do período diurno da estação de aquecimento. Esta inovação evita o desconforto provocado pelo encandeamento durante o Verão, e possibilita o usufruir da luz natural com uma iluminação ótima durante um maior período de tempo, durante todas as estações do ano.

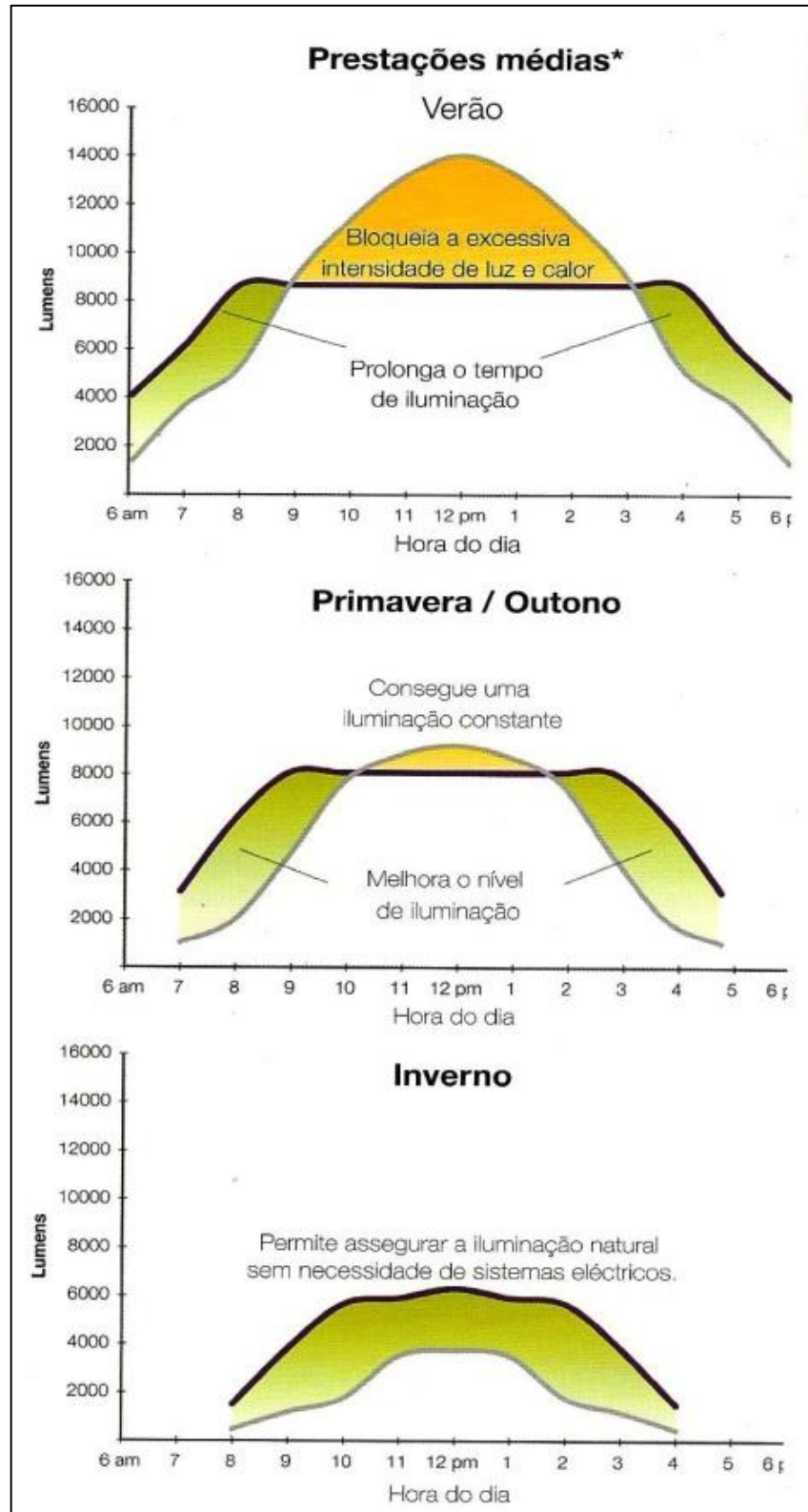


Fig. 46 – Desempenho do Solatube 750 DS [28]

c.3) Colocação e Acabamentos

A colocação depende do projeto de estruturas, nomeadamente se o projeto inicial já teve em conta ou não, a sua instalação. No caso da colocação ser numa obra de reabilitação do edifício será necessário projetar estruturas auxiliares que acomodem os candeeiros solares na estrutura inicial do edifício.

Depois de referir a necessidade de existir uma estrutura de suporte, são apresentados em seguida algumas regras gerais relativas à colocação deste sistema na cobertura de um edifício, de acordo com as indicações da Solatube [30].

- Escolher no interior o local onde se vai colocar o tubo solar;
- Marcar no teto (teto falso caso haja) o centro com um prego/parafuso, marcar o diâmetro do tubo e “cortar” essa dimensão no teto.
- Na cobertura, retirar algumas telhas e verificar o local onde está a marca, para a instalação no local correto (Caso seja cobertura inclinada com telhas);
- Marcar na cobertura a dimensão transversal do tubo e depois “cortar” por essa marca (cobertura pouco inclinada), ou retirar as telhas (cobertura inclinada com telhas);
- Colocar a base para telhado sobre a qual vai ser colocada a cúpula e fixá-la à cobertura com parafusos;
- Voltar a colocar as telhas, de maneira a tapar o telhado em volta da base para telhado. No caso de não ser telhas será necessário prever peças que fixem o tubo à cobertura (cobertura metálica por exemplo) e permitam a estanquidade da ligação;
- Colocar o início do tubo refletor encaixado e fixado à base para telhado com parafusos;
- Colocar acessório de segurança;
- Colocar a cúpula com o lado refletor orientado a Sul (hemisfério Norte) ou a Norte (hemisfério Sul), e fixá-la convenientemente;
- Juntar a quantidade de tubo necessária e unir com fita adesiva própria os troços de tubo, com as secções superiores por fora das secções inferiores;
- Fixar o tubo a um anel de selagem, que vai fazer a ligação com o teto;
- Colocar o tubo e encaixá-lo com o início do tubo colocado na cobertura;
- Fixar o anel de selagem ao teto ou estrutura de suporte se o edifício for um pavilhão que não apresente um teto tradicional;
- Colocar as lentes de efeito e o difusor.

3.4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

a) Pingo Doce de Oliveira do Douro

Esta unidade de hipermercado é relativamente recente, tendo sido pensada e equipada com 46 unidades de candeeiros solares ao longo de toda a loja. O sistema de iluminação é composto por tubos solares auxiliados por luminárias que graças a sensores de luz, aumentam e reduzem a sua potência, garantindo um nível de qualidade de luz contínuo, reduzindo assim de forma significativa o custo da energia necessária à iluminação.

Embora os valores de poupança energética não estejam disponíveis, é visível o desempenho satisfatório desta iluminação, sendo o feed-back dos trabalhadores bastante positivo.

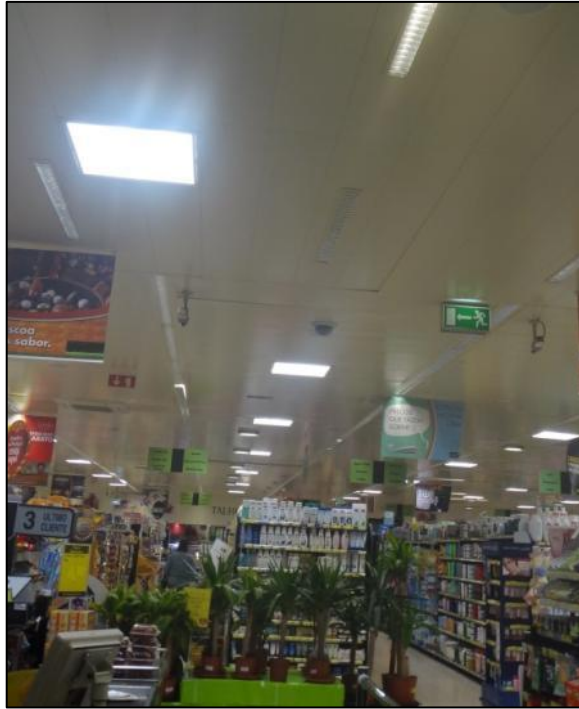


Fig. 47 – Hipermercado com candeeiros solares

b) Loja Tangerina – Galp (Freixo)

Nesta loja de estação de abastecimento de combustível, verifica-se o funcionamento dos candeeiros solares com um envidraçado vertical. O referido envidraçado que cobre uma elevada percentagem de uma fachada, ilumina a loja até cerca de metade da superfície, enquanto a outra parte é assegurada por tubos solares. Anteriormente essa parte era iluminada por lâmpadas, que atualmente estão desligadas, sempre que a luz natural é suficiente, reduzindo assim o custo da iluminação. Não menos importante, o ambiente visual interior é bastante agradável, sendo reconhecido pelos colaboradores.

c) Moradia na Boavista

Para determinadas situações em que o meio envolvente exige maiores cuidados, é necessário efetuar uma estrutura auxiliar para atender a exigências de segurança e estanqueidade. A implementação dos candeeiros solares numa cobertura inclinada e protegida dos ventos não necessita dos cuidados associados à instalação de candeeiros solares como em coberturas ajardinadas, ou em coberturas sujeitas à elevada exposição dos fenómenos atmosféricos. A título de exemplo é apresentado na Fig. 48, um candeeiro solar que ilumina uma cave e que tem contacto com o exterior através de um terreno ajardinado, no qual a presença da água é permanente.



Fig. 48 – Cobertura de uma cave em jardim, Porto [26]

d) Fábrica Polirígido

Com o apoio do Sr. Vítor, colaborador da Polirígido, foram medidos valores de temperatura na superfície inferior do difusor. A primeira situação em candeeiros solares de 35 mm fixados no teto falso, em que as temperaturas foram de 21° C no difusor e 20° C no teto falso. A segunda experiência foi realizada num ambiente diferente, na área de fabricação, onde a cobertura não tem teto falso, estando o sistema suspenso na própria cobertura (peso de 3 a 4 kgs). Nesta segunda medição, o candeeiro solar apresentava um diâmetro igual a 530 mm e a temperatura da parte inferior era de 25° C, enquanto a temperatura da cobertura do lado interior era de 26° C. Esta pequena experiência permite entender o bom desempenho térmico do sistema.

3.5 DETERMINAÇÃO DA ILUMINÂNCIA FORNECIDA PELO SISTEMA

O cálculo da capacidade de iluminação de um candeeiro solar não está ainda totalmente definido, devido às múltiplas condicionantes e parâmetros a ter em conta. O seu dimensionamento é usualmente efetuado através de métodos empíricos, considerando valores atingidos de iluminância em outros modelos já implementados. Depois de se obter a iluminância por candeeiro solar, o número e distribuição espacial dos mesmos é feito adotando métodos utilizados para luminárias de energia elétrica.

As principais razões para esta abordagem aos candeeiros solares resulta no facto deste ser um sistema novo, em que os componentes estão em constante desenvolvimento. Os diversos sistemas conferem assim um pior ou melhor rendimento, não estando padronizados e dependem de fornecedor para fornecedor. Para além disso, a luz disponível para captação no exterior varia muito, pois a orientação do Sol varia, as horas diurnas variam e o tipo de Céu varia consoante os países e regiões. A par disto a iluminância depende também do ambiente interior (como para as luminárias elétricas), isto é, da cor e da textura das superfícies do espaço a iluminar.

O investigador M. Kocifaj completou o modelo ROOF_v3 [21] que permite determinar e apresentar modelos de distribuição de iluminação interior, considerando situações diurnas normais e propagação da luz através de um candeeiro solar. Este programa tem em conta a iluminância relativa ao Sol e ao Céu, o tamanho do tubo, a cúpula, a transparência do difusor, entre outras. Uma vez que este programa não está disponível, não será considerado para a estimativa da distribuição dos tubos solares no pavilhão do caso de estudo (ver capítulo 5).

A figura seguinte representa os principais fatores a ter em conta para a estimativa da luminância conseguida nas superfícies de trabalho, utilizando os candeeiros solares (Fig. 49).

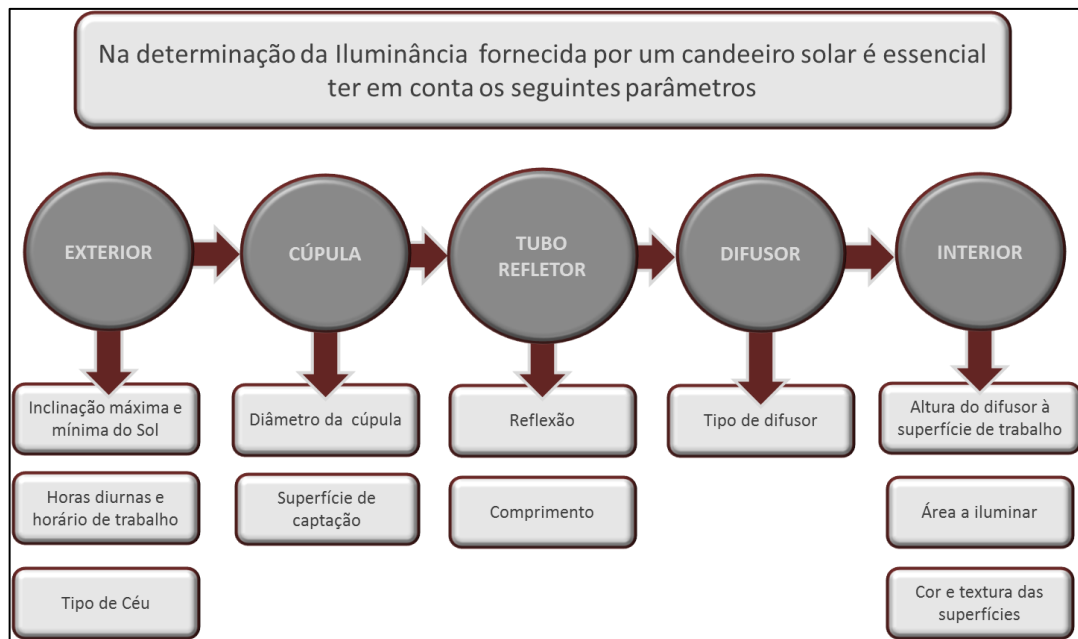


Fig. 49 – Avaliação da iluminância de um candeeiro solar

De forma a ser possível realizar uma previsão da iluminância realizada por este sistema, vão ser tidos em conta dois modelos semi-empíricos, baseados em conceitos básicos de física e medições já realizadas com modelos à escala real.

3.5.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS CANDEEIROS SOLARES (FLUXO LUMINOSO EMITIDO)

Para quantificar o fluxo luminoso transmitido pelos tubos solares ao interior do edifício, destaca-se o método mencionado pelos investigadores Mohammed Al-Marwaei e David Carter numa publicação sobre este sistema construtivo. Neste método existe uma concordância aceitável entre as previsões e os resultados obtidos através de medições, de acordo com estes investigadores [31].

Este método de previsão de fluxo luminoso tem por base o “TTE” (eficiência de transmissão do tubo) indicado pelo CIE. O TTE tem em conta a iluminância exterior disponível e as características dos componentes fundamentais do tubo. O CIE Comité técnico TC3-38 propôs este método de previsão baseado em princípios físicos fundamentais, o qual foi testado e comparado com resultados obtidos em medições de fotometria [31].

O cálculo do valor de TTE é dado pela equação:

$$TTE = \frac{e^c}{(1-c)^{0.5}} \quad (3.1)$$

Em que c é determinado por:

$$c = AR \times tg(Z) \times Ln R \quad (3.2)$$

A letra R representa a reflexão da superfície interior do tubo e Z o ângulo zenital pelo qual entra a luz do dia. Para céu encoberto pode se assumir $Z = 30^\circ$ (pode ir até 90°). AR é dado pela relação entre o comprimento L e diâmetro D do tubo:

$$AR = L/D \quad (3.3)$$

A eficiência geral do sistema é calculada segundo a equação:

$$Eg = TTE \times Tc \times To \times MF \quad (3.4)$$

sendo Tc a transmitância da cúpula, To a transmitância do difusor (dispositivo de saída) e MF o fator de manutenção.

Resta definir qual o fluxo total exterior, em que Eh é a iluminância exterior e A área de captação. E por fim, o fluxo transmitido para o interior que depende da eficiência do candeeiro solar e do fluxo exterior disponível.

$$Fe = Eh \times A \quad (3.5)$$

$$Fi = Fe \times Eg \quad (3.6)$$

Com esta metodologia é possível encarar este sistema como luminárias na cobertura ou teto do edifício, e calcular a sua iluminância e distribuição a partir de programas usados para cálculo de iluminação artificial.

3.5.2 MÉTODO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS CANDEEIROS SOLARES (ILUMINÂNCIA INTERIOR).

Presente num documento da autoria de Valerio Lo Verso, Anna Pellegrino e Valentina Serra, este segundo método permite prever a iluminância média projetada no espaço interior [32], e por isso foi o utilizado no capítulo 5, para estimar a iluminância e o número de unidades necessárias no novo projeto de iluminação.

Este método apresenta uma forma de abordagem relativamente idêntica à anterior, evidenciando a importância do rendimento global (η_{TLGS}) do sistema construtivo para avaliar a iluminância (E). Este rendimento global é dado pela equação (3.7) e é o resultado da multiplicação dos rendimentos das três fases principais que compõem o sistema, captação na cúpula, reflexão no tubo e transmissão no difusor.

$$\eta_{TLGS} = \eta_{cúpula} \times \eta_{tubo} \times \eta_{difusor} \quad (3.7)$$

O rendimento da cúpula é dado por $\eta_{cúpula}$ e é determinado pela equação:

$$\eta_{cúpula} = \frac{E_{b,out} \times \eta_{b,cúpula} + E_{d,out} \times \eta_{d,cúpula}}{E_{g,out}} \quad (3.8)$$

Em que as letras *b*, *d* e *g* representam respetivamente a iluminância com origem em luz direta, luz difusa e luz total. Por sua vez, o termo *out* significa que a iluminância abordada é a exterior disponível. Os valores do rendimento da captação da cúpula vão ser apresentados no gráfico presente na Fig. 59, presente no capítulo 5, tendo os gráficos da publicação como origem.

Este método apresenta 2 fórmulas para o cálculo do rendimento do tubo refletor, uma para céu limpo e outra para céu nublado:

$$\eta_{tubo} = \rho^{L \times tg(90 - y_s) / D_{eff}} \quad , \text{ para céu limpo} \quad (3.9)$$

$$\eta_{tubo} = \frac{e^{AR \times tg(90 - y_s) \times \ln(\rho)}}{(1 - AR \times tg(90 - y_s) \times \ln(\rho))^{0.5}} \quad , \text{ para céu nublado} \quad (3.10)$$

Nesta equação temos ρ que é a reflexão da superfície interior do tubo (%), *L* (comprimento do tubo em metros), y_s inclinação do Sol (°), D_{eff} é o diâmetro específico e é dado por: $D_{eff} = D \times \pi/4$; *AR* representa a relação do comprimento com o diâmetro (*L/D*).

O rendimento do difusor é dado pela fórmula (3.11).

$$\eta_{difusor} = \tau_{difusor} \quad (3.11)$$

Ou seja, o rendimento do difusor é igual à transmitância do mesmo.

Uma vez explicado como é conseguido o valor do rendimento do sistema, a iluminância interior é obtida segundo a equação:

$$E_{wp} = \frac{N \times \eta_{TLGS} \times A_{TLGS} \times UF \times E_{g,out}}{A_{wp}} \quad (3.12)$$

Que tem em conta o número de candeeiros (N), a área de captação (A_{TLGS}), e iluminância exterior disponível ($E_{g,out}$), o fator de utilização (UF), a área ou superfície de trabalho (A_{wp}) e claro, o rendimento do sistema.

O fator de utilização é o quociente entre o fluxo útil e o fluxo total emitido pelos sistemas. O fluxo útil é o fluxo luminoso que atinge o plano de trabalho.

O fator de utilização é determinado através de uma tabela que depende do índice de forma do local e da reflexão das superfícies, bem como do tipo de luminárias escolhidas (Anexo B.2).

O índice de forma é dado por:

$$K = \frac{a \times b}{h \times (a+b)} \quad (3.13)$$

Em que a e b são as dimensões da superfície do local, comprimento e largura respetivamente, e h a altura entre o sistema de iluminação e a superfície de trabalho.

Este método, igualmente baseado na CIE 173:2006, permite estimar a iluminância média realizada por N candeeiros solares, numa dada superfície de trabalho.

Os métodos considerados, não são exatamente rigorosos para caraterizar a eficiência de transmissão de luz de um candeeiro solar, devido á forte dependência do rendimento dos componentes que variam de modelo para modelo e ao longo do tempo, consequente da constante evolução do referido sistema construtivo. A partir de medições em ensaios à escala real para diferentes tipos de céu e inclinação do Sol, foram alcançados valores de eficiência dos candeeiros solares que permitem a previsão para outras soluções.

A curto prazo, é espectável que seja possível desenvolver uma ferramenta que realize com rigor simulações de utilização deste sistema inovador, prevendo a iluminância num dado local, o dimensionando e a distribuição dos candeeiros solares. Tendo em conta as suas mais-valias já comprovadas, quando instalados em situações de potencial utilidade [32].

3.6 EXIGÊNCIAS E ESPECIFICAÇÕES RELEVANTES

3.6.1 ILUMINAÇÃO

A função principal é o fornecimento de luz ao espaço interior do edifício. Consoante a função do local pode distinguir-se a iluminação ambiente e a iluminação das tarefas visuais. A primeira deverá permitir um ambiente agradável e ser tal que garanta a realização de atividades correntes que não exijam uma perceção visual significativa – observação e deslocação. A segunda destina-se a garantir o desempenho das tarefas em que a vista é especialmente solicitada (tarefas visuais), sem esforço nem incómodo.

A iluminação ambiente condiciona a aparência dos locais pelo que pode haver interesse, por exemplo, em criar padrões de iluminação diferentes ou tirar partido da falta de uniformidade da iluminação das janelas.

A iluminação das tarefas visuais deve permitir obter fatores de restituição do contraste elevados e tem em geral um valor relativamente elevado em comparação com a primeira. É de interesse geral uma boa uniformidade da iluminação.

Consoante os locais, a luz natural pode ser apropriada só por si durante o dia, ou pode não dispensar o complemento de luz artificial.

Sendo o principal objetivo dos tubos solares o aproveitamento da luz solar para iluminação interior, estes devem fornecer luz suficiente para ser satisfatório o uso destes em detrimento (total ou parcial) da iluminação artificial, pelo menos em alguns períodos do dia e do ano.

Esta forma de iluminação não pode colocar em causa os níveis de conforto térmico interior.

3.6.2 SEGURANÇA ESTRUTURAL

O sistema “candeeiro solar” deve estar devidamente fixado e suportado pela estrutura do edifício, mais especificamente da cobertura, de forma a ser estável, sem riscos de cair (total ou parcialmente) nem colocar em causa a segurança global da cobertura.

Além da segurança estrutural, a cúpula deve ser resistente a ações resultantes do seu uso normal, bem como de ações acidentais. Por ações acidentais entendem-se ações de origem climática como a queda de chuva, neve e granizo e as ações decorrentes de choques acidentais tais como a queda de pessoas e objetos (por exemplo antenas). A resistência ao vento também tem de ser considerada, mais propriamente a resistência a ações de pressão/depressão que podem gerar efeitos acústicos indesejados, e descontinuidades nos componentes que levem à perda de rendimento do sistema.

O candeeiro solar deve ainda apresentar uma robustez e um modo de montagem que impeçam a fácil intrusão de pessoas e animais.

3.6.3 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

O tubo solar é uma conduta que transporta um determinado elemento, neste caso a luz. Por ser um sistema que permite um efeito chaminé, é essencial ter em atenção os riscos de incêndio e prever proteções adequadas contra incêndio. No caso de tubos solares que intersectem diferentes compartimentos, o risco de propagação do fogo é elevadíssimo, e por isso, o sistema deve possuir componentes que minimizem e reduzam estes riscos.

3.6.4 ESTANQUIDADE AO AR E À ÁGUA

Os candeeiros solares, mais especificamente a sua parte exterior (cúpula e base para telhado), deverão garantir a estanquidade à água de condensação ou de infiltração por efeito de chuva proveniente do exterior.

Deverão ser praticamente estanques ao ar, de forma a que todo o fluxo de ar entre o exterior e o interior seja impercetível e consequentemente permitam garantir o conforto aos utilizadores, associado

à ausência de “correntes de ar”, à redução das perdas térmicas por ventilação a valores aceitáveis e ao conforto acústico.

3.6.5 DURABILIDADE E MANUTENÇÃO

A durabilidade é um aspeto realmente importante para que este sistema possa ser considerado um bom investimento económico. Por isso, os componentes que integram os candeeiros solares têm de estar preparados para as mais variadas ações, inclusivamente ações de limpeza, sem que a sua durabilidade fique comprometida.

O sistema deve precisar da mínima manutenção possível, tendo em conta que este fica colocado nas coberturas dos edifícios, com difícil acesso.

O isolamento da conduta de condução de luz deve ser tal que impeça a penetração de impurezas. Do lado interior do edifício, o formato do tubo deve impossibilitar a acumulação de sujidades que tenham influência no rendimento de transmissão do fluxo luminoso. No caso de estar sujeito a vapores ou a impurezas no ar, os componentes que realizam a interface com o interior do edifício, devem permitir uma fácil limpeza, sem comprometer a durabilidade global do sistema.

Na parte exterior, a cúpula deve ser realizada num material extremamente liso e apresentar uma forma geométrica que viabilize uma limpeza natural, através da água das chuvas e o vento, retirando as impurezas e partículas que prejudiquem a captação da luz. Deste modo, o sistema permite que as ações de limpeza sejam bastante esporádicas, sem colocar em causa o rendimento do sistema.

3.7 NORMAS E REGULAMENTOS APLICÁVEIS

3.7.1 NORMAS E REGULAMENTOS MAIS RELEVANTES

a) Norma EN 12464-1

Esta norma abrange a qualidade da iluminação nos postos de trabalho e o ambiente com que se relacionam diretamente. Inclui tabelas com requisitos de iluminação de acordo com o tipo de trabalho e grau de exigência de visibilidade para a tarefa [33].

Em suma, define critérios base que conduzem a uma melhor qualidade da iluminação associada a um menor consumo energético [34].

b) CIE – Comissão Internacional de Iluminação – 2001

Este órgão internacional recomenda níveis de iluminância média para iluminação interior [35].

c) Decreto-lei nº 78/2006 de 4 de Abril – Ministério da Economia e da Inovação

Este decreto-lei segue a Diretiva nº 2002/91/CE Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios, e visa a implementação de um sistema de certificação energética de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios. Esta certificação energética permite aos futuros utentes obter informação sobre os consumos de energia potenciais [36].

Em edifícios existentes, a certificação energética destina-se a proporcionar a informação sobre medidas de melhoria de desempenho, com viabilidade económica, isto é, a melhorar a qualidade do ambiente interior e reduzir as despesas energéticas [36].

Nos edifícios novos ou edifícios sujeitos a grandes reabilitações, permite comprovar a correta aplicação do RCCTE e RCESE, nomeadamente a obrigatoriedade da aplicação de sistemas de energias renováveis de elevada eficiência energética. Estes sistemas devem assegurar a qualidade do ar interior, isento de riscos para a saúde pública e potenciador do conforto e da produtividade [36].

d) **RCCTE**

Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. De modo resumido, é aplicável a edifícios de habitação, ou de serviços com menos de 1000 m² e sem mecanismos de climatização, ou com mecanismos de climatização com potência instalada igual ou inferior a 25 kW.

e) **RSECE**

Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, aplicável sumariamente a grandes edifícios, ou outros com sistemas de climatização com potência instalada superior a 25 kW.

Independentemente das características do candeeiro solar, uma vez este ser uma fonte de iluminação natural tem contato com o meio exterior e interior, e as suas contribuições térmicas devem ser tidas em conta no certificado energético de acordo com o regulamento aplicável. Isto é, têm de ser tidos em conta os ganhos e perdas térmicas para a estação de aquecimento e arrefecimento, provocados pelos candeeiros solares.

3.7.2 NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA RECOMENDADOS

De seguida apresentam-se alguns valores médios de iluminância recomendados, de acordo com a norma EN 12464-1. Os valores apresentados de iluminância são para os edifícios em que seja possível e usual a instalação dos candeeiros solares, considerando o sistema construtivo em estudo, ver Quadro 10 [10]. Neste quadro são apresentados valores médios de iluminância (Em), índice de desconforto por ofuscamento (UGR) e índice de restituição da cor (Rc) que têm de ser respeitados para determinadas áreas de edifícios.

Quadro 10 – Níveis médios de iluminância (adaptado de [34])

Tipo de Interior	Em (lux)	UGR	Rc
Gabinetes e Escritórios			
Arquivos	200	25	80
Escrita, leitura e tratamento de dados	500	19	80
Desenho técnico	750	16	80
Zonas de circulação e Áreas comuns			
Áreas de circulação e corredores	100	28	40
Salas de material e mecanismos	200	25	60
Armazéns (manipulação de mercadoria)	300	25	60

O CIE apresenta níveis recomendados para indústrias da borracha, tal como indicado no Quadro 11.

Quadro 11 – Níveis de iluminância recomendados pelo CIE (adaptado de [35])

Tipo de Interior	Em (lux)	UGR	Rc
Indústria de produtos químicos, de plásticos e da borracha			
Instalações de mínima utilização	50		20
Instalações de trabalho manual limitado	150	28	40
Zonas de trabalho constante	300	25	80
Zonas de trabalho de pormenor	500	19	80
Laboratórios	500	19	80
Inspeção de produtos	750	19	80

Em resumo, os valores de iluminância são separados em dois grandes grupos: locais de trabalho e áreas circundantes, sendo que existem níveis de iluminância variável de acordo com a atividade e qualidade da iluminação pretendida. No Quadro 12 são apresentados os valores recomendados, tendo em conta os dois tipos de áreas interiores.

Quadro 12 – Níveis de Iluminância médios (valores gerais) (adaptado de [34])

Em (lux) locais de trabalho	Em (lux) área circundante
>750	500
500	300
300	200
>200	150
Uniformidade	
$E_{min} / E_m > 0,7$	$E_{min} / E_m > 0,7$

* E_{min} – Iluminância mínima, E_m – Iluminância média.

3.8 PATOLOGIAS ASSOCIADAS E MANUTENÇÃO

Uma vez que este sistema é relativamente recente, e a sua utilização em edifícios em Portugal é ainda muito reduzida, não se encontraram referências importantes que apresentem anomalias ou patologias recorrentes associadas aos sistemas. No caso dos tubos solares sem acessórios e kits incorporados, é espectável que não haja anomalias. Deste modo, para que o rendimento seja sempre máximo, a limpeza da cúpula no exterior, ao fim de 2 até 3 anos de uso, é a manutenção fundamental do sistema.

Para um candeeiro solar com kits instalados, como lâmpadas ou sistemas de ventilação, é importante perceber que não há fugas e que os componentes estão bem instalados, de modo a garantir o adequado funcionamento do sistema construtivo. A manutenção do equipamento passa também pela igual limpeza e pela renovação de alguns componentes, lâmpadas por exemplo associadas ao gasto devido a uso corrente.

4

CASO DE ESTUDO - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

4.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de perceber a viabilidade técnico-económica dos candeeiros solares, avaliam-se e comparam-se os custos entre uma solução deste sistema construtivo e uma solução de iluminação artificial. A comparação incidiu apenas nos custos de investimento e nos custos de utilização e de manutenção, ligados à iluminação.

É fundamental entender que este estudo não evidencia todas as mais-valias dos candeeiros solares, uma vez que o conforto visual e a redução do aquecimento devido à iluminação não vão ser contabilizados. O conforto visual melhora a rentabilidade e a concentração do utilizador, enquanto a redução de aquecimento permite elevada poupança nos sistemas de climatização, fatores que adicionados às poupanças em iluminação potenciam o interesse e o sucesso deste sistema inovador.

Para elaborar este estudo, serve de caso de estudo a área de fabricação da empresa Fabor.

4.2 A EMPRESA



Fig. 50 – Fachada das Instalações da Fabor

A Fabor é uma fábrica de artefactos de borracha. Com início de atividade em 1941, os seus principais produtos são compostos de borracha, peças moldadas em borracha, revestimentos e ebonitagens de peças metálicas e poliuretano [37].

Situada na zona industrial Fontiscos de Santo Tirso, apresenta 3 unidades de fabrico, as quais exigem adequada iluminação para possibilitar o rigor e pormenores adequados dos produtos. A iluminação

torna-se ainda mais importante em ações de inspeção dos produtos, para que os produtos para venda não apresentem defeitos, e se atinja a máxima satisfação do cliente.

Para o desenvolvimento deste trabalho são abordadas as três unidades de fabricação, atualmente com uma iluminação geral assegurada por um conjunto de lâmpadas de 400 W e claraboias (zonas da cobertura translúcidas).

A área de fabricação é composta por três naves com o mesmo tipo de construção, apenas variando na profundidade e tipo de máquinas presentes no seu interior.

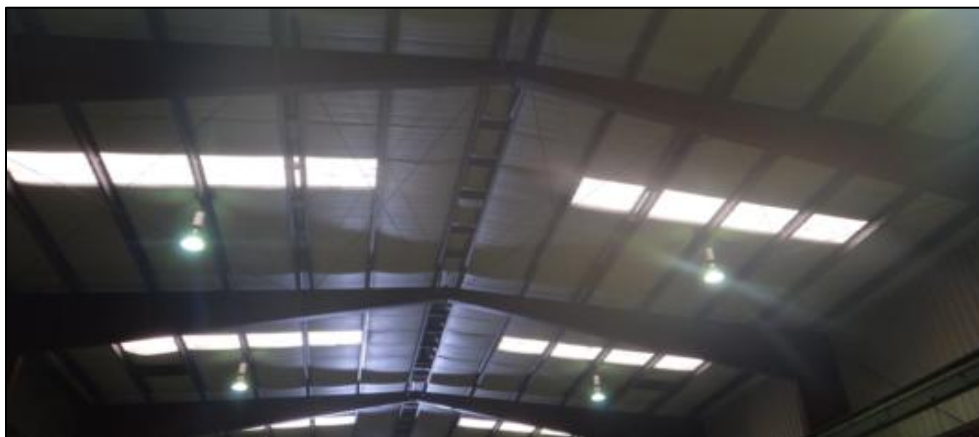


Fig. 51 – Cobertura com luminárias e claraboias

A primeira, a Recil, tem uma largura de 20 metros e 70 de comprimento, com um pé direito médio de 8,5 metros. Esta nave apresenta duas pontes rolantes que interferem na intensidade da luz, uma vez que fazem sombra para as superfícies de trabalho. A altura do edifício e as pontes rolantes, são uma condicionante pois impedem que as fontes luminosas estejam próximas das superfícies de trabalho. Esta nave tem 18 luminárias e 18 claraboias, tal como evidenciado na Fig. 52.

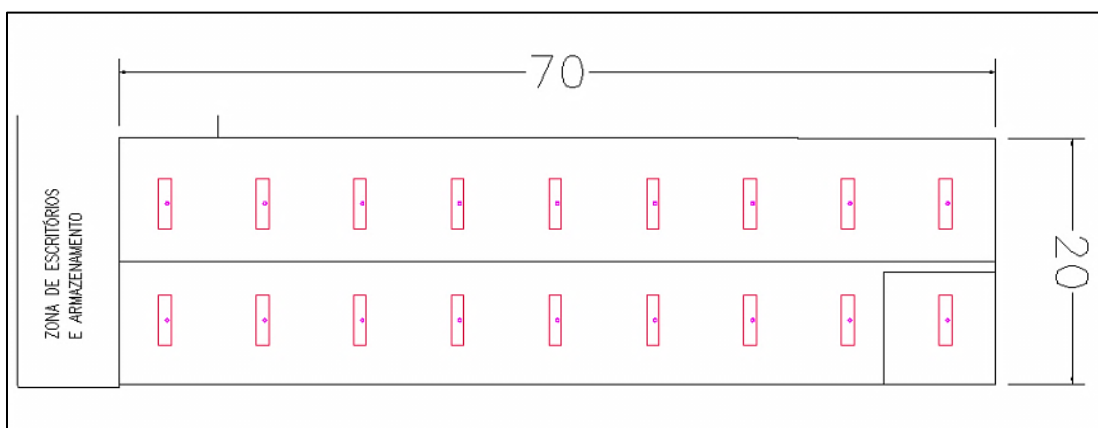


Fig. 52 – Planta da cobertura da nave Recil

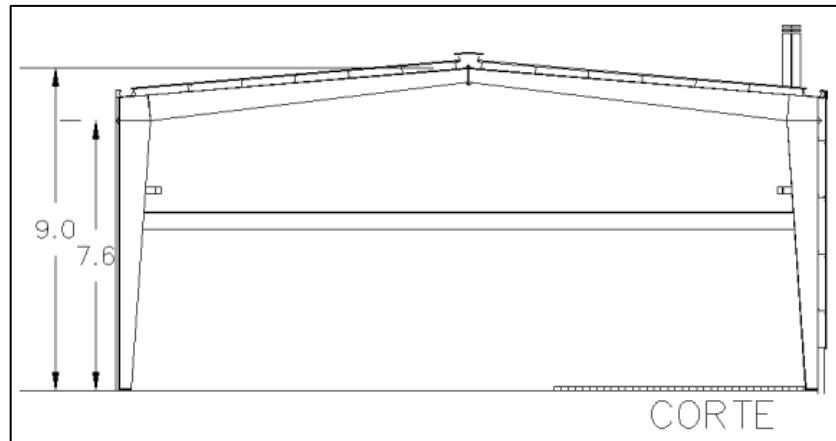


Fig. 53 – Corte da nave Recil

A segunda nave, a Fabor 1, tem a mesma largura e altura, mas um comprimento de 47 metros. Numa das extremidades, tem anexos com iluminação à parte do resto da nave. Não tem pontes rolantes, no entanto, a altura das máquinas aumenta a dificuldade do projeto de iluminação, uma vez que realizam sombra para o operador da própria máquina. Nesta nave estão presentes 10 luminárias e 12 claraboias.

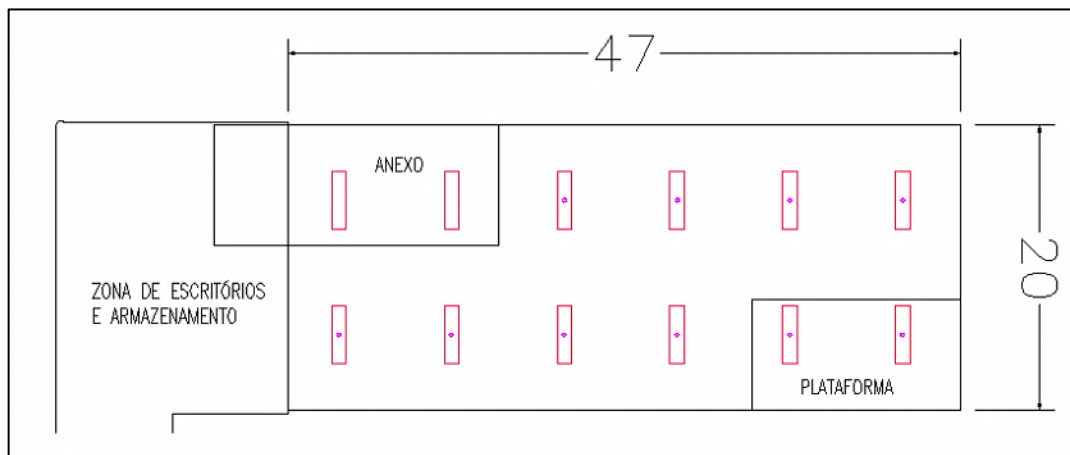


Fig. 54 – Planta da cobertura da nave Fabor 1

A terceira nave, a Fabor 2, tem um comprimento de 63 metros e com largura e altura igual às anteriores. Relativamente à iluminação geral possui apenas três lâmpadas de 400 W ligadas durante o dia, logo, as principais fontes de iluminação são as claraboias e um vão vertical, situado a meio da fachada de 20 metros do lado da plataforma (ver Fig. 55).

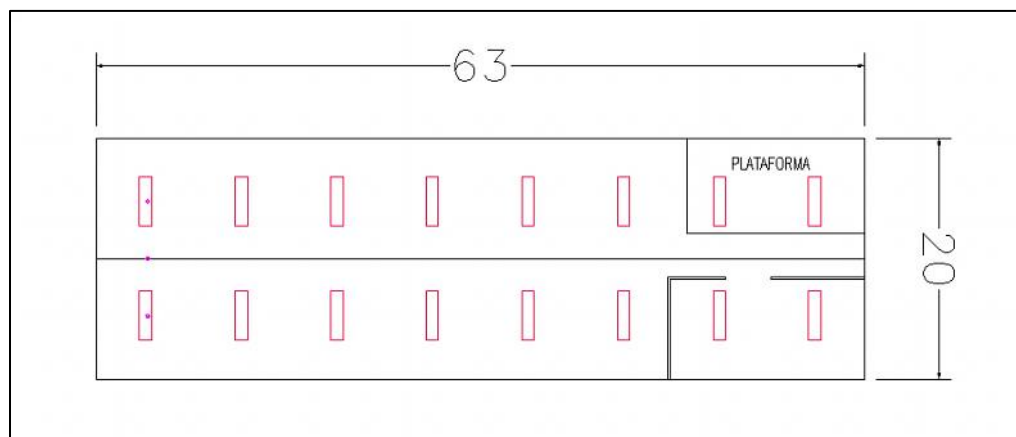


Fig. 55 – Planta da cobertura da nave da Fabor 2

A solução alternativa será com tubos solares, a funcionar sem recurso a outro tipo de iluminação exceto em situações em que a luz natural não é suficiente para garantir as exigências de iluminação. As unidades de fabricação continuarão a possuir luminárias localizadas para trabalhos de maior pormenor.

4.3 NECESSIDADES DE ILUMINAÇÃO

De acordo com a EN 12464-1, e considerando a qualidade da iluminação como fundamental, exigem-se 150 lux de luminância média para as zonas de passagem e 300 lux para áreas e superfícies de trabalho comum. Para alguns postos específicos de trabalho minucioso, devem ser garantidos 500 lux.

4.4 SITUAÇÃO ATUAL

Para uma melhor abordagem do problema, consideram-se dois tipos de iluminação distintos:

- a iluminação que é efetuada a partir da cobertura do edifício, que garante uma iluminação homogênea e distribuída em zonas de passagem e de trabalho comum;
- a iluminação localizada que é realizada com auxílio a candeeiros das próprias máquinas e luminárias direcionadas para pontos específicos de trabalho.

Neste contexto, apenas vão ser estudados e comentados valores e níveis exigenciais para o primeiro tipo de iluminação, considerando assim a parte da iluminação geral a que pode ser realizada através dos candeeiros solares.

Atualmente a nave Recil apresenta 18 candeeiros elétricos cada um de uma lâmpada de vapor de mercúrio com 400 W (com um rendimento de 36 lm/W) distribuídos uniformemente segundo duas filas ao longo do pavilhão. Na cobertura existem também claraboias (chapas translúcidas) com uma área de 6 x 1 m² em número e posição idêntica aos candeeiros elétricos.

A nave Fabor 1 apresenta duas filas de candeeiros elétricos e claraboias, uma com 6 unidades de cada fonte de iluminação e outra com 4 unidades de candeeiros elétricos e 6 unidades de claraboias.

A nave Fabor 2 tem 16 claraboias distribuídas de modo uniforme ao longo da cobertura do pavilhão e durante o dia apenas 3 unidades de candeeiros elétricos dispostos numa extremidade do pavilhão. Na

extremidade oposta, a iluminação é assegurada através de um vão vertical. No centro da nave, a iluminação é bastante reduzida.

Tendo em conta as três naves, existem 31 lâmpadas deste tipo ligadas durante o dia, as quais consomem 12400 W, se for admitido um período de trabalho de 8h por dia, durante 255 dias o que, com um preço da energia igual a 12,34 cêntimos por kWh, ao fim de um ano, custa 3350 euros.

Quanto às fontes de iluminação natural, constatou-se o baixo rendimento provocado pela facilidade de acumulação de partículas. As claraboias apresentam-se bastante sujas, emitindo uma luz de cor amarela (baixo índice de restituição de cor), o que gera consequências relevantes na iluminação global.

É importante salientar que, para além do fator custo de exploração as lâmpadas duram em média 1 ano e não garantem os níveis mínimos de iluminação em todo o espaço dos pavilhões.

A Fig. 57 demonstra os níveis atuais de iluminância para as naves estudadas. As medições foram efetuadas durante a tarde de um dia de céu nublado, com apoio do técnico da empresa SOPSEC José Amorim. O equipamento utilizado nas medições foi um luxímetro digital, 20 – 200.00 LUX-204 Equitherm (Fig. 56) [38]. Este equipamento permite medir a iluminância em vários pontos de uma superfície para se encontrarem os valores de iluminância média dessa mesma superfície.



Fig. 56 – Luxímetro [38]

Curiosamente foi medido a iluminância no exterior para três situações:

- Céu nublado com obstáculos a realizar sombra – 1350 lux;
- Céu nublado sem obstáculos – 2600 lux;
- Céu pouco nublado, com aberturas e o Sol incidente – 71000 lux.

Estes resultados comprovam a importância do tipo de céu em sistemas de iluminação natural, e valorizam a potencialidade dos candeeiros solares em países da Europa do Sul, comparando com outros países mais desenvolvidos, onde este sistema construtivo é bastante mais estudado e utilizado.

Como se pode constatar, e comparando os valores medidos com os mencionados no ponto de necessidades de iluminação, a fábrica apresenta défices de iluminação em vários locais de trabalho. A Fig. 57 revela os níveis de iluminância da fábrica da Fabor, para locais passagem e trabalhos comuns. Relembrando que os valores mínimos devem ser de 150 lux para locais de trabalho, e de 300 lux para trabalho comum, os valores observados evidenciam a fraca luminosidade presente em consideráveis zonas destas naves.

A Fig. 57 apresenta as três naves (Fabor 2, Fabor 1 e Recil respectivamente), onde os retângulos vermelhos representam a posição das claraboias, os pontos cor-de-rosa as lâmpadas de 400 W, e as outras cores, os níveis de iluminação atual.

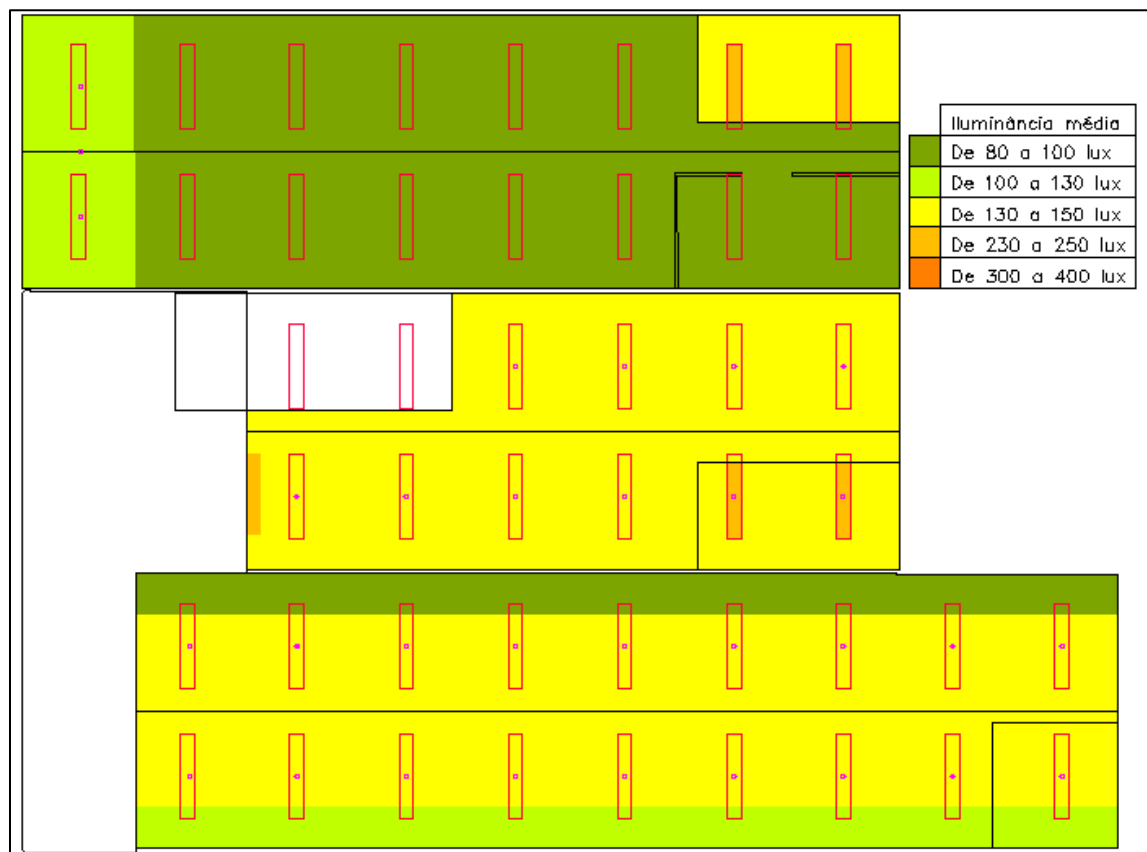


Fig. 57 – Medições de iluminância na área de fabricação para zonas de iluminação geral

É de constatar que a nave Fabor 2 embora apresente uma fila de lâmpadas no seu comprimento, estas estão desligadas, estando ligadas apenas três, numa extremidade tal como indica a figura. A maior parte desta nave serve de armazém, no qual o empilhador é o único que realiza atividade. A zona das máquinas, e por isso de trabalho de maior atenção, tem melhor iluminação devido a luminárias direcionadas.

Durante as medições, verificou-se a influência da cor e textura das superfícies. Para locais de igual distância às fontes de luz, havia diferenças de 20 a 30 lux entre zonas rodeadas por superfícies de cor escura e textura rugosa, e superfícies de cor média e textura lisa.

Num dado período sentiu-se a incidência da luz direta do Sol provocada por uma abertura do céu nublado. Este fenómeno gerou um aumento instantâneo dos valores de iluminância em cerca de 50 lux. Deste modo, foi possível entender qual o contributo da luz natural, influenciada pelas condições climáticas instantâneas.

Na globalidade do caso de estudo verificou-se que as claraboias estão bastante sujas, o que prejudica o seu rendimento, não só na intensidade da luz emitida (baixa), mas também na qualidade (cor amarela).

Os pavilhões apresentam maioritariamente superfícies de claridade baixa, o que não beneficia a reflexão da luz no seu interior. Por ser uma unidade fabril, existem várias máquinas ao longo do edifício, relativamente altas, que interferem na qualidade da luz por realizarem sombras sobre os operadores de máquinas no local de trabalho.

Dado o tipo de trabalho realizado, é importante ter em conta as impurezas emitidas pelas máquinas, pois contribuem para a sujidade das chapas translúcidas (perda de transmissão da luz natural), das superfícies envolventes (reduzindo a reflexão da luz) e do próprio ar (prejudicando o fluxo luminoso).

Em locais de trabalho que exigem maior pormenor a iluminação é reforçada, uma vez que as próprias máquinas possuem um candeeiro móvel, ou caso contrário existem luminárias mais próximas e direcionadas para a superfície de trabalho melhorando assim os níveis de iluminação.

As naves têm sistemas de renovação do ar para garantir a qualidade do ar interior, no entanto, este sistema não funciona como sistema de climatização. Segundo testemunhos, durante o verão, a temperatura exterior, o calor transmitido pelas claraboias e o calor produzido pelas máquinas fazem aumentar muito a temperatura interior, prejudicando o conforto interior. Este é um aspeto a ter em atenção em reabilitações futuras.

Considerando todos estes fatores, é espetável que num período inicial, no qual as claraboias apresentavam o seu rendimento máximo e todas as superfícies do edifício estavam limpas, em alturas de Céu limpo com Sol incidente, os níveis de iluminância média interior garantiam os valores mínimos recomendados para a iluminação geral de trabalho comum e áreas circundantes. Contudo, para outros tipos de Céu, com a acumulação de partículas no meio interior, e a perda de desempenho das claraboias, a iluminância deixou de respeitar os níveis mínimos recomendados.

5

CASO DE ESTUDO - PROJETO DE MELHORIA DA ILUMINAÇÃO COM CANDEEIROS SOLARES

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como a iluminação natural não é constante devido aos fenómenos atmosféricos, não é racional optar-se por este tipo de iluminação em locais que exijam elevados níveis de iluminância. Por este motivo, existe uma iluminação localizada, realizada com auxílio a candeeiros das próprias máquinas e luminárias direcionadas para pontos específicos de trabalho. A iluminação que é efetuada a partir da cobertura do edifício, a qual garante uma iluminação homogénea e distribuída em zonas de passagem e de trabalho comum, foi considerada para objeto de estudo com a incorporação dos candeeiros solares.

O projeto de iluminação com candeeiros solares tem dois aspetos essenciais: o primeiro e mais importante, é garantir níveis adequados de iluminação de acordo com as tarefas a realizar e respetivos espaços circundantes; o segundo é substituir as atuais fontes de iluminação geral:

- os candeeiros elétricos (parcialmente), para que esta nova solução faça sentido, principalmente a nível económico, pois vai permitir a redução do custo energético;
- as claraboias (definitivamente), para melhorar a intensidade e qualidade da luz projetada, reduzindo consideravelmente a temperatura interior, durante a estação de arrefecimento.

A comparação entre o calor produzido pelas claraboias e candeeiros elétricos com os candeeiros solares não foi aprofundado de modo exaustivo. Contudo, uma vez que este sistema inovador apresenta um coeficiente de transmissão térmica bastante baixo, o fator calor foi tido em conta no projeto (anulando as claraboias).

Este sistema construtivo não dá resposta às exigências de iluminação durante todo o período do ano e do dia. Isto significa que será necessário recorrer à iluminação artificial como complemento da iluminação natural. Deste modo, os candeeiros elétricos devem ser conservados, pois serão acionados nos períodos em que a iluminação natural seja insuficiente.

A distribuição das luminárias elétricas será a mesma que a situação inicial, uma vez que estão uniformemente distribuídas sobre as zonas de trabalho e passagem, e esta medida permite ainda evitar o aumento do investimento deste projeto.

Qualquer projeto de edificios deve estar em sintonia com os restantes projetos, como tal, o projeto de iluminação tem de ser pensado para melhorar a qualidade e conforto global do edifício.

Neste capítulo apresenta-se um método de cálculo para prever a iluminação que este sistema construtivo é capaz de projetar, em função de vários parâmetros. Este estudo permite estimar o período de tempo em que os candeeiros solares transmitem determinados níveis de iluminância para a área fabril da empresa Fabor. A iluminação natural é complementada pela iluminação elétrica sempre que necessário para garantir os níveis adequados de iluminação.

5.2 PREVISÃO DA ILUMINÂNCIA MÉDIA

O novo sistema de iluminação a incorporar na área da fábrica deve responder às exigências consoante o tipo de atividade a realizar em cada lugar. Deste modo, seguem-se os níveis mínimos de iluminância média a considerar em cada atividade:

- 150 lux – em locais de passagem e de movimentação de materiais com empilhador (Fabor 2);
- 150 lux – em locais de passagem tendo em conta pontes rolantes e máquinas altas que possam prejudicar a projeção da luz (Fabor 1 e Recil);
- 300 lux – trabalho comum e trabalho de algum pormenor (Recil)

Todos os pontos de trabalho em mesa e/ou em máquina que exijam iluminação de qualidade superior, devem ser reforçados com luminárias localizadas. Atualmente estas luminárias localizadas e direcionadas para locais específicos de trabalho de pormenor já existem, contudo é importante rever e atualizar possíveis situações de baixa qualidade.

Uma vez que a iluminância que se pretende atingir no interior é o ponto de partida deste projeto, a Fig. 58 representa estes valores de iluminância a alcançar com o novo sistema de iluminação, quer com os candeeiros solares a funcionar isoladamente, quer com o apoio das fontes de luz elétrica.

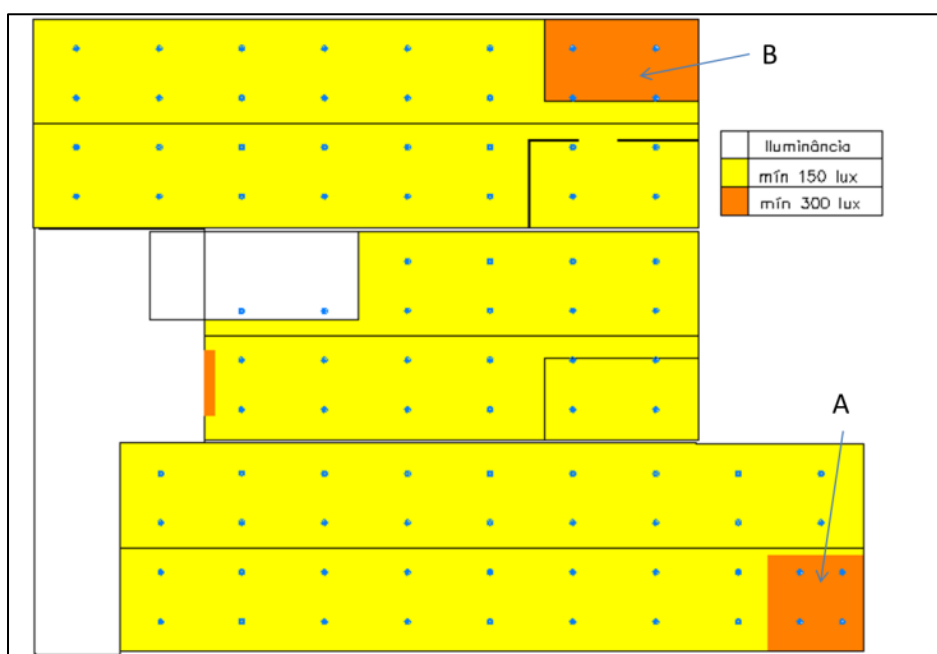


Fig. 58 – Iluminância mínima prevista com o novo sistema de iluminação geral

Em suma, o objetivo deste projeto de iluminação é garantir um mínimo de 150 lux de iluminância em todas as zonas de trabalho comum e de passagem, nas quais o complemento de luminárias

direcionadas e candeeiros de máquinas é suficiente para garantir níveis adequados nos locais de trabalho. Estes níveis são apresentados a amarelo na Fig. 58. A cor-de-laranja estão representadas áreas em que o objetivo é garantir 300 lux de iluminância. A “secção A” é uma área de trabalho com algum pormenor, e por isso a iluminação tem de ser maior que nos outros locais de trabalho comuns. A “secção B” está sob uma plataforma, e por isso, mais perto da cobertura (com um pé direito de cerca de 4 metros), o que permite maiores índices de iluminação. Por ser uma zona de trabalho cuidado, já existem luminárias localizadas que contribuem para a obtenção de adequados níveis de iluminância.

5.3 PROJETO COM CANDEEIROS SOLARES

Os candeeiros solares só realizam a sua função caso sejam colocados num elemento construtivo, ou elementos construtivos que realizem a separação do meio exterior com o meio interior. Por esta razão este dimensionamento e distribuição foram pensados apenas para locais que possam ser iluminados através da cobertura, excluindo assim a iluminação de locais com teto e plataformas intermédias e locais de níveis de iluminação muito elevados, sendo estes auxiliados por luminárias já existentes.

O projeto de iluminação deve garantir os valores mínimos de iluminância em todas as superfícies de trabalho, independentemente da posição dos objetos existentes. Deste modo, as superfícies de trabalho têm de ser iluminadas por mais que uma fonte para evitar que ocorram sombras.

5.3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DO SISTEMA CONSTRUTIVO A UTILIZAR

O modelo de candeeiros solares escolhido para este projeto de iluminação foi o tubo solar da Solatube, de 530 mm de diâmetro, com uma cúpula do tipo 750 DS, sem qualquer tipo de acessório incorporado. A escolha de um produto da Solatube teve em conta a quantidade de informação disponível.

Por ser um edifício do tipo industrial, com uma área e um pé direito consideráveis, o tubo utilizado deve ser o de maior diâmetro, para aumentar a quantidade de fluxo luminoso transmitido ao interior. A cúpula 750 DS, permite maior captação da luz solar, principalmente quando o Sol está mais inclinado. De acordo com o fornecedor, a sua superfície efetiva de captação é igual a 4838 cm². Por isso, as características possibilitam maior transmissão de luz e de forma mais homogênea ao longo do dia.

O comprimento do tubo baixa o rendimento do sistema (embora de forma pouco significativa), mas por outro lado melhora a distribuição da luz projetada no interior. Para edifícios com as características desta fábrica, o comprimento mínimo aconselhado é de 1,5 metros.

Quadro 13 – Modelo de candeeiros solares a aplicar nas coberturas da fábrica

Nave	Modelo da cúpula	Comprimento do tubo	Tipo de difusor
Recil	750 DS	1,5 e 2 metros	Vusion
Fabor 1 e 2	750 DS	2 metros	Vusion

Na nave Recil, o comprimento dos tubos vai ser metade de 1,5 m e a outra metade de 2 m, por causa das pontes rolantes, e para as restantes naves, o comprimento será sempre de 2 m, para a base do sistema estar mais próximo das superfícies de trabalho e conseguir um bom rendimento, aliado a uma adequada distribuição da luz nas superfícies de trabalho e áreas circundantes.

5.3.2 CÁLCULO DO DESEMPENHO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

Para uma estimativa credível da iluminância nas superfícies de trabalho e áreas circundantes, consoante o número de candeeiros solares, utilizou-se o método apresentado pelos investigadores Valerio Lo Verso et al. [32]. Como já foi referido, este método fornece valores de iluminância para uma dada situação, dependendo de fatores climáticos e dos rendimentos de cada componente do sistema construtivo.

O estudo realizado permite estimar o número de horas diárias, e posteriormente, qual a percentagem do ano que os candeeiros solares conseguem garantir um dado nível de iluminância. De seguida é explicado como se usam os dados disponíveis e se calculam todos os parâmetros incluídos no método.

Inicialmente, determinou-se o desempenho de um candeeiro solar. Tal como indicado na equação (3.6) o rendimento global do sistema é a multiplicação do rendimento da cúpula, do tubo e do difusor.

O rendimento de captação da cúpula tem em conta o ângulo do Sol com a horizontal e o tipo de Céu. Com o recurso a cartas solares do Porto [38] e aos gráficos inclinação do sol/rendimento presentes no artigo dos investigadores Valerio Lo Verso et al. [32], foram estimados os rendimentos horários de uma cúpula do tipo 750 DS, para 4 dias médios de cada estação do ano com a previsão da probabilidade do tipo de Céu.

Quadro 14 – Inclinação do Sol em função do horário diurno e da altura do ano (adaptado de [38])

Horas	Inverno (4 fev)	Primavera (5 mai)	Verão (6 ago)	Outono (5 nov)
	α (°)	α (°)	α (°)	α (°)
8	12	32	32	12
9	22	44	44	22
10	28	59	59	28
11	34	62	62	34
12	36	66	66	36
13	34	62	62	34
14	28	59	59	28
15	22	44	44	22
16	12	32	32	12
17	3	21	21	3
18	0	10	10	0

O Quadro 14 apresenta a inclinação solar para os dias médios de cada estação do ano, os quais representam melhor as características de cada estação. Como se pode verificar, os dias médios da estação outono e da estação inverno apresentam igual inclinação do Sol para a mesma altura do dia, e o mesmo se verifica entre as estações primavera e verão. Esta coincidência origina os mesmos valores de iluminâncias para os pares de estações referidos, uma vez que a probabilidade de se verificar um tipo de céu é considerada igual para todas as estações. Os valores foram determinados através da Carta

Solar do Porto, por isso, para uma nova situação num local distante da região do Porto será necessário encontrar novos valores da inclinação solar. Destes valores apresentados foi retirado a hora de almoço, e considerou-se o horário de trabalho equivalente ao horário diurno mais vantajoso, ou seja, das 8h da manhã até às 13h e de tarde, das 14h às 17h, cumprindo as 8 horas de trabalho.

Para completar a estimativa do rendimento da cúpula, foram utilizados gráficos presentes no artigo mencionado anteriormente, que realizou ensaios com este tipo de cúpula, confrontando os valores obtidos com o antigo modelo de cúpula 330 DS. A Fig. 59 apresenta uma compilação dos dados interessantes do artigo para este projeto [32]. Todos estes valores são para uma situação onde não existem objetos que originem sombras ao sistema. A fábrica enquadra-se nestas condições uma vez que não existem edifícios circundantes significativamente mais altos.

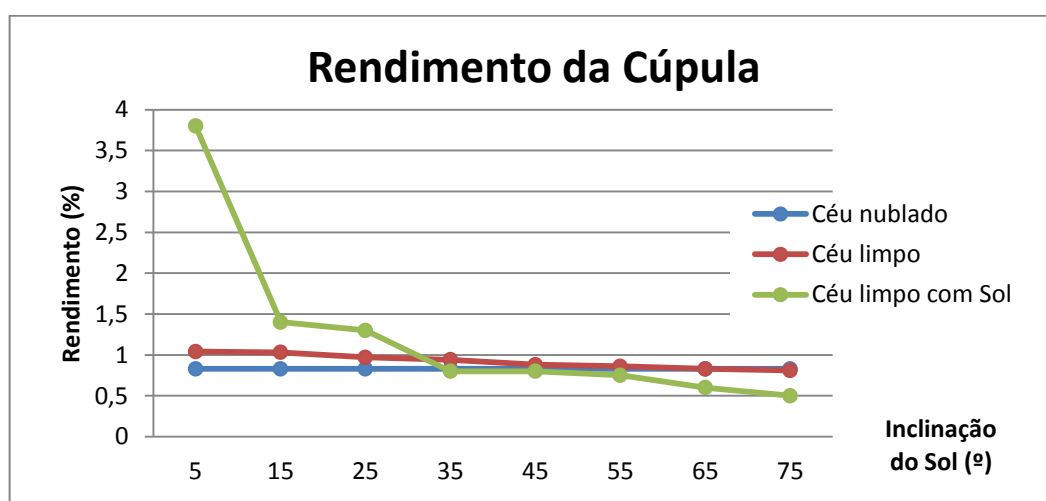


Fig. 59 – Rendimento da Cúpula 750 DS (adaptado de [32])

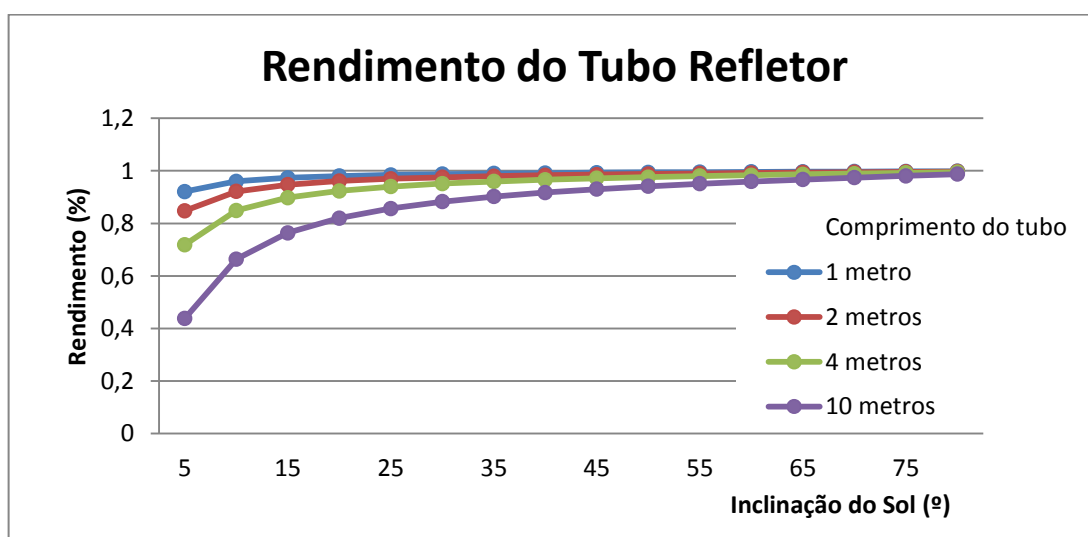


Fig. 60 – Rendimento do tubo, segundo a equação (3.9)

O rendimento do tubo refletor depende da reflexão da superfície interior e do número de reflexões que são realizadas até que o fluxo luminoso chegue ao difusor.

O número de reflexões aumenta com o comprimento e a inclinação do sol. Logo, para um tubo de 2 metros, temos um rendimento que varia durante o dia como se visualiza a vermelho na Fig. 60. Nos cálculos realizados, foi considerada apenas a equação (3.9), adequada para céu limpo, uma vez que apresenta sempre valores inferiores à equação correspondente ao céu nublado. Tendo em conta que os valores são muito próximos para uma e outra equação, realizando o cálculo com a primeira, o dimensionamento é efetuado de modo conservativo.

O rendimento de transmissão do difusor é dado pela equação (3.11) e representa uma parcela difícil de estimar pela falta de dados. Por essa razão e tendo em conta que o difusor apenas “espalha” e difunde o fluxo luminoso, as perdas são mínimas, logo o rendimento do difusor foi considerado igual a 0,95.

Para se determinar a iluminância interior, é essencial saber qual a iluminância disponível no exterior, a qual foi estimada segundo um gráfico de iluminância referente à Bélgica. Embora não seja totalmente exato por ser proveniente de um país diferente, permite estimar valores, com algum fator de segurança. Este gráfico encontra-se em anexo na secção de dados climáticos. Em Portugal a percentagem de Céu nublado é cerca de 40%, logo para a realização dos cálculos foi admitido que em 40% das situações o céu está nublado, em 10% está céu limpo e em 50% o céu está limpo e verifica-se a incidência solar neste sistema construtivo. Uma vez que a captação da luz natural é realizada de forma zenital, sem obstáculos circundantes, estando o céu limpo, o Sol estará quase sempre incidente no órgão de captação. Estes 10% que são admitidos apenas como céu limpo permitem estabelecer nos cálculos um coeficiente bastante conservativo.

Resta referir que existe um gráfico de iluminâncias recomendado pela CIE 173:2006, contudo, demasiado conservativo para ser considerado num país da Europa do Sul, e mais especificamente neste estudo [40].

A iluminância interior é dada pela equação (3.12), e para além dos parâmetros indicados em cima, tem em conta o número de candeeiros solares, a sua área de captação, o fator de utilização e a área a iluminar.

Para ser possível realizar os cálculos e atribuir as devidas exigências de iluminação para cada local de trabalho e áreas circundantes, a zona de intervenção foi dividida em 4 partes. A nave da Recil foi dividida em 2 áreas de iluminação, uma com 300 lux de iluminância média e outra para 150 lux. As outras 2 zonas de estudo são as outras 2 naves (Fabor 1 e 2).

Com esta definição de espaços, é possível determinar os valores dos fatores de utilização, dependendo das características de cada local, tal como é indicado no Quadro 15.

Quadro 15 – Determinação do fator de utilização para cada zona de estudo

Fator de utilização (UF)								
	a (m)	b (m)	A (m ²)	h (m)	K	R paredes	R médio	UF
Recil*	9	9	81	6,6	0,7	0,7	0,3	0,67
Recil	20	70	1319	6,6	2,2	0,3	0,3	0,87
Fabor 1	20	47	819	6,2	2,0	0,3	0,3	0,87
Fabor 2	20	62,7	1254	6,2	2,5	0,3	0,3	0,89
Tem por base a tabela do Fator de Utilização em anexo								

Como se pode constatar, o UF (definido no ponto 5.2 do capítulo 3) depende da geometria do espaço e do tipo de reflexão que as superfícies que o constituem apresentam [39]. Na primeira zona optou-se por um valor de reflexão das paredes superior, uma vez que, 2 das fronteiras verticais (metade) deste espaço são com um espaço adjacente que também é iluminado, embora com menos intensidade. Esta opção foi tomada assim para compensar esta circunstância.

Depois de serem apresentados todos os parâmetros envolvidos neste método, resta apresentar valores para as 4 áreas de estudo distintas. O valor produzido por este cálculo e apresentado nas tabelas, não refere o tempo em que o sistema funciona isoladamente, mas sim a percentagem de iluminação que produz durante um ano. Consideram-se assim situações em que o sistema funciona isoladamente (100%), quando funciona a 75%, a 50% e a 25% da iluminação total exigida.

Para uma melhor leitura dos gráficos abaixo apresentados (figuras 61 a 64), foram adotadas as seguintes formas de diferenciação: o verde corresponde aos valores estimados de iluminância para as estações de primavera e verão, enquanto que o roxo corresponde ao outono e inverno; a traço contínuo são ilustrados os valores para Céu limpo com Sol incidente, a traço interrompido apresentam-se valores para Céu limpo e a traço-ponto-traço destacam-se valores de iluminância média estimada para Céu nublado.

a) Superfície de Trabalho 1 – nave Recil

Dados:

A_{wp} – Área da superfície a iluminar: $9 \times 9 = 81 \text{ m}^2$

A_{TLGS} – Área de captação = 4838 cm^2

L – comprimento do tubo = 1,5 m

D – diâmetro do tubo = 0,53 m

N – número de tubos solares = 4

UF – fator de utilização = 0,67

η_{TLGS} – rendimento global do sistema = $\eta_{cúpula} \times \eta_{tubo} \times 0,95$, em que $\eta_{cúpula}$ e η_{tubo} variam com a inclinação do sol.

$E_{g,out}$ – Iluminância no exterior, é variável em função do tipo de Céu, altura do ano e hora do dia.

E_{wp} – Iluminância na superfície de trabalho = 300 lux (valor pretendido)

A Fig. 61 demonstra os níveis de iluminância previstas com a implementação dos candeeiros solares, tendo em conta o tipo de Céu. Pode verificar-se que em momentos de Sol incidente, o sistema não só garante os níveis mínimos, como proporciona uma iluminação de qualidade superior, podendo ultrapassar os 500 lux em várias alturas do ano. No que diz respeito a momentos do dia em que o Sol não está incidente sobre a cúpula verifica-se uma diminuição significativa da capacidade de iluminação, não garantindo os níveis pretendidos. Apesar disso, os candeeiros solares desempenham ainda assim um papel importante na redução da necessidade da luz elétrica para períodos de Céu nublado, podendo a última estar a funcionar a 50% da sua potência.

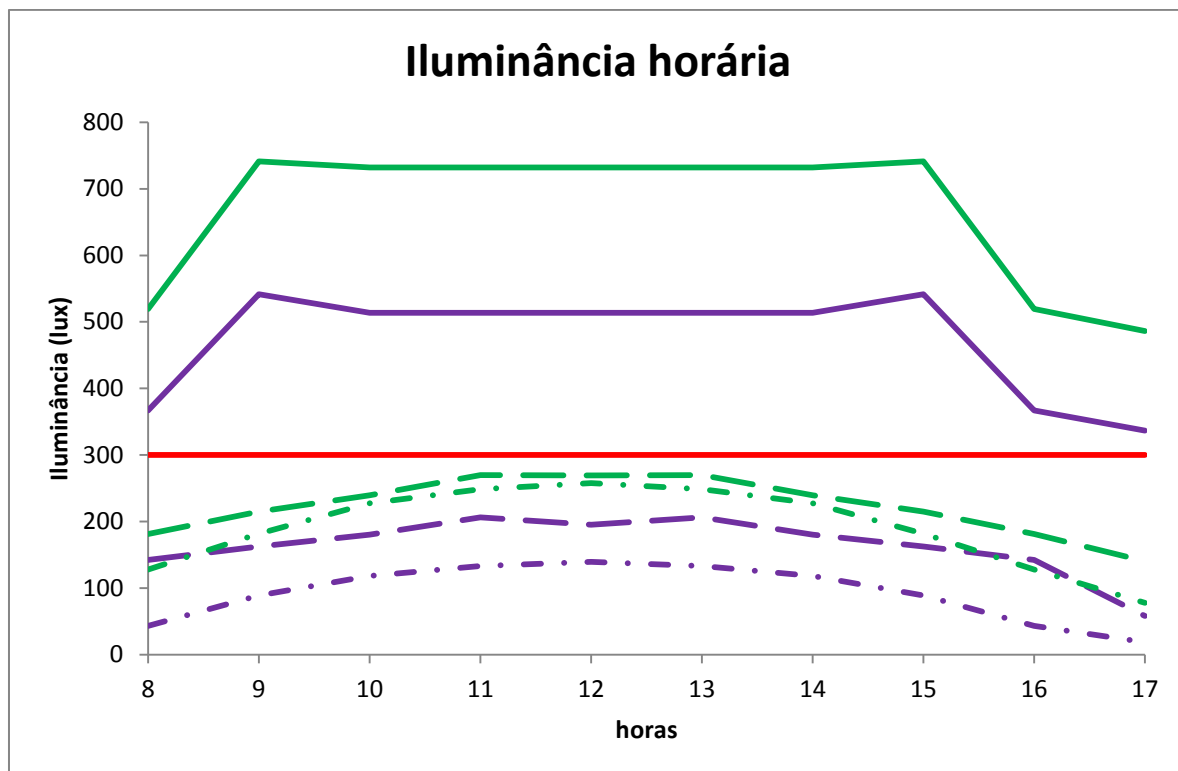


Fig. 61 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 1

O valor alcançado (ver Quadro 16) reflete a percentagem de iluminância que os candeeiros solares transmitem em relação à iluminação total pretendida durante um ano. Este valor permite gerar o valor de “apoio” ($100 - 70 = 30$, em percentagem) de iluminação artificial para obter a iluminância mínima pretendida em todo o período de trabalho.

Quadro 16 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 1)

Número de horas para uma percentagem de iluminância pretendida					
Estação do ano	Tipo de Céu	25%	50%	75%	100%
Inverno	nublado	6	0	0	0
	limpo	8	6	0	0
	com Sol	8	8	8	8
Primavera	nublado	8	6	4	0
	limpo	8	8	5	0
	com Sol	8	8	8	8
Verão	nublado	8	6	4	0
	limpo	8	8	5	0
	com Sol	8	8	8	8
Outono	nublado	6	0	0	0
	limpo	8	6	0	0
	com Sol	8	8	8	8
Iluminação pretendida ao longo do ano (em %)					70,47

b) Superfície de Trabalho 2 – nave Fabor 1

Dados:

A_{wp} – Área da superfície a iluminar: $47 \times 20 - 14,6 \times 8,3 = 819 \text{ m}^2$

A_{TLGS} – Área de captação = 4838 cm^2

L – comprimento do tubo = 2 m

D – diâmetro do tubo = 0,53 m

N – número de tubos solares = 22

UF – fator de utilização = 0,87

η_{TLGS} – rendimento global do sistema = $\eta_{cúpula} \times \eta_{tubo} \times 0,95$, em que $\eta_{cúpula}$ e η_{tubo} variam com a inclinação do sol.

$E_{g,out}$ – Iluminância disponível no exterior, também é variável em função do tipo de Céu, altura do ano e hora do dia.

E_{wp} – Iluminância na superfície de trabalho = 150 lux (valor pretendido)

Como se pode verificar no gráfico respetivo à Fig. 62, na Fabor 1, os níveis de iluminância são atingidos num número elevado de horas do ano.

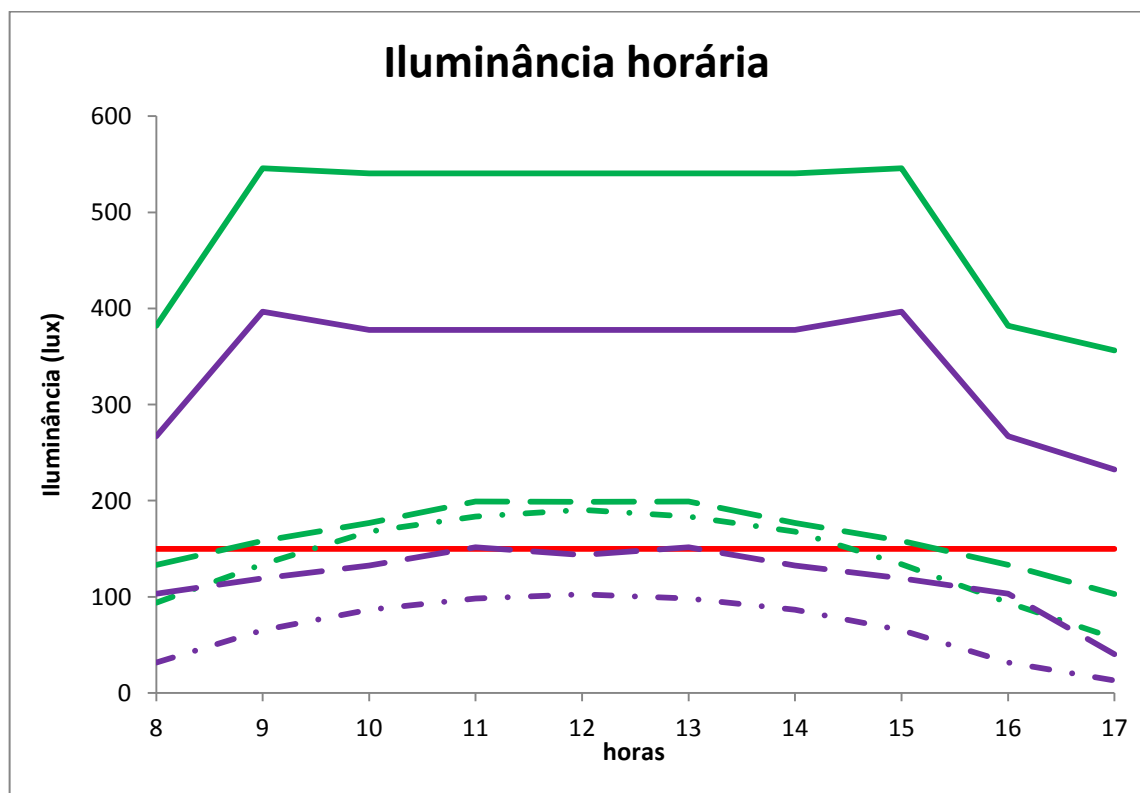


Fig. 62 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 2

Durante as estações onde os dias são maiores, quando o Sol está incidente os níveis mínimos são largamente ultrapassados independentemente da hora do dia, produzindo em algumas alturas, níveis de iluminação muito favoráveis ao máximo conforto visual e rendimento dos trabalhadores. Em momentos de Céu limpo e Céu nublado, os 150 lux pretendidos são conseguidos apenas em parte das horas de trabalho, sendo necessário o apoio de iluminação artificial nas primeiras e ultimas horas do dia.

Nas estações de outono e inverno, a necessidade de apoio da iluminação artificial aumenta, para ser possível atingir os níveis mínimos recomendados.

Quadro 17 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 2)

Número de horas para uma percentagem de iluminância pretendida					
Estação do ano	Tipo de Céu	25%	50%	75%	100%
Inverno	nublado	6	4	0	0
	limpo	8	8	6	1
	com Sol	8	8	8	8
Primavera	nublado	8	8	6	4
	limpo	8	8	8	7
	com Sol	8	8	8	8
Verão	nublado	8	8	6	4
	limpo	8	8	8	7
	com Sol	8	8	8	8
Outono	nublado	6	4	0	0
	limpo	8	8	6	1
	com Sol	8	8	8	8
Iluminação pretendida ao longo do ano (em %)					80,94

Nesta segunda fase constata-se que o número de candeeiros solares em relação à área a iluminar foi reduzido. No entanto, as exigências de iluminação também foram reduzidas, devido ao tipo de uso da área a iluminar, pelo que esta solução apresenta um valor de 81% da iluminação total necessária. O reforço efetuado por iluminação elétrica é inferior em tempo ao da situação 1.

c) Superfície de Trabalho 3 – nave Recil

Dados:

A_{wp} – Área da superfície a iluminar: $70 \times 20 - 9 \times 9 = 1319 \text{ m}^2$

A_{TLGS} – Área de captação = 4838 cm^2

L – comprimento do tubo = $1,5 \text{ m}$

D – diâmetro do tubo = $0,53 \text{ m}$

N – número de tubos solares = 34

UF – fator de utilização = $0,87$

η_{TLGS} – rendimento global do sistema = $\eta_{cúpula} \times \eta_{tubo} \times 0,95$, em que $\eta_{cúpula}$ e η_{tubo} variam com a inclinação do sol.

$E_{g,out}$ – Iluminância disponível no exterior, também é variável em função do tipo de Céu, altura do ano e hora do dia.

E_{wp} – Iluminância na superfície de trabalho = 150 lux (valor pretendido)

A par da superfície de trabalho 2, a nave Recil apresenta um nível mínimo de iluminância igual a 150 lux , para uma mesma distribuição dos candeeiros solares. Por este motivo, os valores que a Fig. 63 ilustra são relativamente idênticos aos da solução da nave Fabor 1.

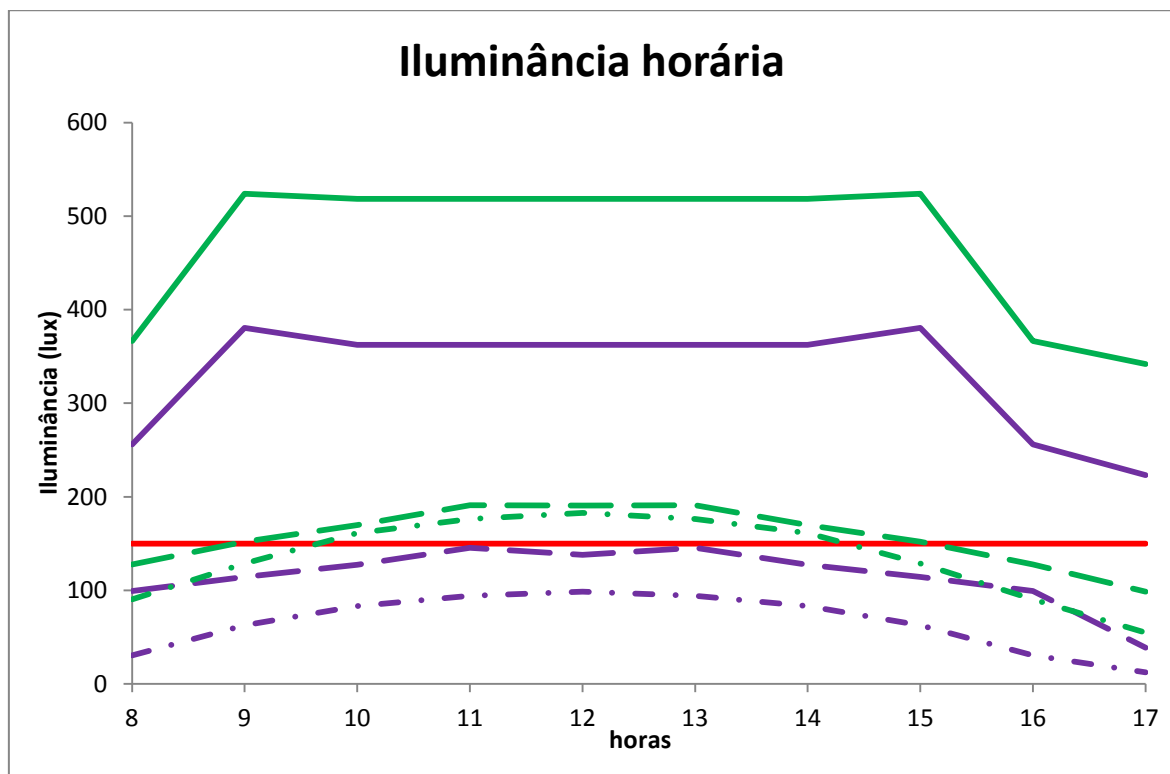


Fig. 63 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 3

Nesta segunda zona de iluminação da nave Recil é esperado que os candeeiros solares realizem cerca de 81% da iluminação total necessária para garantir os níveis adequados face às atividades realizadas no local.

Quadro 18 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 3)

Número de horas para uma percentagem de iluminação pretendida					
Estação do ano	Tipo de Céu	25%	50%	75%	100%
Inverno	nublado	6	4	0	0
	limpo	8	8	6	0
	com Sol	8	8	8	8
Primavera	nublado	8	8	6	4
	limpo	8	8	8	6
	com Sol	8	8	8	8
Verão	nublado	8	8	6	4
	limpo	8	8	8	6
	com Sol	8	8	8	8
Outono	nublado	6	4	0	0
	limpo	8	8	6	0
	com Sol	8	8	8	8
Iluminação pretendida ao longo do ano (em %)					80,63

d) Superfície de Trabalho 4 – nave Fabor 2

Dados:

A_{wp} – Área da superfície a iluminar: $62,7 \times 20 = 1254 \text{ m}^2$

A_{TLGS} – Área de captação = 4838 cm^2

L – comprimento do tubo = 2 m

D – diâmetro do tubo = $0,53 \text{ m}$

N – número de tubos solares = 32

UF – fator de utilização = $0,89$

η_{TLGS} – rendimento global do sistema = $\eta_{cúpula} \times \eta_{tubo} \times 0,95$, em que $\eta_{cúpula}$ e η_{tubo} variam com a inclinação do sol.

$E_{g,out}$ – Iluminância disponível no exterior, também é variável em função do tipo de Céu, altura do ano e hora do dia.

E_{wp} – Iluminância na superfície de trabalho = 150 lux (valor pretendido)

Tal como nas situações anteriormente descritas, na nave Fabor 2, verifica-se a necessidade de apoio de iluminação elétrica nas estações de outono e inverno, para alturas de céu encoberto e céu limpo sem sol. Salvo esta exceção, na maior parte do tempo, estima-se que a iluminância esteja acima dos 350

lux, o que representa uma qualidade de iluminação bastante apreciável para a realização das atividades presentes nesta nave. Na Fig. 64 é perceptível a intensidade luminosa disponível no exterior nas estações de primavera e verão, face às estações de outono e inverno. O maior número de horas com sol, e uma posição do Sol mais vertical permitem atingir maiores máximos e patamares de níveis de iluminância mais prolongados.

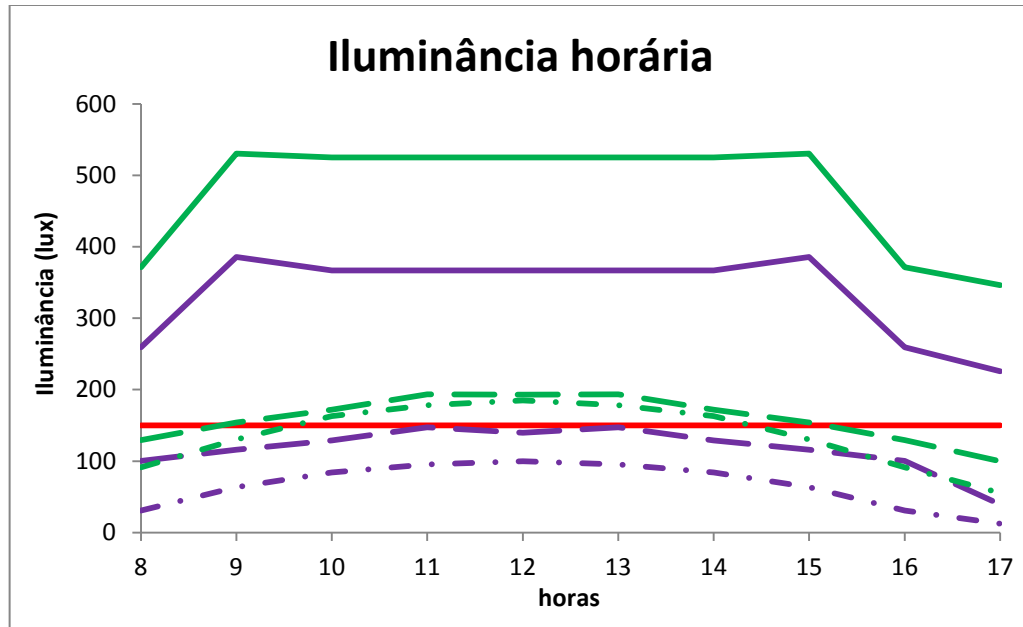


Fig. 64 – Estimativa anual da iluminância correspondente à zona da fase 4

Quadro 19 – Resposta do sistema às necessidades de iluminação (Superfície de trabalho 4)

Número de horas para uma percentagem de iluminação pretendida					
Estação do ano	Tipo de Céu	25%	50%	75%	100%
Inverno	nublado	6	4	0	0
	limpo	8	8	6	0
	com Sol	8	8	8	8
Primavera	nublado	8	8	6	4
	limpo	8	8	8	6
	com Sol	8	8	8	8
Verão	nublado	8	8	6	4
	limpo	8	8	8	6
	com Sol	8	8	8	8
Outono	nublado	6	4	0	0
	limpo	8	8	6	0
	com Sol	8	8	8	8
Iluminação pretendida ao longo do ano (em %)					80,63

Contudo, o fator fundamental para o aumento significativo dos níveis de iluminância é a incidência do Sol na superfície de captação, que faz aumentar a iluminância em cerca de 300 lux nas superfícies de trabalho.

Esta última área de iluminação apresenta um valor de iluminação prevista igual a cerca de 81% do total pretendido, o que condiz com as outras previsões de iluminação.

Face à homogeneidade dos valores de percentagem da iluminação total que este estudo demonstrou para todas as zonas de 150 lux de iluminância, pode-se afirmar que as 3 naves vão apresentar uma iluminação bastante parecida. Contudo, este pensamento pode ser contrariado, se for considerado o tipo de configuração e posição das máquinas e a existência das pontes rolantes em apenas uma das naves.

Nos quadros 16, 17, 18 e 19 verifica-se ainda que em todas as situações de céu limpo e com Sol incidente são garantidos os níveis mínimos de iluminância média recomendados, independentemente da altura do ano e hora do dia. Desta forma, os candeeiros solares garantem os níveis de iluminação em mais 50 % do tempo de trabalho diurno sem qualquer apoio de iluminação artificial.

Para além desta autonomia estimada em 50%, os candeeiros solares vão permitir ainda níveis de iluminação de qualidade superior em determinados momentos do dia e alturas do ano (visível nos gráficos das figuras 61 à 64), gerando um conforto acima do mínimo recomendado, promovendo melhores desempenhos e rendimentos dos trabalhadores.

Após a análise de todos os gráficos, sobressai o facto de existirem patamares principalmente em situações de céu limpo com Sol incidente, englobando um maior ou menor número das horas do período de trabalho, contrariando o aumento da intensidade do fluxo luminoso interior, a par do externo. Este fenómeno acontece devido às propriedades da cúpula deste sistema, que permite filtrar a quantidade de fluxo luminoso captado, ou seja, aumenta a sua superfície de captação quando o Sol está muito inclinado e reduz a superfície de captação quando o Sol está mais vertical, permitindo assim uma homogeneização da quantidade da luz transmitida ao interior. Esta propriedade adquirida pelo constante desenvolvimento dos componentes deste sistema construtivo permite uma melhor iluminação nas primeiras e ultimas horas do dia e possibilita a redução do risco de encandeamento nas horas de maior intensidade da luz natural, beneficiando do adequado funcionamento da unidade fabril.

Da análise destes gráficos salienta-se ainda os valores máximos de iluminância atingidos nas condições mais favoráveis para o desempenho deste sistema construtivo. Por isso, e tendo em conta todas as condições do local e características dos candeeiros solares, pode existir uma possível sobrevalorização desta estimativa, na medida em que não foi considerado nenhum fator de manutenção. A periodicidade da manutenção realizada e a idade do candeeiro solar, podem reduzir a eficiência global do sistema, que se refletirá na diminuição do fluxo luminoso projetado.

A par deste parâmetro, também a qualidade do ar do ambiente interior pode introduzir um fator de redução da iluminância atingida nas superfícies de trabalho uma vez que a distância entre o difusor dos candeeiros solares e a superfície de trabalho é considerável nesta fábrica. No trajeto fluxo luminoso até à superfície pretendida, verifica-se uma “filtragem” deste pelas partículas e impurezas presentes no ar interior do edifício, gerando assim uma diminuição dos níveis de iluminância.

5.3.3 DISPOSIÇÃO DOS CANDEEIROS SOLARES

Depois de se obter o número de candeeiros solares necessários para fazer face às exigências de cada local das naves, resta dispô-los na cobertura, com o objetivo de proporcionar a iluminação mais homogênea possível, sem prejudicar a estrutura da cobertura.

O Quadro 20 demonstra o número de candeeiros solares necessários para cada área da fábrica. A partir destes valores é possível realizar uma distribuição no plano horizontal do sistema construtivo nas naves, tal como indica a Fig. 65. É de referir que a primeira zona de iluminação, representa uma área de trabalho mais cuidado, e se situa numa extremidade da nave Recil.

Quadro 20 – Quantidade de candeeiros solares em cada área de estudo

Nave	Área de superfície de trabalho (m ²)	Candeeiros solares
Recil (*)	81	4
Recil	1319	34
Fabor 1	819	22
Fabor 2	1254	32

* Área de trabalho de maior pormenor.

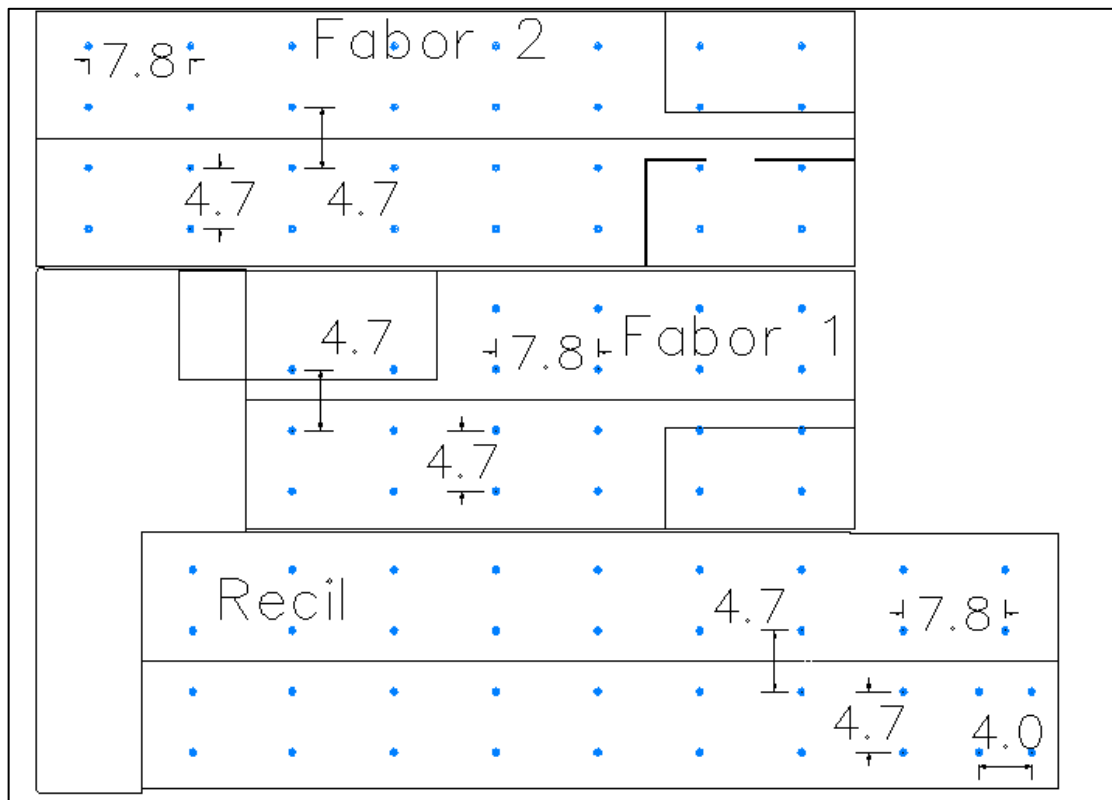


Fig. 65 – Distribuição dos candeeiros solares pelas naves da fábrica

A Fig. 66 demonstra a posição que os candeeiros solares devem apresentar em corte, evidenciando as alturas em relação ao piso. Esta imagem permite ainda perceber quais os candeeiros solares de comprimento 1,5 m (zona mais periférica da cobertura da nave da Recil) e os de 2 m, devido ao problema de atravancamento e das pontes rolantes.

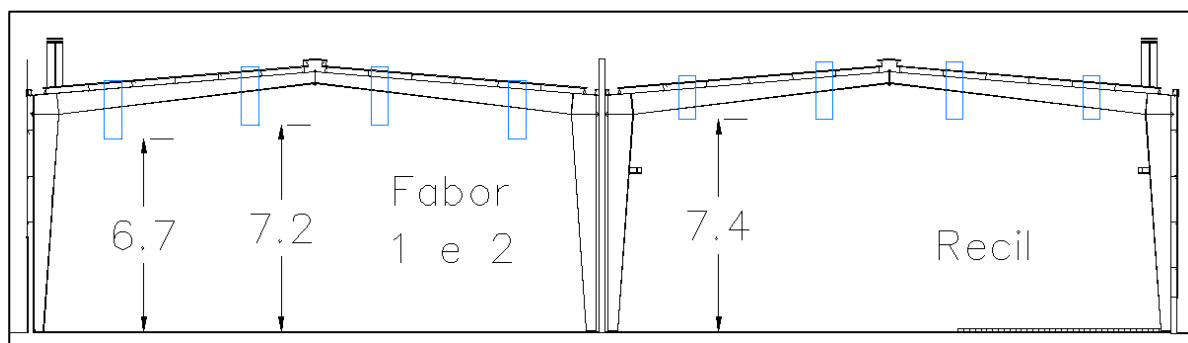


Fig. 66 – Disposição dos candeeiros solares em corte

5.3.4 ABORDAGEM MODULAR

A instalação deste sistema construtivo num edifício representa sempre um investimento. Como a fábrica em estudo possui dimensões e necessidades de iluminação consideráveis, vai obrigar a um elevado número destas unidades, e por isso, um investimento relativamente elevado. Por este motivo, será efetuada uma abordagem modular, ou seja, os candeeiros solares vão ser colocados por setores, de forma a permitir um investimento distribuído no tempo, suavizando o esforço financeiro da empresa.

Igualmente importante, esta abordagem possibilita a observação do desempenho deste sistema inovador, isto é, se compensa apostar na sua colocação em toda a área da fábrica, ou se por outro lado, o seu desempenho não representa vantagens suficientes para a empresa, face ao seu custo.

A colocação dos candeeiros solares foi dividida em 4 fases, 4 unidades na nave Recil, 22 na nave Fabor 1, 34 na nave Recil e por último 32 na nave Fabor 2:

- Fase 1, colocação de 4 unidades na nave Recil – nesta nave existe uma zona de carência de iluminação, consequência do trabalho de pormenor realizado e a ausência de luminárias direcionadas para o local. Esta primeira fase servirá de teste e constatação do desempenho do sistema e servirá para averiguar a sua viabilidade técnico-económica. Depois de confirmadas as suas potencialidades e eficácia quanto ao seu papel na poupança energética e melhoria da qualidade da iluminação interior, pode-se passar às seguintes fases.
- Fase 2, colocação de 22 unidades da nave Fabor 1 – uma vez confirmado o sucesso dos candeeiros solares, a segunda solução será colocar na nave onde o trabalho é mais cuidado, e onde existem múltiplas superfícies de trabalho as quais nem todas apresentam luminárias localizadas. Pretende-se melhorar o conforto visual nas zonas de trabalho comum e áreas circundantes, reduzindo a iluminação artificial e o calor no interior da fábrica.
- Fase 3, colocação de 34 unidades na nave Recil – esta solução representa a última fase de colocação de candeeiros solares na nave da Recil, permitindo assim uma iluminação melhorada em todas as zonas de trabalho comum e de passagem desta nave.
- Fase 4, colocação de 16 unidades na nave Fabor 2 – ao contrário das naves anteriores, nesta nave, as zonas de trabalho estão restringidas a um dado espaço, o qual é reforçado com luminárias direcionadas. Contudo, no resto da nave realiza trabalho um empilhador, que devido à reduzida iluminação, representa um risco para a segurança dos trabalhadores. A

colocação dos candeeiros solares vem no sentido de melhorar esta mesma segurança, aumentando os níveis da iluminação no interior do edifício.

A Fig. 67 demonstra as zonas correspondentes a cada uma das fases de colocação dos candeeiros solares, em que os pontos azuis representam a posição dos mesmos.

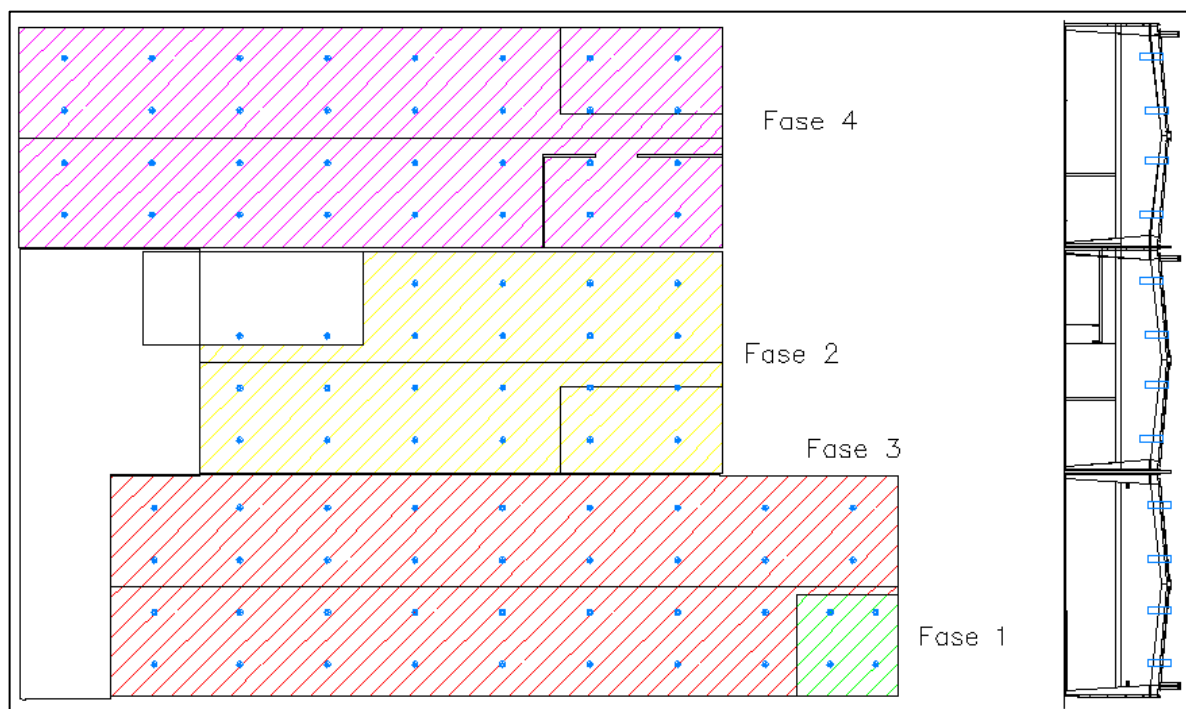


Fig. 67 – Fases da colocação do novo sistema de iluminação

Com esta reabilitação pretende-se garantir mais iluminação, assegurando os níveis de iluminância corretos, mais qualidade, com uma temperatura de cor neutra. Vai ser possível reduzir a temperatura interior, o que é muito benéfico na estação de arrefecimento, e pouco significativo durante a estação de aquecimento, uma vez que as condutas que aquecem as máquinas também aquecem o meio interior. Estas condições permitem melhorar o conforto interior, com a possibilidade de reduzir a eletricidade consumida pelos candeeiros em determinadas alturas do ano.

5.4 ORÇAMENTOS

A empresa Polirígido, distribuidora da marca Solatube disponibilizou valores de referência dos custos deste sistema construtivo e respetiva colocação. Estes valores permitem entender a dimensão do investimento possível, podendo ser, ou não, uma boa solução de mercado, uma vez que foi pesquisado apenas um fornecedor.

Quadro 21 – Orçamento com sistemas Solatube

	Modelo	Comprimento	Quantidade	Preço	Preço de colocação	Preço total
Fase 1	750 DS	2 m	4	800 €	45	3380 €
Fase 2	750 DS	2 m	22	700 €	30	16060 €
Fase 3	750 DS	1,5 m	17	700 €	30	12410 €
	750 DS	2 m	17	700 €	30	12410 €
Fase 4	750 DS	2 m	32	650 €	30	21760 €
Preço total da abordagem modular						66020 €
Opção B			92	650 €	30	62560 €

No Quadro 21 é possível ter uma previsão do custo atual para cada solução. É ainda perceptível a diferença no custo final dos candeeiros solares para uma situação de compra faseada, ou para uma situação de investimento único.

5.5 EXECUÇÃO DE TRABALHOS

Os pavilhões em questão têm uma altura considerável, e os candeeiros solares embora leves, representam alguma dimensão. Por esta razão os trabalhos de colocação devem ser realizados por profissionais com experiência acumulada. Sendo que os trabalhos a executar devem seguir as indicações citadas no ponto 3.3 (referente à Solatube) e as indicações abaixo descritas.

- Colocação de estruturas de suporte temporário (andaimes e respetivos dispositivos de segurança), devido à remoção de chapas da cobertura e para permitir o movimento dos trabalhadores.
- Remoção das chapas translúcidas e colocação de novas chapas opacas com o melhor coeficiente de transmissão térmica possível. Os espaços para a colocação dos tubos devem ser previamente elaborados.
- Realização de estruturas de suporte do sistema na cobertura. Esta estrutura tem como objetivo segurar e fixar o tubo à cobertura, assim como isolar o interior do exterior de intrusão, de água e fluxos de ar.
- Colocação dos tubos pré montados. Os candeeiros solares chegam ao local de implantação pré-montados, facilitando os trabalhos no local da obra. Os tubos são fixados à estrutura e ficam prontos para realizar a sua função.

Com os desenhos de pormenor relativos ao sistema construtivo disponíveis pelo fornecedor, e os desenhos do projeto da fábrica, foi possível detalhar um pormenor demonstrativo do que será a implementação dos candeeiros solares na cobertura da fábrica.

A título de exemplo, a Fig. 68 representa um corte de pormenor, da ligação do sistema construtivo na estrutura da cobertura da nave Recil. Uma vez que o peso do equipamento é inferior a 4 kg, não é necessário providenciar qualquer tipo de estrutura auxiliar para esta situação.

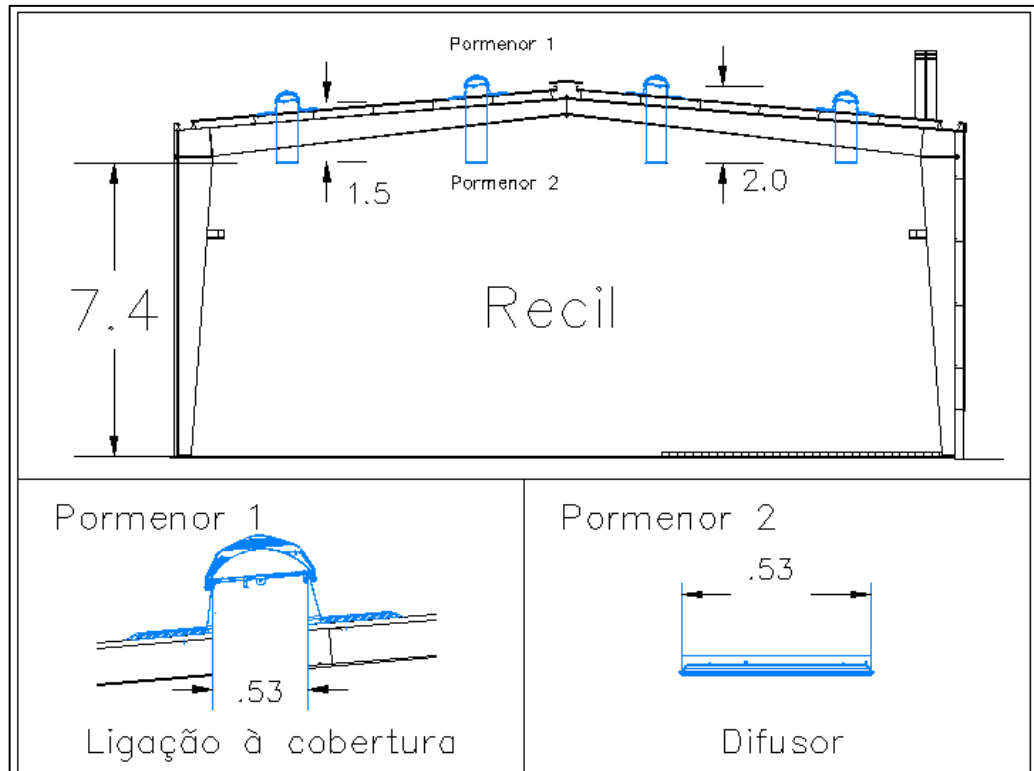


Fig. 68 – Colocação dos tubos na nave Recil (adaptado de [27])

5.6 MEDIDAS ADICIONAIS DE MELHORIA DA ILUMINAÇÃO

A qualidade da iluminação depende principalmente da capacidade das fontes de iluminação, da sua quantidade e distribuição no espaço. Contudo, o saber aproveitar a luz no interior do edifício torna-se decisivo na iluminância nas superfícies e nas despesas associadas às fontes de iluminação. Por este motivo, além de uma renovação do sistema de iluminação, esta fábrica precisa de ter em conta medidas adicionais que permitam aproveitar e rentabilizar toda a luz disponível no interior.

A primeira abordagem será efetuar uma limpeza das superfícies presentes nos pavilhões, dando real importância a tetos e paredes. Devido ao tipo de trabalho realizado, são expelidas várias impurezas pelas máquinas ao longo do tempo, que se acumulam em todas as superfícies, reduzindo a reflexão da luz e consequentemente a luz disponível.

Como já foi demonstrado anteriormente, superfícies lisas e sem reentrâncias permitem melhores reflexões que outro tipo de superfícies. Igualmente se constata grandes diferenças entre superfícies de cor clara e escura. Seria uma mais valia criar superfícies lisas, onde elas ainda não existem, e pintar de cor clara, as superfícies atualmente de cor escura existentes no interior da fábrica. Tendo em conta que atualmente as naves apresentam cores bastante escuras, e algumas superfícies de textura rugosa, esta reabilitação iria permitir maior reflexão da luz, e aumentar significativamente a iluminação dos postos de trabalho, devido à altura do edifício.

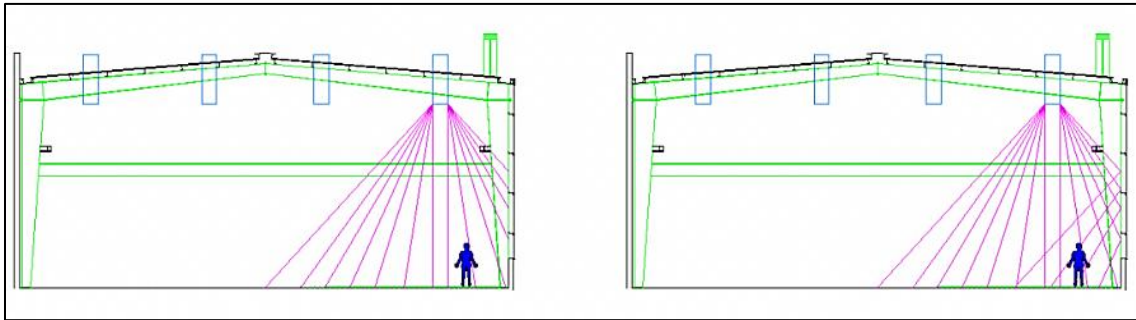


Fig. 69 – a) Sem reflexão; b) com reflexão da luz

A Fig. 69 mostra como a luz é “perdida” na situação a), e como pode ser aproveitada (situação b)) no caso de superfícies que facilitem a reflexão da luz.

Relativamente ao sistema de iluminação artificial, seria bastante importante a incorporação de um sistema automático, com sensores de luminosidade que permitisse regular a potência fornecida às lâmpadas em função da iluminação do interior do edifício proveniente dos candeeiros solares. Esta medida é fundamental para ser possível poupar energia elétrica e ao mesmo tempo garantir os níveis de iluminação adequados de modo contínuo.

6

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÓMICA

6.1 ESTUDO TÉCNICO-ECONÓMICO

De acordo com os resultados obtidos no capítulo 5, o projeto de iluminação natural com aplicação dos sistemas inovadores, irá responder bastante melhor às exigências de iluminação que os sistemas de iluminação geral anterior. Resta entender qual a sua viabilidade económica face ao atual sistema de iluminação presente na fábrica. Neste sentido, a solução proposta no caso de estudo foi avaliada a nível económico através do método “*Life Cycle Cost*” (LCC).

6.1.1 LIFE CYCLE COST

Com origem nos Estados Unidos em 1960, o modelo LCC pode ser definido como o custo total associado à propriedade dum determinado equipamento, incluindo custos de aquisição, de exploração, de manutenção e de substituição.

- Custos de aquisição (ou custos de investimento) – custos associados ao preço de compra do material, acrescido dos gastos de instalação no respetivo local em condições de ser utilizado na forma programada (C_i);
- Custos de exploração – somatório dos custos de utilização, manutenção e substituição;

$$C_{exp} = \sum(C_m + C_u + C_s) \times \left(\frac{1+\alpha_1}{1+\alpha_2}\right)^n \quad (6.1)$$

O parâmetro α_1 é a taxa de variação de custo e α_2 é a taxa de capitalização, e para efeitos de cálculo os seus valores vão ser admitidos de 0,04 e de 0,03 respetivamente

- Custo de utilização – custo associado aos gastos com os recursos necessários para manter o equipamento em funcionamento;
- Custos de manutenção – custos associados aos gastos necessários para manter o equipamento num estado que lhe permita desempenhar a função para o qual foi concebido e ter um aspeto esteticamente aceitável;
- Custos de substituição – custos associados aos prejuízos, diretos e indiretos, causados pela necessidade de substituição do material por outro com função semelhante.

Com a caracterização de todas as parcelas, obtém-se o custo total de cada solução:

$$C_g = C_i + C_{exp} \quad (6.2)$$

O LCC tem como objetivo fundamental determinar a solução que apresenta a menor despesa a longo prazo, considerando um dado conjunto de alternativas capazes de desempenhar a mesma função. Devido ao tempo disponível e ao âmbito desta dissertação, foi apenas considerada uma proposta de mercado, por isso, neste caso de estudo, vão apenas ser comparadas duas soluções, a atual e a nova solução proposta. Este estudo de viabilidade técnico-económica foi realizado para um período de 25 anos.

6.1.2 CUSTO DA SOLUÇÃO ATUAL

A fábrica da empresa Fabor apresenta 31 lâmpadas de 400 W (do tipo vapor de mercúrio) ligadas durante o período de trabalho, ou seja, 8 horas, para iluminação geral. Em rigor, numa das naves, que trabalha em modo contínuo, as lâmpadas estão ligadas bastante mais tempo. Esse facto não foi contudo tido em conta, uma vez que o novo sistema de iluminação apenas pode substituir a solução existente nas 8 horas de trabalho diurno.

Considerando o calendário normal de trabalho igual a 255 dias, e estando as lâmpadas ligadas durante 8 horas, o custo de utilização durante o ano deste sistema de iluminação é $255 \text{ dias} \times 8 \text{ horas} \times 400 \text{ W} \times 0,1324 / 1000$, em que a última parcela representa o preço da eletricidade em kWh. Resta referir que o período de vida médio destas lâmpadas é igual a 1 ano, ou seja, 2040 horas.

Este sistema de iluminação não apresenta custos iniciais pois, já é o sistema implementado nas naves da fábrica. Também o custo de manutenção foi desprezado nestes cálculos. Assim, nos Quadros 22, 23 e 24 apresentam-se os dados dos custos totais, sendo que estes correspondem aos custos de exploração do sistema.

Quadro 22 – Custo de substituição anual (iluminação elétrica)

Custo de Substituição		Unidades
Período de vida da lâmpada	2040	h
Número de lâmpadas por ano	31	
Custo de lâmpadas por ano	1240	€
Custo total de substituição por ano	1240	€

Quadro 23 – Custo de utilização anual (iluminação elétrica)

Custo de Utilização		Unidades
Período de utilização	2040	h
Potência de uma unidade	400	W
Potência total	12400	W
Custo da energia	0,1324	€/kWh
Custo de utilização por ano	3349,2	€

Quadro 24 – Custo de exploração anual (iluminação elétrica)

Custo de Exploração	Unidades	
Custo de Substituição	1240	€
Custo de utilização	3349,2	€
Custo de Exploração	4589,2	€

Uma vez encontrados os valores dos custos anuais desta solução é possível estimar o seu custo total num período de 25 anos, tal como se visualiza no gráfico da Fig. 70. Os valores apresentados correspondem a custos relativos ao final de cada ano (acumulados) e consideram o presente ano 2012 como o ano zero, e como último ano de estudo o ano 2037.

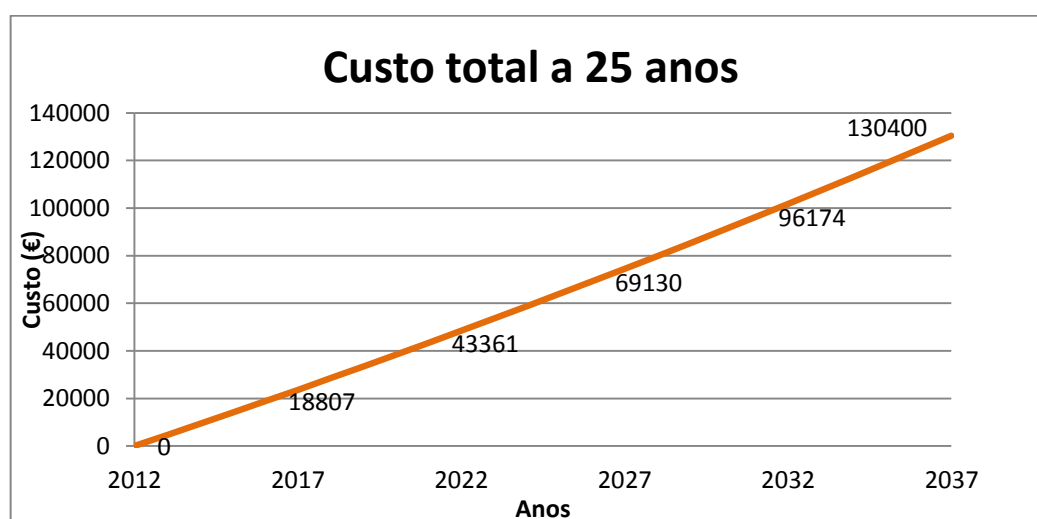


Fig. 70 – Life Cycle Cost para a situação atual

6.1.3 CUSTO DA SOLUÇÃO INOVADORA

A colocação dos candeeiros solares que constituem a principal fonte do novo sistema de iluminação, deve ser efetuada por partes, com o objetivo de suavizar a carga financeira que implica este investimento. Deste modo, são apresentados valores para esta abordagem modular comparados a uma situação de colocação dos candeeiros solares correspondente a um único investimento inicial.

Na fase 1 vão ser colocados 4 candeeiros solares, que vão permitir a redução do tempo em que uma lâmpada está ligada. O facto de se observar uma relação de 4 para 1, não implica o fraco desempenho do sistema inovador, pois a zona em questão é um local de trabalho cuidado, o qual apresenta valores muito baixos de iluminância face aos níveis recomendados. Assim, este aumento de fontes de iluminação vai permitir um melhor conforto visual, para o tipo de tarefas realizadas nesta zona de fábrica.

Na fase 2, respetiva à nave da Fabor 1, vão ser colocados 22 candeeiros solares, os quais vão reduzir o consumo de 10 lâmpadas de 400 W em cerca de 80%.

A fase 3 passa pela colocação de 34 unidades deste sistema inovador na nave da Recil, permitindo reduzir o funcionamento de 17 lâmpadas de 400 W em cerca de 80%.

Por fim, na fase 4 serão colocados 32 candeeiros solares que vão possibilitar uma iluminação adequada numa nave que atualmente apresenta níveis muito baixos de iluminação, para zonas de realização de tarefas e locais de passagem. Como durante o período de trabalho diurno esta nave apenas tem 3 candeeiros elétricos ligados, relativos a uma extremidade da nave, só é possível reduzir os custos de energia para estas 3 luminárias.

No global, vão ser instalados 92 unidades deste sistema construtivo, para responder adequadamente aos níveis de iluminância recomendados nas zonas de passagem e trabalho comum.

Quadro 25 – Rendimento de cada fase de colocação

Fase de colocação	Número de tubos	Apoio de luz elétrica no local (%)	Apoio de luz elétrica na iluminação geral (%)
1	4	29,5	97,7
2	22	19,1	71,6
3	34	19,4	27,4
4	32	19,4	19,6

O Quadro 25 apresenta não só o número de candeeiros a colocar em cada fase, mas mostra fundamentalmente o rendimento de cada fase de colocação e o seu impacto na necessidade de utilização de luz artificial para assegurar níveis adequados de iluminância no interior. Estes valores têm em conta as previsões de desempenho calculadas no capítulo 5, e que o rendimento da próxima fase já tem em conta a colocação da fase anterior.

De acordo com os dados fornecidos pela Polirígido, a colocação dos candeeiros solares apresenta um custo variável para cada fase, devido ao número de equipamentos, tal como indicado no ponto 4 do capítulo 5. Como não são previstos custos de substituição, além do investimento inicial, contabilizou-se um custo de manutenção simbólico referente à limpeza dos componentes em contato com o exterior (cúpula e difusor) de 3 em 3 anos.

Para ser possível realizar um estudo com um investimento desfasado no tempo, foi considerado que a primeira colocação se realiza no ano zero (2012), no ano a seguir é realizada a segunda colocação, a terceira fase será realizada em 2015, e a última fase em 2020.

Quadro 26 – Custo de cada fase de colocação dos candeeiros solares

Custo global - valores acumulados (em euros)				
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Custo inicial	3380	19440	44260	66020
Custo de manutenção	4	26	60	92
Custo de substituição	1211	888	340	243
Custo de utilização	3272	2398	918	656
Custo de exploração	4488	3312	1317	991
Custo global	7868	22752	45577	67011

Este quadro apresenta valores para o ano atual, por isso, todos os valores que sejam despesas após o ano de 2012, tiveram um acréscimo no seu custo coerente com a equação (6.1). Os custos de substituição e de utilização são relativos às lâmpadas de 400 W que continuam a funcionar em apoio aos candeeiros solares.

Para terminar a perspetiva de custo a 25 anos deste sistema de iluminação, é apresentado um gráfico na Fig. 71 que revela os valores de custo global para uma abordagem modular em comparação com um investimento único. Este gráfico mostra como é possível suavizar o investimento inicial, contudo esta solução faz crescer o custo a longo prazo, neste caso em cerca de 7% em relação à situação de investimento único.

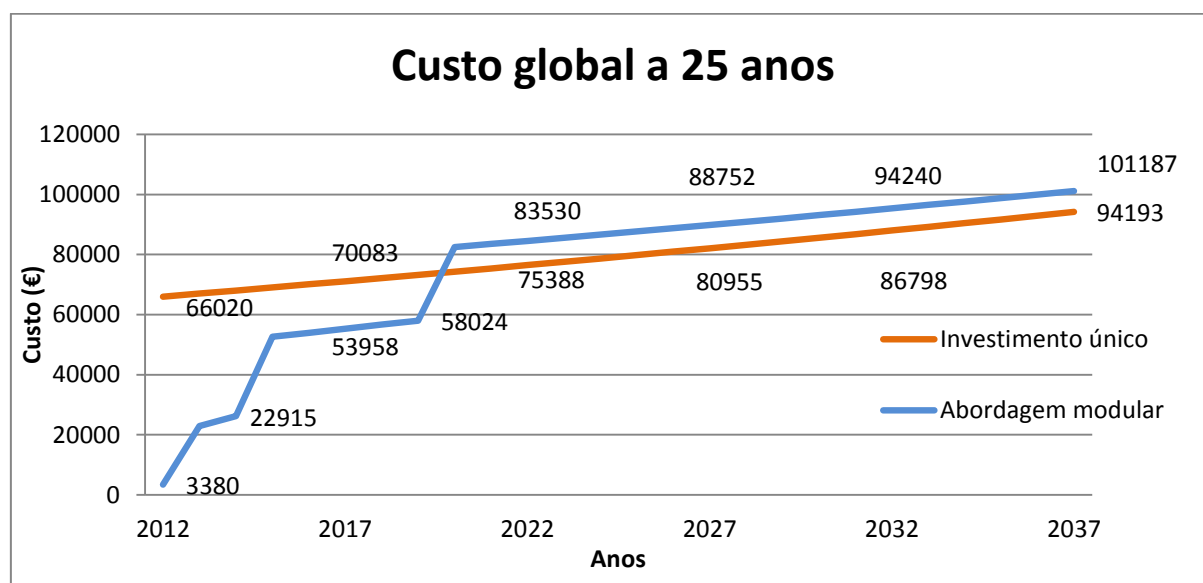


Fig. 71 – Life Cycle Cost para solução nova

6.1.4 QUANTIFICAÇÃO DOS VALORES DE POUPANÇA

Após terem sido encontrados os custos de cada solução para um período de vida de 25 anos, é possível comparar a solução inicial com a nova solução. Com o objetivo de ilustrar as vantagens da nova solução relativamente à situação atual, é apresentado um gráfico na Fig. 72 que compara os custos de exploração entre ambas as soluções. Neste gráfico é visível a poupança que é conseguida com um sistema de iluminação utilizando o sistema construtivo de iluminação natural inovador com o apoio da luz elétrica, ao longo dos anos.

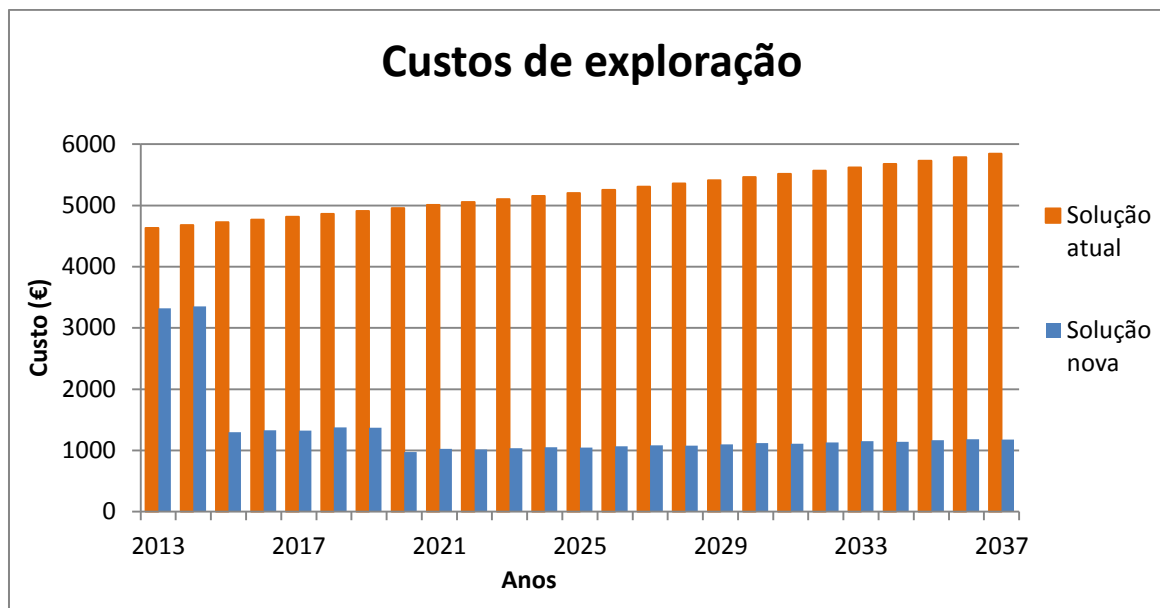


Fig. 72 – Custos de exploração entre a solução nova e a solução atual

Recorrendo ao modelo de avaliação das soluções num dado período de vida, o gráfico presente na Fig. 73 permite uma avaliação dos custos globais, e por isso, permite uma estimativa do ponto de retorno no investimento da solução de iluminação com candeeiros solares, apoiados por iluminação elétrica. De acordo com este gráfico, a nível económico o novo projeto de iluminação é apenas uma boa solução a longo prazo.

Admitindo que um investimento único não é uma opção interessante devido ao esforço que isso iria significar para a empresa, esta está presente no gráfico apenas para possibilitar mais uma forma de comparação.

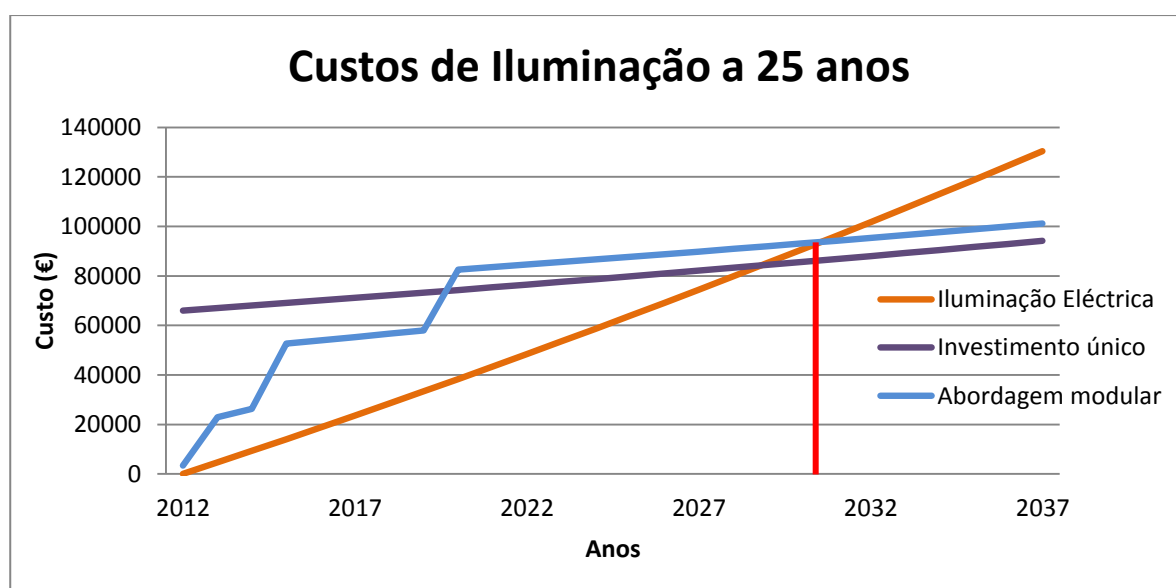


Fig. 73 – Gráfico de comparação entre os sistemas de iluminação em estudo

Com a solução proposta efetuada por fases, estima-se que se consiga recuperar o investimento em 19 anos, e que ao fim de 25 anos, se consegue uma poupança de 29 mil euros. Em termos económicos, a solução com candeeiros solares representa uma boa decisão apenas a médio e longo prazo.

Na Fig. 74 observa-se um gráfico que expõe os custos e poupanças durante os 25 anos de estudo económico, se for implementada a solução proposta, comparando aos custos do sistema atual de iluminação geral da fábrica. Estes dados permitem uma maior sensibilidade quanto aos custos de investimento, distribuído pelos primeiros anos, e posteriormente os benefícios da poupança energética a partir do ano 2032 (19º ano após o começo do investimento).

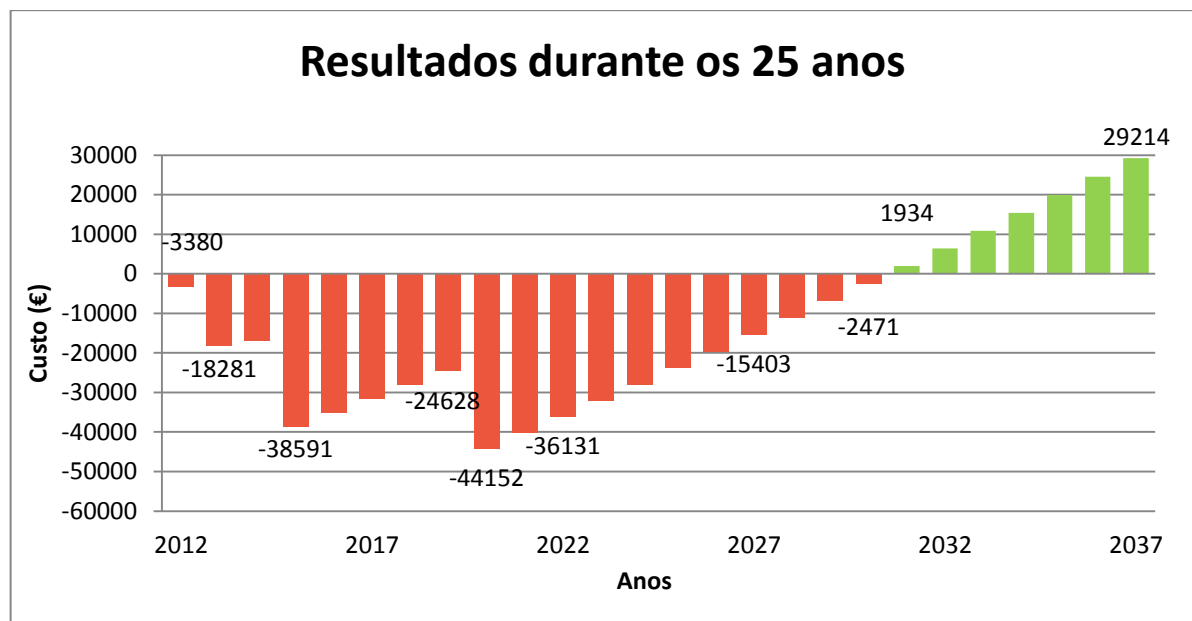


Fig. 74 – Custo de investimento e valores de poupança a médio prazo

Porém, o ponto de partida do modelo Life Cycle Cost não é respeitado neste gráfico, uma vez que são comparadas soluções que não desempenham a mesma função. Isto é, a situação inicial não respeita os níveis de iluminância que a nova solução prevê. Este ponto importante de avaliação tem ainda maior significado quando se observa a nave Fabor 2 que tem apenas 3 candeeiros elétricos e não respeita os níveis mínimos recomendados na grande maioria do seu interior. Por este motivo, apresenta-se uma comparação análoga à anterior, excluindo a abordagem da nave Fabor 2. Para esta nova situação, pode assumir-se que ambas as soluções desempenham a mesma função com menos diferenças de qualidade final.

Estudando assim duas soluções semelhantes em termos de funcionalidade, estima-se que o retorno do investimento seja alcançado bastante mais cedo. Para esta situação, o retorno alcançado em 15 anos, e a 25 anos está previsto uma poupança de 47 mil euros com a nova solução.

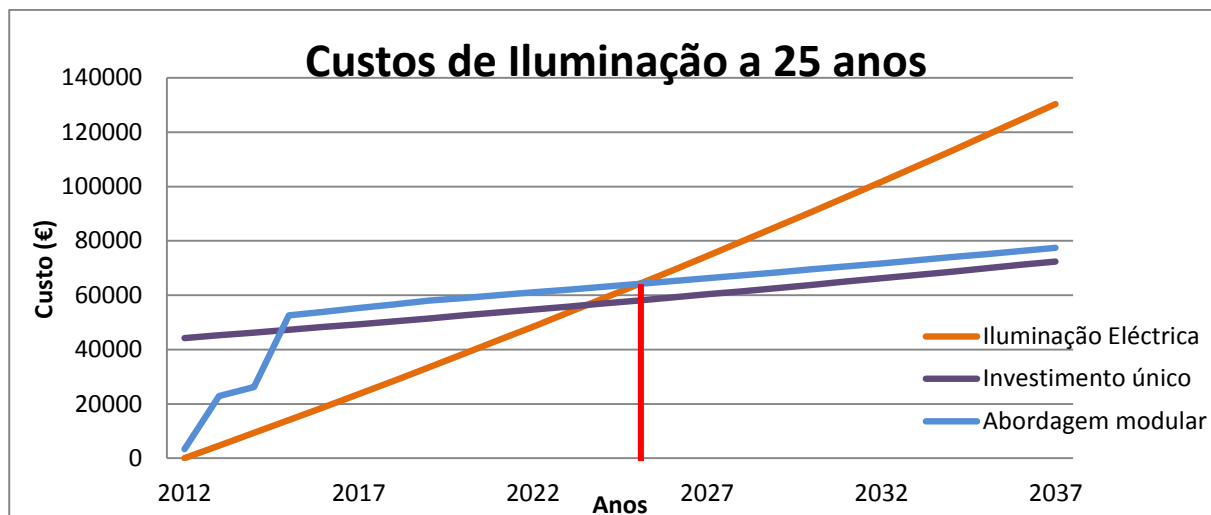


Fig. 75 – Life Cycle Cost para apenas 2 naves da fábrica

Deve salientar-se que nesta situação, é ainda menosprezada a qualidade da iluminação, e por isso, o conforto visual dos trabalhadores, mais especificamente, na nave Fabor 2. O que ainda torna o investimento provavelmente mais interessante em termos técnico-económicos.

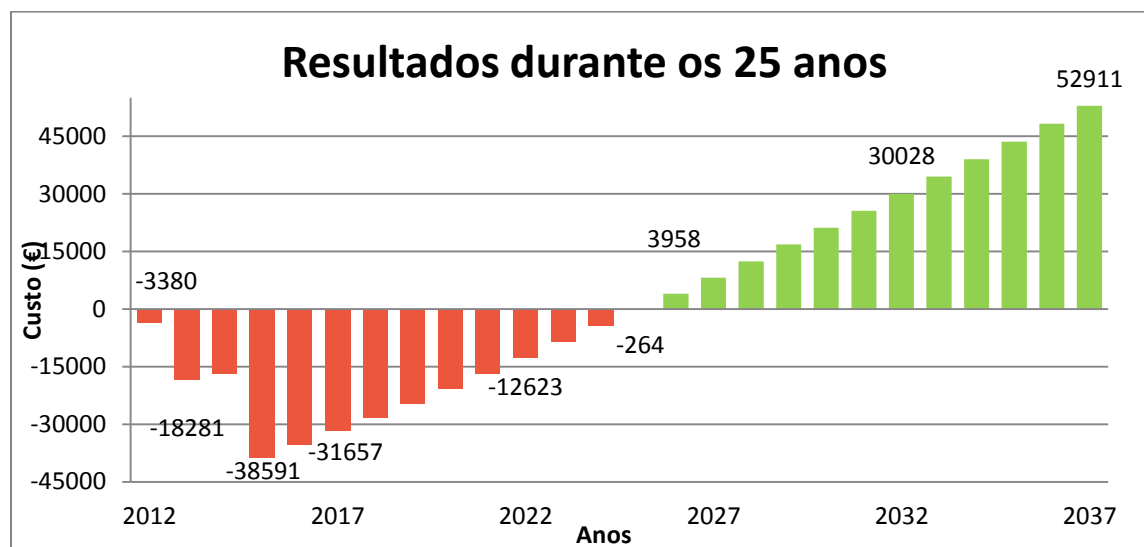


Fig. 76 – Custos de investimento e valores de poupança a médio prazo

Para esta avaliação de custos, verifica-se um custo momentâneo mais reduzido, um período de retorno mais curto, e uma poupança final bastante superior face à solução completa. O gráfico presente na Fig. 76 é comprovativo destas conclusões.

Finalmente, importa evidenciar que pode ser questionada a durabilidade dos candeeiros solares, ou seja, pode pôr-se em causa o seu “não envelhecimento” já que o período de garantia é de 10 anos e não existe muita experiência relativamente ao seu modo de envelhecimento. Estima-se que poderá ser necessário substituir este produto ao fim de 30 anos, dependendo das condições de instalação e características ambientais do local.

7

CONCLUSÃO

7.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

7.1.1 ESTADO DE ARTE

Os candeeiros solares fornecem uma luz limpa e natural, ao contrário da maior parte da iluminação artificial e claraboias. Esta luz com um índice de restituição de cor muito alto permite melhor contraste, melhor perceção das cores, e consequentemente menos esforço dos olhos e do cérebro em todos os processos de uso do sentido “visão”.

Independentemente dos acessórios que se possam adicionar ao sistema, a principal função do sistema é a transmissão da luz solar diretamente para o interior, a qual é apenas possível durante o período diurno. O sucesso económico depende do período de funcionamento do edifício que deve ser o mais próximo possível do período diurno, sendo a situação de melhor rentabilização do candeeiro solar correspondente ao período de utilização integralmente coincidente com o período diurno e com a maior presença de Sol alto possível, devendo ao mesmo tempo a iluminação natural cumprir todos os níveis exigenciais de conforto visual aplicáveis a cada situação concreta de uso.

A implementação do sistema é um aspeto a ter em conta, pois o tipo de cobertura pode facilitar a colocação do tubo solar, ou, por outro lado pode inviabilizar a sua instalação, por motivos de segurança estrutural da cobertura (necessidade de aumentar o investimento devido à ausência de suportes integrados na cobertura e/ou na dificuldade em inserir os candeeiros no seio dos elementos estruturais principais ou secundários).

O diâmetro do tubo (do qual depende a cúpula) define o fluxo luminoso que é captado, e consequentemente a grandeza do fluxo luminoso emitido. Por este motivo, o seu diâmetro deve ser no mínimo de 20 cm, para que esteja assegurada a sua viabilidade técnico-económica.

O comprimento do tubo é um fator muito importante a ter em conta. O candeeiro solar deve ter um comprimento mínimo (em função do seu diâmetro), com o objetivo de garantir o número necessário de reflexões para minimizar o risco de concentração da luz apenas numa secção do difusor. É conhecido que, quanto maior for o tubo menor é o seu rendimento, mas se o tubo for demasiado curto geram-se riscos de encandeamento, concentração de luz em superfícies, podendo deteriorar objetos e alimentos, situações que comprometem o funcionamento adequado do sistema.

a) Oferta no mercado

Analisando os produtos disponíveis no mercado, e os resultados apresentados pelos próprios fabricantes, pode-se concluir que existem más e boas soluções que podem depender do tipo de utilização do edifício.

Os tubos flexíveis são uma má opção, uma vez que têm um baixo rendimento comparado com um tubo rígido, e um tubo rígido responde em geral às mesmas condições de implantação e tem um custo comparável ou mais baixo que o flexível.

Os acessórios e kits (ventilação, iluminação artificial, dispositivos de oclusão) que permitem ter um sistema multifuncional possibilitam diminuir o número de sistemas colocados no teto (candeeiros naturais e elétricos, grelhas de ventilação). Contudo, a complexidade dos componentes pode reduzir o rendimento da função principal, e aumentar consideravelmente não só o custo de investimento, como o custo de manutenção associado.

O kit fotovoltaico, devido ao enorme investimento, à baixa durabilidade de alguns componentes, e à necessidade de manutenção, representa uma opção em geral menos interessante. A primeira ideia de custo de utilização zero com a possibilidade de constante iluminação durante 24 horas, pode-se refletir numa manutenção dispendiosa de algumas peças (baterias, lâmpadas, painel, transformador), e se a isto for adicionado o investimento inicial, o do retorno do investimento em termos económicos pode ser de difícil concretização.

b) Edifícios Comerciais

Em superfícies comerciais, onde normalmente não existem pisos acima, e a área é significativa, a introdução de dispositivos que transmitam iluminação natural sem provocar aumentos consideráveis de temperatura é realmente interessante. Por um lado, verifica-se uma poupança no custo de exploração em iluminação e em sistemas de climatização. Por outro, a melhoria do conforto visual, pode levar menos esforço e cansaço do cliente, logo mais tempo de permanência no estabelecimento, o que pode gerar maior número de vendas.

c) Edifícios de escritórios

No caso dos edifícios de escritórios, o horário de trabalho é relativamente coincidente com o período diurno, o que potencia a aplicação dos candeeiros solares, tendo sempre em atenção as condicionantes arquitetónicas. Esta solução permite reduzir custos energéticos relativos à iluminação e climatização.

Se por vezes a redução da despesa em energia pode não compensar a utilização dos tubos solares a curto e médio prazo, é muito significativa e relevante a melhoria da qualidade da luz e do conforto dos trabalhadores na realização das suas tarefas do dia-a-dia. Uma aparente má solução económica, pode-se tornar numa boa solução, caso este conforto visual se reflita numa maior produtividade dos trabalhadores, tendo em conta que o salário destes será a principal despesa.

d) Edifícios de habitação

Desde que seja assegurada a segurança estrutural, o candeeiro solar pode captar a luz natural, e projetá-la no interior, percorrendo entre 1 e 10 metros. Para que seja economicamente rentável, é preciso ter em conta o horário de utilização e o período diurno. Sendo esta a grande desvantagem, uma vez que caso os residentes não estejam presentes na sua habitação durante o dia, o sistema não apresenta quaisquer benefícios. Os candeeiros solares contribuem para a redução da despesa energética, mas neste caso a sua mais-valia é a melhoria da qualidade de vida resultante do conforto visual que oferece.

e) Edifícios industriais

Existem indústrias que, pelas suas especificidades de iluminação e horários de funcionamento, descartam a possibilidade de implementação deste sistema inovador de iluminação natural. No entanto existem outras, como por exemplo o caso de estudo, no qual o período laboral é quase coincidente com o período diurno e que por esse motivo muito podem beneficiar desta solução. Nestes casos, os candeeiros solares permitem a redução do custo energético em iluminação e também em sistemas de climatização (quando existentes), possibilitando ainda melhorias no rendimento do trabalhador (como resultado da melhoria da qualidade da luz ambiente), e um mais eficaz controlo de qualidade nas inspeções de produto final.

7.1.2 APLICAÇÃO AO CASO REAL

A fábrica que foi objeto de estudo apresenta carências significativas de iluminação, sendo que existem vários locais onde a iluminância está abaixo dos níveis mínimos recomendados.

Por essa razão, foi proposta uma solução que prevê a melhoria da iluminação interior, incluindo 92 unidades de candeeiros solares uniformemente distribuídos pelas 4 zonas de intervenção e apoio de luz elétrica em determinados momentos, dependendo das condições atmosféricas momentâneas.

O custo de investimento é elevado em comparação com outros tipos de iluminação. Torna-se ainda mais significativo se já tivermos um sistema de iluminação e quisermos fazer uma reabilitação no edifício para a incorporação deste novo sistema construtivo.

A melhoria da qualidade da luz proporciona maior rendimento e qualidade de trabalho dos colaboradores, e consequentemente uma significativa redução das perdas (menos erros, maior pormenor, melhor qualidade).

Segundo esta análise, é intuitivo entender que o retorno do investimento é frequentemente alcançado mais cedo que o esperado do que o previsto em estudos-económicos que apenas quantifiquem os custos de poupança energética face ao investimento, graças a poupanças indiretas provenientes de melhorias de índices de trabalho.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A evolução das tecnologias da construção é sustentada por novos materiais e novos sistemas construtivos, englobando estudos e desenvolvimentos contínuos em curso em universidades, unidades de investigação ou em entidades diversas públicas ou privadas, desde fornecedores a utilizadores.

Neste trabalho apresentou-se uma solução moderna e inovadora de iluminação que tem ainda uma utilização relativamente pouco importante em Portugal.

Nesse contexto, este trabalho poderá servir de base à realização de outros estudos que englobem os candeeiros solares, aos quais servirá de base de apoio. Para uma melhor aceitação deste sistema inovador por parte dos projetistas e construtores, é importante continuar a pesquisa e a divulgação das suas potencialidades e dos eventuais problemas de implementação associados.

Um exemplo de trabalho de investigação interessante a desenvolver poderá ser por exemplo a criação de metodologias de cálculo mais específicas incluindo modelação numérica validada por ensaios experimentais destinadas ao dimensionamento dos candeeiros e da sua localização num dado espaço arquitetónico.

Será importante também realizar outros estudos de viabilidade técnico-económica mais completos, por exemplo, estudos técnico-económicos contabilizando também poupanças nos sistemas de climatização aplicados em edifícios comerciais e de escritórios, bem como a quantificação de poupanças indiretas, essas bem mais difíceis de considerar devido à sua elevada subjetividade.

A nível prático, será importante também observar situações já existentes de aplicação deste sistema, verificando o real desempenho e estudando patologias associadas e o comportamento dos candeeiros solares a médio e longo prazo, bem como apresentar propostas de manutenção e medidas de melhoria de desempenho, incluindo ações de limpeza e/ou substituição parcial de peças, por exemplo apenas dos difusores.

Por fim, este estudo pode servir de bitola à realização de estudos semelhantes sobre outros materiais, componentes ou sistemas inovadores na construção.

Referências bibliográficas

- [1] <http://www.dgge.pt> (21-02-2012)
- [2] Teixeira, Armínio de Almeida. Apontamentos de Luminotecnia e Instalações Industriais. http://paginas.fe.up.pt/~arminio/lumiind/LUZ_VISAO.pdf (21-02-2012)
- [3] Carvalho, Licínio Cantarino de. *Iluminação Natural e Radiação Solar no projecto de fenestração*. LNEC, Lisboa, 1995.
- [4] Santos, António José. *A iluminação nos edifícios: Uma abordagem no contexto da sustentabilidade e eficiência energética*. “ 1.º Congresso da Luz. Inovação e Evolução”, Maio, 2007, realizado em Lisboa, Editor: LNEC, Lisboa, Coleção: Comunicações, Série COM 133, 1.ª Edição: 2007.
- [5] <http://www.velux.es> (28-03-2012)
- [6] Alves, Filipe Lopes de Pinho Latourette. *Medidas de Eficiência Energética na iluminação integrando luz natural*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [7] Teixeira, Armínio de Almeida. Apontamentos de Luminotecnia e Instalações Industriais. http://paginas.fe.up.pt/~arminio/lumiind/Ilum_Natural.pdf (21-02-2012)
- [8] Coelho, António Leça. *Articulação da iluminação natural com a iluminação artificial contribuição para a caracterização do clima luminoso do país*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, 1989.
- [9] Teixeira, Armínio de Almeida. Apontamentos de Luminotecnia e Instalações Industriais. <http://paginas.fe.up.pt/~arminio/lumiind/BasesGerais.pdf> (04-05-2012)
- [10] Santos, J. Neves dos. Apontamentos da disciplina. Breves Noções de Luminotecnia. 2007 <http://www.fe.up.pt> (21-02-2012)
- [11] <http://www.iar.unicamp.br> (16.11.2011)
- [12] <http://historiadaarte.pbworks.com/w/page/18413911/Pante%C3%A3o> (11-03-2012)
- [13] Baker, N., Fanchiotti A., Steemers K. *Daylighting in architecture*. Editor: James & James, London. Edição: 1993.
- [14] http://learn.greenlux.org/packages/clear/visual/buildings/options/core/mirror_heliostat.html (11-03-2012)
- [15] <http://reativanarede.blogspot.com/2010/12/iluminacao-natural.html> (11-03-2012)
- [16] <https://blogs.anl.gov/greenlab/energy-water-conservation/> (11-03-2012)
- [17] Mohelnikova, Jitka. *Tubular Light Guide Evaluation*. Elsevier Ltd. Recebido a 2 de fevereiro de 2009, revisto a 16 de março de 2009 e aceite a 19 de março de 2009. Publicado em 2011, 8 páginas, Brno, Republica Checa
- [18] Carter, D. J.. *Tubular Guidance Systems for Daylight: UK case studies*. Taylor & Francis Ltd. Publicado em 2008, Liverpool, UK
- [19] http://div3.cie.co.at/?i_ca_id=575&pubid=115 (CIE 173:2006. Tubular Daylight Guidance Systems) (21-02-2012)
- [20] Callow, Joel. *Daylighting Using Tubular Light Guide Systems*. Dissertação de Doutoramento, University of Nottingham, 2003
- [21] Kocifaj, M. *Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing*. Elsevier Ltd. Recebido a 22 de setembro de 2007, revisto a 11 de julho de 2008 e aceite a 18 de julho de 2008, 7 páginas, Publicado em 2008, Bratislava, Republica Checa
- [22] Darula, Stanislav. Kocifaj, Miroslav. Kitler, Richard. Kundracik, Frantisek. *Illumination of interior spaces by bended hollow light guides: Application of the theoretical light propagation method*. Elsevier Ltd. Recebido a 29 de março de 2010, revisto em 6 de setembro de 2010 e aceite a 14 de setembro de 2010. Publicado em 2010, Bratislava, Republica Checa
- [23] Komar, Ladislav. Darula, Stanislav. *Determination of the light tube efficiency for selected overcast sky types*. Elsevier Ltd. Recebido a 17 de janeiro de 2011, revisto em 30 de agosto de 2011 e aceite a 21 de setembro de 2011. Publicado em 2011, Bratislava, Republica Checa

- [24] Mankova, L. Hraska, J. Janak, M. *Simplified determination of indoor daylight illumination by light pipes*. Slovak journal of civil engineering. Recebido a 3 de junho de 2009, aceite a 20 de outubro de 2009. Publicado em 2009, Bratislava, Republica Checa
- [25] <http://www.chatron.pt> (16-11-2011)
- [26] <http://www.polarigidoeco.com/pt/> (28-03-2012)
- [27] <http://www.polarigido.com> (16-11-2011)
- [28] Rilie, David. *Catálogo técnico Solatube. Sistema de Iluminação Natural*. CEO de Solatube, Solatube Internacional, Inc.
- [29] www.proeficiencia.com/produtos_iluminacao_natural_produtos.html (02-04-2012)
- [30] <http://www.solatube.com> (16-11-2011)
- [31] Al-Marwae, Mohammed. Carter, David. *Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances*. Elsevier Ltd. Publicado em 2005, Liverpool, UK
- [32] Lo Verso, Valerio. Pellegrino, Anna. Serra, Valentina. *Light transmission efficiency of daylight guidance systems: Na assessment approach based on simulations and measurements in a sun/sky simulator*. Elsevier Ltd. Recebido a 9 de março de 2011, revisto em 12 de agosto de 2011 e aceite a 15 de agosto de 2011. Publicado em 2011, Torino, Itália
- [33] www.etaplighting.com (26-04-2012)
- [34] Catálogo Geral 2007, EEE.
<http://material.eee.pt/multimedia/documentos/508/CANDELA09.pdf> (09-03-2012)
- [35] Teixeira, Armínio de Almeida. Apontamentos de Luminotecnia e Instalações Industriais.
http://paginas.fe.up.pt/~arminio/lumiind/NIVEIS_ILUM.pdf (04-05-2012)
- [36] Decreto Lei nº 78/2006 de 4 de Abril. Ministério da Economia e da Inovação, Portugal
- [37] www.fabor.pt
- [38] <http://www.hexasystens.com.br/produto/luximetro-digital-20-200000-lux-204-equitherm.aspx> (28-04-2012)
- [39] Teixeira, Armínio de Almeida. Apontamentos de Luminotecnia e Instalações Industriais.
<http://paginas.fe.up.pt/~arminio/lumiind/MetFU.pdf> (04-05-2012)
- [40] Cavaleiro e Silva, Armando. Malato, João José. *Geometria de Insolação de Edifícios*. Informação técnica de edifícios 5. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1969
- [41] Teixeira, Armínio de Almeida. Apontamentos de Luminotecnia e Instalações Industriais.
http://paginas.fe.up.pt/~arminio/lumiind/Ilumin_Nat_Anexo_01.pdf (04-05-2012)

Anexo A

Dados climáticos

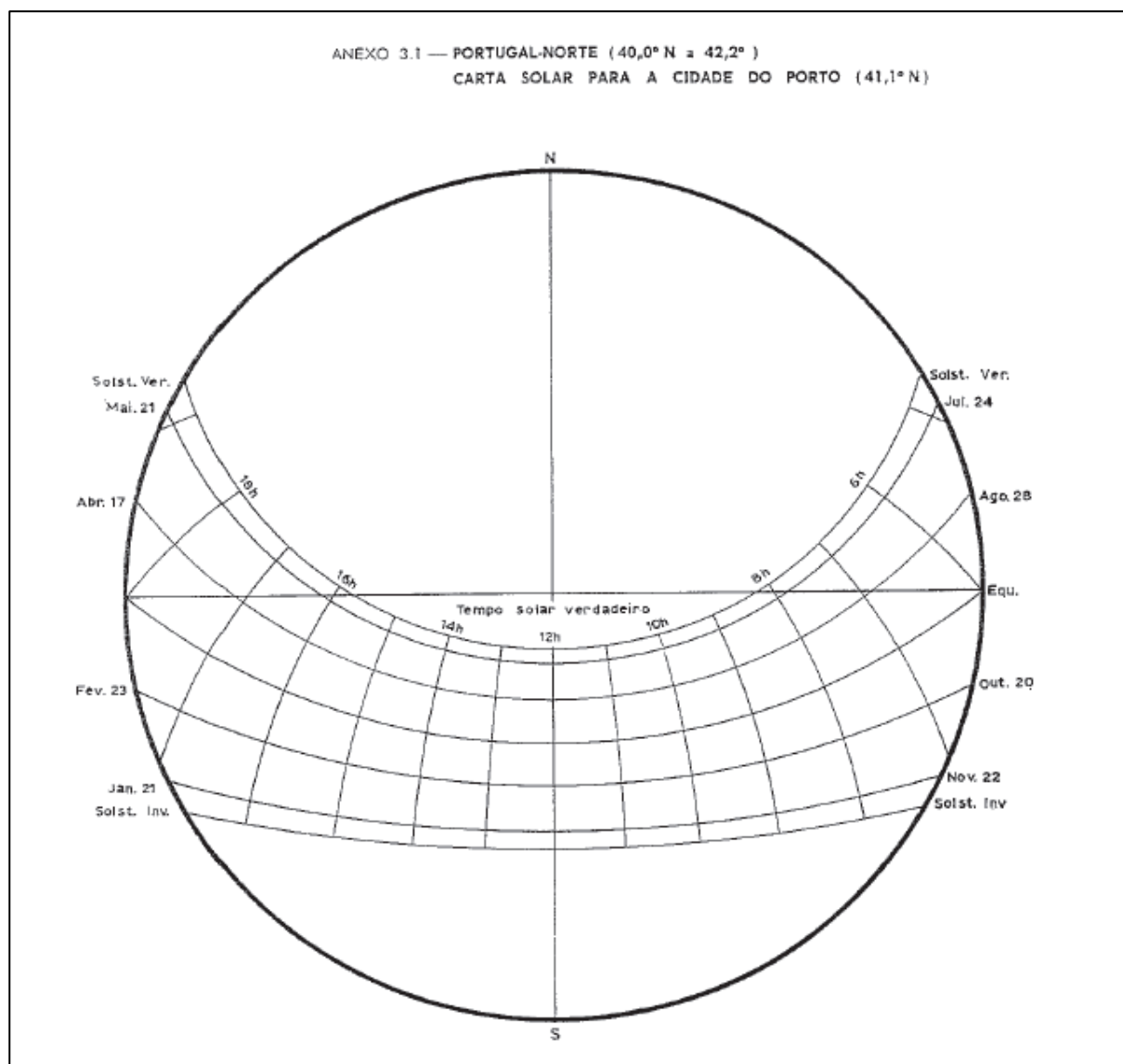


Fig. 77 – Carta solar para a cidade do Porto (41,1 N) [40]

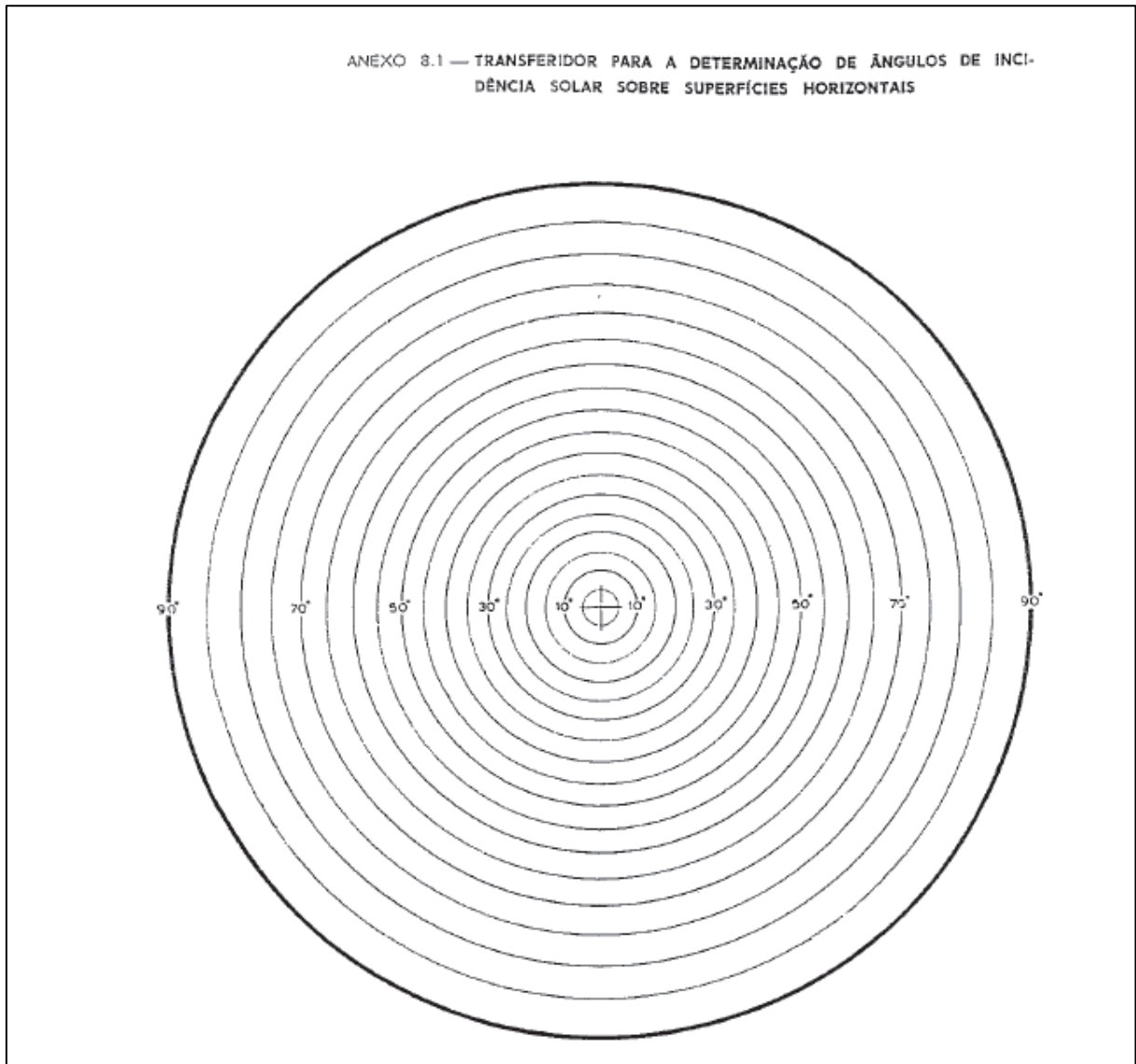


Fig. 78 – Transferidor para a determinação de ângulos de incidência solar sobre superfícies horizontais [40]

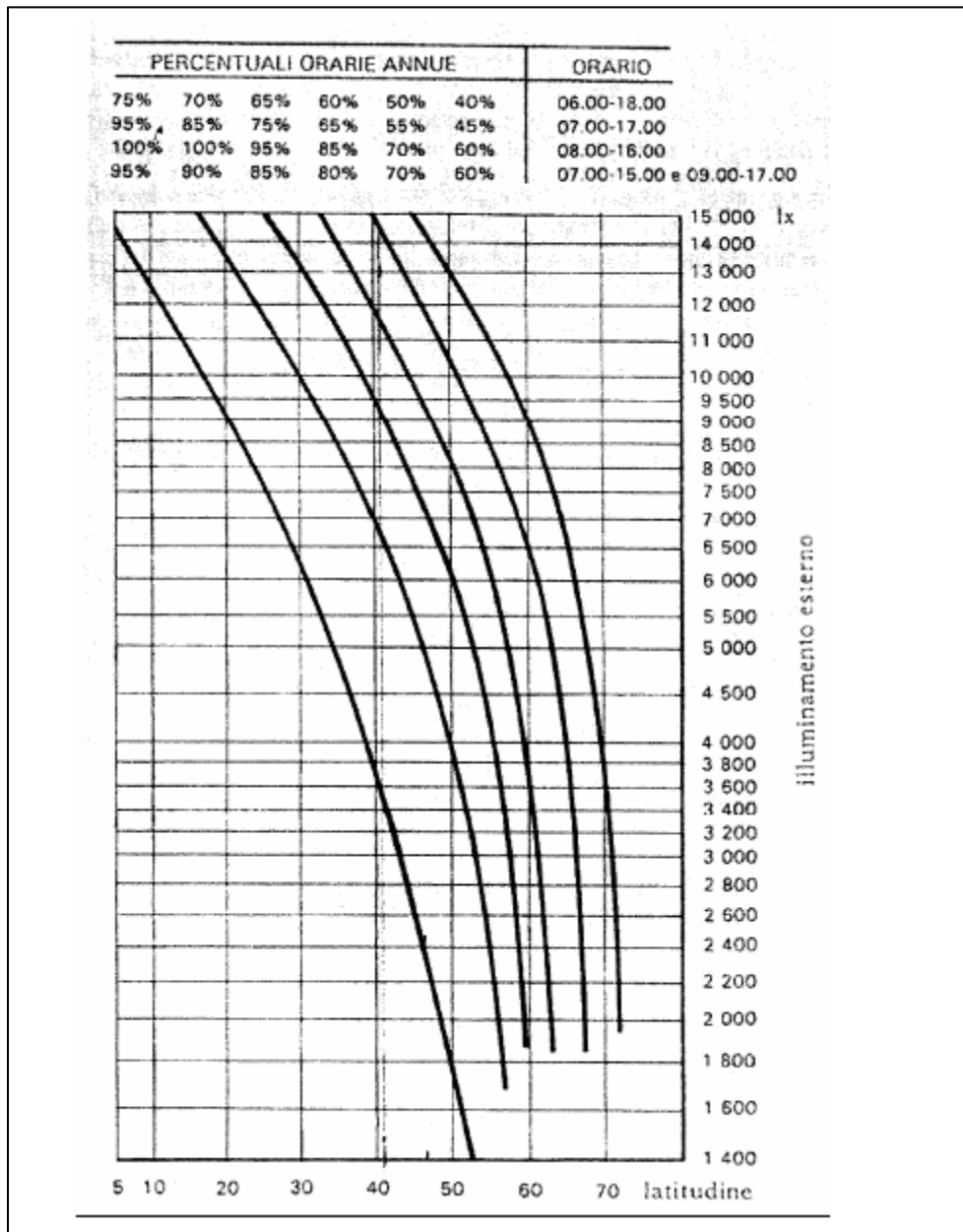


Fig. 79 – Gráfico da iluminância externa recomendada para cálculo de acordo com o CIE [41]

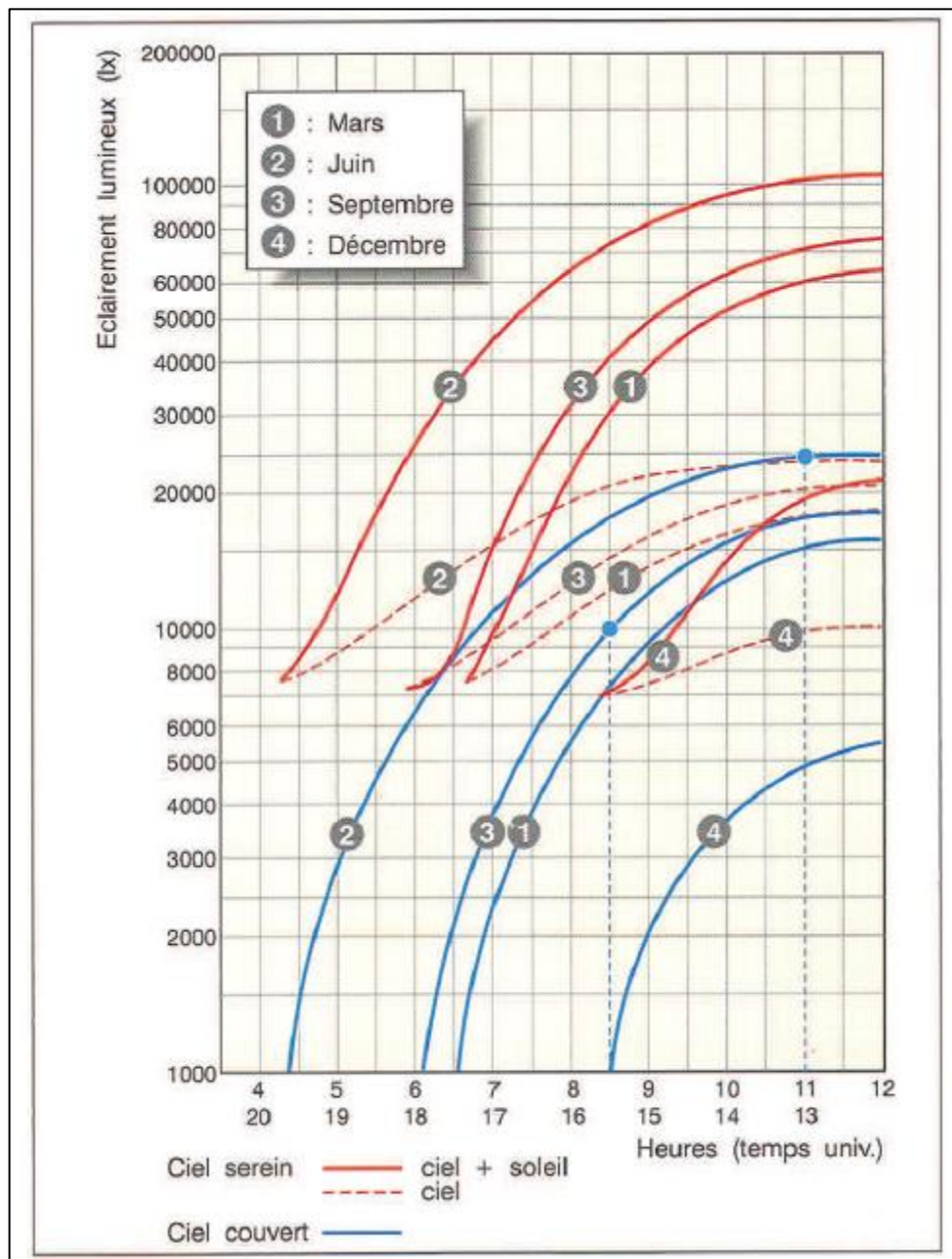
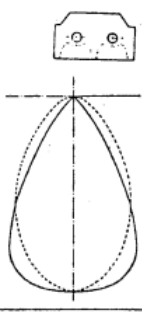


Fig. 80 – Gráfico da iluminância externa para a Bélgica de latitude 50° [7]

Anexo B

Cálculo de Iluminância - Tabelas

MÉTODO DO FACTOR DE UTILIZAÇÃO

TUBES FLUORESCENTS			FACTEUR D'UTILISATION A L'ÉTAT NEUF									Fact. de maintenance pour un nettoyage tous les		
MODE D'ÉCLAIRAGE ET TYPE DE LUMINAIRE	η %	k	$p_p = 0,7$			$p_p = 0,5$			$p_p = 0,3$			1 an	2 ans	3 ans
			p_m			p_m			p_m			δ_1	δ_2	δ_3
			0,5	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1			
Eclairage direct (Réflecteur à miroirs et tubes à réflecteur interne) 	0 + 45 + 45	0,5	0,24	0,21	0,19	0,24	0,21	0,19	0,23	0,21	0,19	A Faible salissement 0,90 0,85 0,80	C Salissement normal 0,85 0,80 0,70	B Salissement élevé × × ×
		0,6	0,27	0,24	0,23	0,27	0,24	0,23	0,26	0,24	0,22			
		0,8	0,32	0,30	0,28	0,32	0,29	0,28	0,31	0,29	0,28			
		1	0,36	0,34	0,32	0,35	0,33	0,32	0,35	0,33	0,32	C Salissement normal 0,85 0,80 0,70	B Salissement élevé × × ×	
		1,2	0,38	0,36	0,34	0,37	0,35	0,34	0,36	0,35	0,34			
		1,5	0,40	0,38	0,36	0,39	0,37	0,36	0,38	0,37	0,36			
		2	0,42	0,40	0,39	0,41	0,40	0,38	0,40	0,39	0,38	B Salissement élevé × × ×	× × ×	
		2,5	0,43	0,41	0,40	0,42	0,41	0,40	0,41	0,40	0,40			
		3	0,44	0,43	0,41	0,43	0,42	0,41	0,42	0,41	0,41			
		4	0,45	0,44	0,43	0,44	0,43	0,42	0,43	0,42	0,42	× × ×	× × ×	
		5	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44	0,43	0,44	0,43	0,43			
		Pour un luminaire placé au centre d'un local												
		0,5	0,28	0,25	0,24	0,27	0,25	0,24	0,27	0,25	0,24	× × ×	× × ×	
		0,6	0,32	0,30	0,29	0,32	0,30	0,29	0,32	0,30	0,29			
		0,8	0,38	0,36	0,35	0,37	0,36	0,35	0,37	0,36	0,35			
		1	0,41	0,40	0,39	0,41	0,39	0,38	0,40	0,39	0,38	× × ×	× × ×	

$k = \frac{l \times b}{h(l + b)}$

AAT

30

AAT

30

Fig. 81 – Método fator de utilização para iluminação artificial com rendimento de 45% [39]

Type of interior, task or activity	$\overline{E_m}$ lux	UGR _L	R _a	Remarks
Post room, switchboard	500	19	80	
Store, stockrooms, cold store	100	25	60	200 lux if continuously occupied
Dispatch packing handling areas	300	25	60	
Control station	150	22	60	200 lux if continuously occupied
2. Agriculture building				
Loading and operating of goods handling equipment and machinery	200	25	80	
Building for livestock	50	28	40	
Sick animal pens, calving stalls	200	25	80	
Feed preparation, dairy, utensil washing	200	25	80	
3. Bakeries				
Preparation and baking	300	22	80	
Finishing, glazing, decorating	500	22	80	
4. Cement, concrete, & bricks industry				
Drying	50	28	20	Safety colours shall be recognisable.
Preparation of materials, work on idles and mixers	200	28	40	
General machine work	300	25	80	For high-bay: see also clause 4.6.2.
Rough forms	300	25	80	For high-bay: see also clause 4.6.2.
5. Ceramics and glass industry				
Drying	50	28	20	
Preparation, general machine work	300	25	80	For high-bay: see also clause 4.6.2.
Enamelling, rolling, pressing, shaping simple parts, glazing, glass blowing	300	25	80	For high-bay: see also clause 4.6.2.
Grinding, engraving, glass polishing, shaping precision parts, manufacture of glass instruments	750	19	80	For high-bay: see also clause 4.6.2.
Decorative work	500	19	80	
Grinding of optical glass, crystal hand grinding and engraving, work on average goods	750	16	80	
Precision work e.g decorative grinding, hand painting	1000	16	90	T _{cp} at least 4000 K
Manufacture of synthetic precious stones	1500	16	90	T _{cp} at least 4000 K
6. Chemicals, plastics and rubber industry				
Remote operated processing installations	50		20	Safety colours shall be recognisable.
Processing installations with limited manual intervention	160	28	40	
Constantly manned work places in processing installations	300	25	80	
Precision measuring rooms, laboratories	500	19	80	
Pharmaceutical production	500	22	80	
Tyre production	500	22	80	
Colour inspection	1000	16	90	T _{cp} at least 6500 K
Cutting, finishing, inspection	750	19	80	

Fig. 82 – Níveis de iluminância recomendados para iluminação interior de acordo com CIE [35]