



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Iluminação natural em salas de aula: caso de estudo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

Gonçalo Nuno Meira de Oliveira

Orientadores

Prof. Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Prof^a. Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2016

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, ao Professor Doutor Paulo Santos e à Professora Doutora Helena Gervásio, pela sua total disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos para a elaboração deste trabalho. Foi um enorme prazer ter trabalhado com ambos.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra e a todos os professores e funcionários por me terem proporcionado todas as condições necessárias para conclusão desta etapa.

Aos meus pais e irmã por me terem sempre apoiado e encorajado sem que nunca tenham perdido a esperança, mesmo nos momentos mais difíceis e tumultuosos deste longo percurso. Foram vocês que tornam estes anos possíveis e fantásticos.

À minha namorada por todo o amor, carinho, apoio e dedicação neste último e difícil ano.

A todos os meus restantes familiares, avós, tios e primos.

Por fim, mas não menos importante, a todos os meus amigos que sempre estiveram ao meu lado.

RESUMO

Um dos grandes desafios deste milénio passa por encontrar práticas sustentáveis que possam contribuir para a melhoria das condições ambientais, de modo a garantir uma maior qualidade de vida para os habitantes do planeta. Também na área da construção civil é possível encontrar formas sustentáveis que ajudem a reduzir a pegada ecológica desta importante atividade. A iluminação natural apresenta-se como uma forma de aproveitamento dos recursos naturais que, quando bem aplicada aos edifícios, pode trazer grandes benefícios ao meio ambiente e aos seus ocupantes. As vantagens desta técnica passam por garantir um bom conforto visual nas diferentes zonas dos edifícios, não deixando de parte a sustentabilidade e eficiência energética dos mesmos. Ao mesmo tempo, a luz natural contribui para a saúde e o bem-estar físico das pessoas. No entanto, é importante avaliar as diferentes estratégias de iluminação natural a aplicar a um edifício, ainda em fase de projeto, de modo a que se adotem as soluções mais apropriadas.

Com este estudo pretende-se avaliar os aspetos qualitativos e quantitativos da iluminação natural em salas de aula. Para tal, recorreu-se à modelação virtual de uma sala de aula de referência no *software DesignBuilder* para simular as condições de iluminação natural e avaliar a iluminância e o fator de luz do dia (FLD), sendo estes valores confrontados com as recomendações da norma EN 12464-1:2011. No final é feito um estudo paramétrico onde é analisada a influência de uma claraboia e de uma pala, de diferentes tipos de vidro, das diferentes cores dos revestimentos interiores e dos tipos de céu na distribuição da iluminação natural na sala de aula de referência.

Palavras-chave: Iluminação natural, edifícios, salas de aula, simulação, *DesignBuilder*, estudo paramétrico.

ABSTRACT

One of the great challenges of this millennium is to find sustainable practices that can contribute to the improvement of the environmental conditions in order to ensure a higher quality of life for the inhabitants of the planet. In the construction sector it is also possible to find sustainable ways to help reduce the ecological footprint of this important activity. Daylighting is presented as a form of exploitation of natural resources that, if well applied to the buildings, can bring great benefits to the environment and its occupants. The advantages of this technique can ensure good visual comfort in the different areas of the buildings, without leaving aside the sustainability and energy efficiency. At the same time, natural light contributes to the health and physical well-being of the individuals. However, it is important to evaluate the different daylighting strategies to be applied to a building, in design phase, in order to adopt the most suitable solutions.

This study aims to assess the qualitative and quantitative aspects of natural lighting in classrooms. For this, was used the virtual modelling of a reference classroom in DesignBuilder software to simulate natural lighting conditions and evaluate the illuminances and daylight factor (FLD), comparing these parameters with the standard recommendations EN 12464-1: 2011. At the end it was done a parametric study where it is analysed the influence of a skylight and a shading device (overhang), different types of glass, different colours in the materials, different sky model (clear sky) in the daylighting distribution in the classroom.

Keywords: Daylighting, buildings, classrooms, simulation, *DesignBuilder*, parametric study.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação e objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	ESTADO DA ARTE	4
2.1	Luz e iluminação natural.....	4
2.1.1	A luz.....	4
2.1.2	Iluminação natural e conforto visual.....	7
2.2	Unidades e conceitos fundamentais	8
2.2.1	Fluxo luminoso (Φ_v ; Φ)	8
2.2.2	Intensidade Luminosa (I_v ; I).....	8
2.2.3	Iluminância (E_v ; E).....	9
2.2.4	Luminância (L_v ; L).....	9
2.2.5	Refletância.....	9
2.3	Métricas Luminárias	10
2.3.1	Fator de Luz do Dia (FLD).....	10
2.3.2	Autonomia da Luz Natural (ALN)	11
2.3.3	Iluminâncias Úteis da Luz Natural.....	11
2.4	Benefícios e potenciais inconvenientes	11
2.4.1	Benefícios para saúde e bem-estar	12
2.4.2	Eficiência energética	12
2.4.3	Desvantagens da iluminação natural	13
2.5	Estratégias de iluminação natural	14
2.5.1	Aberturas laterais.....	15
2.5.2	Aberturas zenitais.....	18
2.5.3	Átrios.....	19
2.5.4	Lightshelf system	20
2.5.5	Light pipe system	21
2.5.6	Painéis prismáticos.....	21
2.6	Dispositivos de sombreamento	22
2.7	Vãos envidraçados	23
2.7.1	Vidro simples	24
2.7.2	Vidros com isolante térmico.....	24
2.7.3	Envidraçados com revestimentos de baixa emissividade e espectralmente seletivos ...	24
2.7.4	“Envidraçados inteligentes”	25
2.7.5	Vidro refletante	26
2.8	Legislação e normalização	26

3	SIMULAÇÃO E MEDIÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	28
3.1	<i>Softwares</i> para simulação da iluminação natural	29
3.1.1	Daysim	29
3.1.2	DesignBuilder.....	29
3.1.3	Diva for Rhino.....	30
3.1.4	EnergyPlus	30
3.1.5	Light Analysis for Revit (LAR)	30
3.1.6	Radiance.....	31
3.1.7	Velux Daylight Visualizer.....	31
3.2	<i>Softwares</i> para modelação tridimensional	31
3.2.1	ArchiCAD	31
3.2.2	AutoCAD	32
3.2.3	Revit	32
3.2.4	Google SketchUp	33
3.2.5	Rhinoceros.....	33
3.3	Equipamentos de medição	33
3.3.1	Medidores de iluminâncias.....	34
3.3.2	Medidores de luminâncias.....	34
4	CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA	35
4.1	Descrição da sala de aula	35
4.2	Software utilizado	37
4.3	Modelação da sala de aula	38
4.3.1	Localização.....	38
4.3.2	Tipologia e tipo de atividade	38
4.3.3	Parâmetros construtivos	39
4.3.4	Modelo tridimensional	40
4.4	Resultados para a sala de referência	43
5	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	48
5.1	Tipo de vidro.....	48
5.2	Cor dos materiais de revestimento.....	51
5.3	“Tipos de céu”	53
5.4	Palas de sombreamento.....	55
5.5	Claraboia.....	57
5.6	Visão global dos resultados obtidos.....	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6.1	Conclusões	63
6.2	Trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético (EspectroLV@, 2016).	5
Figura 2.2 – Alguns conceitos relacionados com a iluminação natural (ConceitosL@, 2016).	10
Figura 2.3 – Estratégias de iluminação natural (Gherri, 2015).	15
Figura 2.4 – <i>No sky-line</i> , extensão da penetração da luz natural (SLL, 2009).	16
Figura 2.5 – Combinação de duas janelas laterais em paredes diferentes para uma melhor distribuição da iluminação natural (Boubekri, 2008).	17
Figura 2.6 – Propagação da iluminação natural num compartimento com uma janela lateral e uma superior (Boubekri, 2008).	18
Figura 2.7 – Distribuição da luz natural com o recurso a claraboias (Boubekri, 2008).	18
Figura 2.8 – Esquema de um átrio com as respetivas reflexões no interior (Baker et al., 1993).	19
Figura 2.9 – Comparação da penetração da luz natural entre uma janela lateral e a mesma combinada com uma <i>lightshelf</i> (Boubekri, 2008).	20
Figura 2.10 – Sistema de <i>light pipe</i> (Boubekri, 2008).	21
Figura 2.11 – Painéis prismáticos aplicados numa janela lateral (Boubekri, 2008).	22
Figura 2.12 – Pormenor de um vidro duplo (VidroD@, 2016).	24
Figura 3.1 – Medidores de iluminâncias (a) e de luminâncias (b) (MinoltaIM@, 2016) (LuminanceM@, 2016).	34
Figura 4.1 – Interior da Sala SC 3.6.	36
Figura 4.2 – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e localização da sala SC 3.6 assinalada com uma seta vermelha (retirada do Google Maps).	36
Figura 4.3 – Planta da sala SC 3.6 (disponibilizada pelo departamento).	37
Figura 4.4 – Interface do <i>DesignBuilder</i> (NaturalWorks@, 2016).	38
Figura 4.5 – Parede oposta à fachada da sala SC 3.6 (medidas em metros).	41

Figura 4.6 – Parede de fachada da sala SC 3.6 (medidas em metros).....	41
Figura 4.7 – Modelo <i>DesignBuilder</i> da sala SC 3.6 em planta.	42
Figura 4.8 – Modelo tridimensional que incorpora a sala SC 3.6.	43
Figura 4.9 – Vista interior da sala SC 3.6 e corredor.	43
Figura 4.10 – Distribuição da iluminação natural na Sala SC 3.6.....	45
Figura 4.11 – Seleção das áreas com o Fator de Luz do Dia abaixo dos 3,5% (a cinzento). ...	46
Figura 5.1 – Distribuição da iluminação natural com vidro de baixa emissividade.....	50
Figura 5.2 – Distribuição da iluminação natural com vidro refletante colorido.....	50
Figura 5.3 – Distribuição da iluminação natural na sala branca.....	52
Figura 5.4 – Distribuição da iluminação natural na sala negra.	52
Figura 5.5 – Distribuição da iluminação natural no dia 21 de Dezembro às 14:00 horas.	54
Figura 5.6 – Distribuição da iluminação natural no dia 21 de Junho às 14:00 horas.	54
Figura 5.7 – Modelo com a pala de 1 m.	55
Figura 5.8 – Distribuição da iluminação natural com a pala de 0,5 m de largura.	56
Figura 5.9 – Distribuição da iluminação natural com a pala de 1,0 m de largura.	56
Figura 5.10 – Modelo da sala de aula com a introdução da Claraboia 1.....	58
Figura 5.11 – Distribuição da iluminação natural com Claraboia 1.....	59
Figura 5.12 – Distribuição da iluminação natural com Claraboia 2.....	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Normas internacionais sobre iluminação natural.....	26
Quadro 4.1 – Dados geográficos dos modelos.	38
Quadro 4.2 – Propriedades das superfícies interiores.....	39
Quadro 4.3 – Propriedades dos envidraçados.....	40
Quadro 4.4 – Medidas internas da Sala SC 3.6.	40
Quadro 4.5 – Valores recomendados para a distância entre pontos.	44
Quadro 4.6 – Valores do Fator de Luz do dia para a Sala SC 3.6.	46
Quadro 5.1 – Tipos de vidro usados no estudo paramétrico.	48
Quadro 5.2 – Iluminâncias e FLD para ambos os vidros.	49
Quadro 5.3 –FLD para o revestimento branco e negro.	51
Quadro 5.4 – Iluminâncias e FLD para condições de céu aberto.	53
Quadro 5.5 – Dimensões das palas.....	55
Quadro 5.6 – Valores das Iluminâncias e FLD médio para a Pala 1 e 2.	57
Quadro 5.7 – Dimensões das claraboias e da viga.	57
Quadro 5.8 – Valores do Fator de Luz do dia para a Sala SC 3.6.	58
Quadro 5.9 – Valores das iluminâncias e FLD para todos os parâmetros do estudo paramétrico (diferenças relativas aos valores de referência assinaladas a azul).....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

É inegável que a população prefere viver com luz natural desde sempre, tendo esta preferência assumido uma importância fulcral na atualidade, em virtude da sustentabilidade ambiental se encontrar na ordem do dia. De facto, as últimas décadas serviram para despertar a consciência social quanto ao impacto direto das ações humanas no meio ambiente o que implica uma reflexão sobre a marca que os projetos futuros irão deixar no planeta bem como a seleção de opções que impliquem o mínimo impacto no meio ambiente. No entanto, a predileção por técnicas de iluminação natural não se prende apenas com a sustentabilidade ambiental. A par desta sustentabilidade verifica-se uma sustentabilidade financeira atrativa aliada às poupanças nos consumos energéticos assim como um crescimento sustentado das condições de iluminação adequada que possibilitam o desenvolvimento das atividades a que os edifícios se destinam, de forma segura e produtiva, aumentando o conforto visual e o bem-estar, diminuindo desta forma o risco de potenciais doenças visuais, fadigas ou depressões.

Perante esta exposição sumária, que denota preocupações com o facto da grande fatia de energia que se destina a edifícios provir de fontes não renováveis (v.g. em Portugal, verifica-se que, em 2009, a eletricidade foi a principal fonte de energia consumida, representando 38,1% do total de energia consumida) (INE & DGEG, 2011). Sem dúvida que este tema comporta novas exigências e desafios, que acarretam, sobretudo para os investigadores, uma profunda reflexão e problematização sobre a criação e a aplicação de bons princípios da tecnologia da luz do dia bem como reclama uma maior atenção para a necessidade de criação de um guia capaz de auxiliar o projetista na tarefa de selecionar os melhores meios para a obtenção de resultados seguros, económicos e viáveis, não se podendo ignorar o peso das opções normativas disponibilizadas nesta temática.

Reclamam-se em suma investigações cuidadosas e precisas sobre a iluminação natural tendo em conta que a maior parte do tempo de vida da generalidade dos cidadãos é passada dentro de edifícios, o que demonstra a importância de uma iluminação adequada às tarefas que serão especificamente desenvolvidas nos mesmos, para que os sujeitos executem as suas tarefas com um maior conforto visual, de forma melhorada do ponto de vista qualitativo e quantitativo, dando resposta às necessidades físicas e biológicas do ser humano, como por exemplo aos biorritmos humanos.

Além das considerações que se prendem com o bem-estar e com a saúde dos beneficiários dos projetos de iluminação natural, há que ter igualmente em conta as características climáticas do

país onde se localizam os edifícios, de modo a que se verifique uma diminuição real do recurso a sistemas de iluminação artificial.

O grande desafio da iluminação natural em edifícios passa por garantir um sistema de iluminação adequado às tarefas a que o edifício se destina, sem que se caia no erro de proporcionar um ambiente visual desagradável, com implicações ao nível do desconforto visual dos ambientes, podendo no limite gerar situações de encadeamento e sobreaquecimento. Sempre que este cenário se verifique os ditames da boa iluminação natural estarão comprometidos, podendo gerar efeitos danosos tanto para o ser humano como para o edifício e consequentemente para o ambiente.

Os edifícios destinados a práticas educacionais, mais especificamente as salas de aula, acabam por ter uma grande importância na temática da iluminação natural, pois os requisitos de conforto visual e consequentemente de iluminação que esta atividade comporta devem ser tidos em conta ainda numa fase inicial de projeto, de maneira a serem tomadas e aplicadas as melhores soluções, tendo em vista o bem-estar e comodidade visual dos seus utilizadores.

1.2 Motivação e objetivos

As preocupações ambientais e os benefícios das técnicas de iluminação natural facilitaram a tarefa de selecionar este tema para concluir os estudos no Mestrado em Engenharia Civil, na Especialidade de Construções. Assiste-se cada vez mais à preferência de métodos sustentáveis e viáveis, sendo esta tendência transversal a todas as áreas. Por tal, também a construção civil tem o dever de se modernizar, apresentando projetos sustentáveis, sob pena de agirmos negligentemente. Para o sucesso desta modernização na área da construção civil é imprescindível a elaboração de um modelo racional que permita a elaboração de projetos energeticamente sustentáveis. O esforço académico que se encontra nesta dissertação constitui um pequeno contributo para travar o recurso a energias não renováveis, tendo em conta as condições climáticas existentes em Portugal, que nos permitem o usufruto do Sol como fonte natural e inesgotável.

Um dos objetivos da presente dissertação é a análise do estado da arte, de forma crítica e cuidadosa, de modo a que se proporcione uma reflexão sobre a viabilidade, as vantagens e as desvantagens da iluminação natural bem como dos sistemas e dos *softwares* capazes de auxiliar o projetista na seleção das melhores técnicas de iluminação natural. No entanto, esta análise crítica carece de um estudo prático para averiguar a eficácia e a viabilidade dos projetos de iluminação natural em salas de aula. Por tal, o objetivo primordial consiste na elaboração de uma metodologia que terá por objeto um caso de estudo, a partir do qual será feita a modelação e a simulação da distribuição da iluminação natural, por intermédio do *software DesignBuilder*. Este passo permitirá absorver conhecimentos na utilização das ferramentas de simulação, o que constitui igualmente um motivo para a escolha do tema.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, sendo que neste primeiro capítulo é feito o enquadramento do tema. São ainda descritas as motivações e os objetivos do mesmo, bem como a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, correspondente ao estado da arte, é analisada a temática da iluminação natural, essencial para o desenrolar deste trabalho, abordando-se os conceitos, as métricas, os benefícios e inconvenientes, as estratégias usadas na captação da luz natural, os dispositivos de sombreamento, o tipo de vidros e ainda as normas relacionadas com a mesma.

O terceiro capítulo trata da parte da simulação e da medição da iluminação natural, mais especificamente, os *softwares* mais usados nos dias de hoje capazes de simular a distribuição da iluminação natural no interior dos edifícios. São ainda identificados os equipamentos usados na medição de alguns parâmetros relacionados com esta temática.

No quarto capítulo é descrito o caso de estudo e a metodologia utilizada. É referida a localização, a tipologia, o modelo tridimensional da sala de aula e analisados os resultados da distribuição da iluminação natural para a mesma.

No quinto capítulo é efetuado um estudo paramétrico que tem por base a sala de aula descrita no capítulo anterior. Neste caso é analisada a influência do tipo de vidro e das condições de céu (e.g. encoberto e limpo), da cor dos materiais de revestimento, da introdução de uma claraboia e de uma pala horizontal na distribuição da iluminação natural da sala de aula.

Para finalizar, no sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, assim como algumas sugestões de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Luz e iluminação natural

Neste Capítulo empenham-se esforços no sentido de apresentar as propriedades e as fontes de iluminação natural, sem deixar de parte a reflexão sobre a ponderação entre dois aspetos de grande relevância nesta temática: a conciliação de uma iluminação natural suficiente que permita as tarefas para as quais se destinam o edifício a projetar, sem deixar de parte o conforto visual necessário, culminando o projeto num ambiente visual agradável.

É indiscutível que a luz natural se encontra intimamente ligada com o bem-estar e a saúde, sendo considerada uma “dádiva da natureza” por muitos autores. Contudo, é indispensável alcançar um nível cómodo de iluminação natural, sendo este um caminho exigente, que não dispensa a atenção às métricas que se aprofundarão mais tarde, oportunamente, nesta dissertação. Muitas vezes, este “acordo entre eficiência visual, conforto visual e satisfação estética” (Hopkinson et al., 1975) comportam custos financeiros, que exigem uma ponderação entre o projeto ideal e os valores económicos envolvidos, uma vez que só assim estará assegurada a sustentabilidade do projeto (Hopkinson et al., 1975).

2.1.1 A luz

A luz “é uma manifestação visual da energia radiante, e conseqüentemente, está intimamente relacionada com as sensações humanas” (Hopkinson et al., 1975).

Denota-se na definição acima apresentada que existe uma diferenciação entre os aspetos subjetivos e a medição objetiva da luz. De facto, basta observar na Figura 2.1 o espectro de radiações eletromagnéticas, para concluir que apenas uma parte das radiações são visíveis ao olho humano. Resta mencionar que os objetos são visualizados pelo seu brilho e pela sua cor, mais rigorosamente pelas diferenças de brilho e de cor. Enquanto o primeiro “é uma função da quantidade de luz recebida pelos olhos” (Hopkinson et al., 1975), a cor relaciona-se com a distribuição de comprimentos de onda da luz. Desta forma, um objeto pode ser fonte de luz primária ou fonte de luz secundária, quando necessite de receber luz de uma fonte primária, de modo a que o seu brilho resulte de uma reflexão de luz, sendo que o melhor exemplo para apontar como fonte de luz primária é o sol. “A energia radiante visível mede-se pelo ritmo de transferência de energia avaliada em termos do seu efeito sobre o sentido visual humano médio” (Hopkinson et al., 1975), exprimindo-se este fluxo luminoso em lumens. Já os lumens por unidade de área exprimem a distribuição de luz sobre determinada superfície, designando-se de iluminação. Por sua vez, a intensidade luminosa da fonte resume a propriedade de uma fonte

emitir luz num dado sentido. Ambos os conceitos supramencionados, iluminação e intensidade luminosa da fonte, relacionam-se por intermédio da lei da distância, “segundo a qual a iluminação de uma superfície normal ao sentido de propagação de uma fonte pontual, é dada pelo quociente entre a intensidade da fonte nesse sentido e o quadrado da distância à fonte” (Hopkinson et al., 1975).

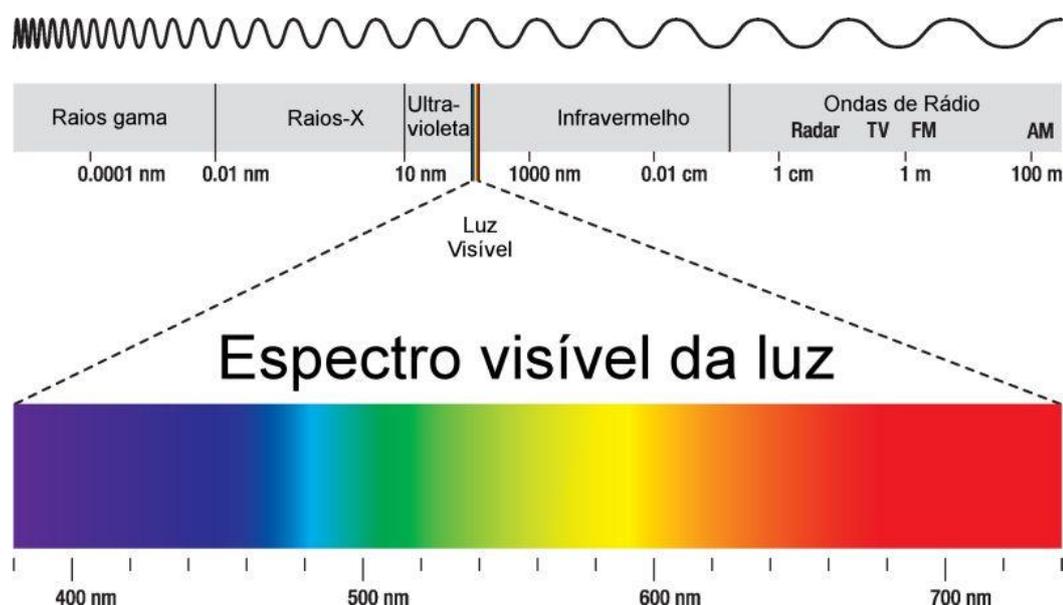


Figura 2.1 – Espectro eletromagnético (EspectroLV@, 2016).

Resumidamente, a iluminação, isto é o fluxo luminoso distribuído em determinada superfície, não se manifesta visualmente, terá de haver reflexão pela superfície para os olhos. É o brilho que resulta deste fluxo luminoso que fará a nossa visão responder ao estímulo (Hopkinson et al., 1975).

Acrescente-se que o comprimento de onda da radiação influencia a forma como apreciamos a luz com diferentes cores. A cada um destes comprimentos corresponde um determinado número de fótons, sendo que estes transportam diferentes quantidades de energia. A sensibilidade dos olhos varia com cada cor, atingindo o seu ponto máximo na radiação amarela/verde (Martins, 2010).

Porém não são apenas as cores que correspondem ao comprimento de onda que acarretam alterações significativas para a iluminação natural. Os objetos que se interpõem na direção da luz, perturbando a direção da luz e criando sombras, contribuem igualmente para diferentes formas de iluminação natural (Hopkinson et al., 1975).

- **Fontes de luz natural**

A luz proveniente do sol é a fonte de luz natural essencial, embora seja a luz do sol que se difunde na atmosfera, enquanto luz do céu, a fonte principal de iluminação natural de interiores.

A luz do céu “caracteriza-se por, num ponto não obstruído, provir de todo o hemisfério celeste, originando uma iluminação difusa” (Martins, 2010). Os fatores que caracterizam a luz do céu são idênticos aos da luz solar, diferenciando-se não por mudar continuamente de direção, mas pela distribuição de luminância. Por sua vez, a luz do sol origina uma iluminação direta e muito mais intensa, com luminâncias superiores à luz do céu. Esta fonte de luz emite aproximadamente seis bilhões de lúmens por metro quadrado, sendo que apenas 134.000 lux alcançam a atmosfera (20% deste valor é absorvido e 25% são refletidos para o espaço) (Coutinho, 2009). Logicamente, a quantidade de luz que penetra o interior de determinado compartimento depende do tamanho/posição das janelas bem como da luminância do céu e das decorações interiores.

O movimento aparente do sol no céu, em função da hora do dia assim como da estação do ano em que nos encontramos e da posição do edifício (latitude, longitude e orientação) na Terra, apresenta-se como o principal responsável para a variação da luz natural, além de outras causas secundárias, como a junção e a passagem de nuvens de vapor de água ou pó, entre outras. A nebulosidade, ou seja, a obstrução pelas nuvens, contribui também para o carácter dinâmico da luz solar (Hopkinson et al., 1975).

Face ao exposto, os cálculos de iluminação natural deverão separar a luz direta do sol da luz do céu, tratando cada uma das fontes de modo distinto, já que o Sol se apresenta como uma fonte concentrada, além de ser igualmente uma fonte luminosa pontual, ao invés o céu consiste numa fonte grande e difusa com uma distribuição de luminância variável. É portanto, imperativo que o projetista possua informações sobre a iluminação direta do sol bem como da quantidade e distribuição de luminância do céu, relativas e absolutas e valores absolutos da iluminação do céu de modo a que se realizem todos os cálculos que a iluminação natural implica (Hopkinson et al., 1975).

- **Iluminação interior**

Parte da luz natural proveniente do sol atravessa a atmosfera na forma de radiação solar direta, sendo apelidada por Luz Direta. A quantificação da luz direta é determinada através da posição do sol assim como da quantidade de luz refletida em determinada superfície, sendo que o movimento solar aparente resulta dos movimentos de translação e rotação da Terra (Coutinho, 2009). O grande problema da luz solar direta prende-se com o facto de esta iluminar somente uma parte do compartimento, criando contrastes entre a zona iluminada e a zona não iluminada, proporcionando risco de encadeamento e sobreaquecimento, revelando como é vantajoso uniformizar a iluminação.

Ao invés, a luz solar ao atravessar a atmosfera difunde-se pelos gases que a compõem bem como pelo vapor de água e partículas, originando variações na composição espectral denominada por Luz Difusa (Martins, 2010). Esta estirpe de luz depende em grande medida das condições atmosféricas e caracteriza-se por ser homogênea, geralmente representada por uma meia esfera,

designada por abóbada celeste. Não obstante, a luz difusa apresenta características de difícil controlo como a intensidade, disponibilidade e cor (Coutinho, 2009). Perante estas variações climáticas e atmosféricas, a CIE “*Commission Internationale de l’Eclairage*” (1994), citada por (Castanheira, 2012), estabeleceu três padrões de céu que servem como referência para a distribuição das iluminâncias do céu. Na hipótese de estarmos com céu limpo, encontrando-se o céu azul, sem nuvens e com o Sol visível, “a luminosidade varia tanto no horizonte como no zénite, dependendo também da posição do Sol, onde a zona mais próxima deste chega a alcançar uma intensidade luminosa 40 vezes maior que na linha do horizonte” (Coutinho, 2009). Já no caso de estarmos perante céu intermédio, isto é, entre céu limpo e céu encoberto, a CIE não recomenda nenhum dos modelos em vigor (Coutinho, 2009). Segundo Alves (2008) o céu encoberto é representado por condições de céu completamente encoberto por nuvens escuras e espessas.

A Luz Solar Indireta, recebida no interior dos espaços depois de refletida no solo e nos edifícios exteriores é também uma fonte de luz extremamente útil para a iluminação interior. Resta aludir que existem três variáveis fundamentais que contribuem para a luz no interior do espaço: a Componente Celeste, a Componente de Reflexão Externa e por último, mas não menos importante a Componente de Reflexão Interna (Castanheira, 2012). Segundo (Vianna & Gonçalves, 2001), citados por Castanheira (2012), a Componente Celeste provém da abóbada celeste, variando consoante a latitude, hora e dia, tipo de céu e a orientação da fachada. Por sua vez, a Componente de Reflexão Externa advém das reflexões provocadas pelas construções em redor, sendo que a reflexão da luz obtida no ambiente pode ser maior ou menor, consoante as características das superfícies envolventes (tamanho, posição, cores, texturas). Finalmente, a Componente de Reflexão Interna ocorre através das reflexões das superfícies internas dos espaços, variando também consoante as características dos materiais utilizados nessas superfícies, de acordo com as características do espaço em si, sendo a reflexão pela superfície do teto a mais significativa (Castanheira, 2012).

2.1.2 Iluminação natural e conforto visual

A visão humana consiste num sistema complexo composto por três operações essenciais que possibilitam “ao olho transformar luz em impulsos eletroquímicos enviados ao cérebro através do nervo ótico” (Martins, 2010). Uma destas operações é a operação ótica que receciona a energia luminosa, encaminhando-a para a retina. Também a operação sensorial assume um papel importante neste processo uma vez que “transforma a imagem luminosa projetada na retina em impulsos químicos” (Martins, 2010). Falta ainda caracterizar a operação motora que “permite dirigir e fixar o olhar sobre um ponto específico”(Martins, 2010). Face ao exposto, podemos concluir que uma boa iluminação contribuirá sempre para uma boa visão, sendo indiscutível que a sensibilidade visual se relaciona com a luminância dos objetos em observação.

Não obstante o que foi dito, o brilho intenso apesar de ser um dos fatores que permite o aperfeiçoamento da visão, quando existe em demasia pode tornar-se indesejável, provocando inclusive a diminuição da acuidade visual e da sensibilidade ao contraste. Geralmente, este incómodo provocado pelo brilho intenso denomina-se por encadeamento. Estaremos perante este fenómeno quando existam “fontes de luz brilhantes, como faróis de automóveis ou a visão do sol ou de um pedaço de céu brilhante através de uma janela colocada no final de um longo corredor” (Hopkinson et al., 1975) que possam provocar “dispersão de luz no olhar e, deste modo, introduzir um «efeito de véu» sobre o campo visual, que resulta numa redução da capacidade de visão” (Hopkinson et al., 1975). Este efeito de véu ocorrerá também quando pela reflexão da janela numa mesa polida haja diminuição da acuidade visual de alguém que se encontra a trabalhar num instrumento, gerando um estado de incapacidade visual por encadeamento. Nalgumas situações poder-se-á gerar igualmente um desconforto visual por encadeamento, não havendo nestes casos uma redução direta na capacidade de visão, existindo apenas um estado de desconforto psicológico (Hopkinson et al., 1975).

Em jeito de conclusão, também a visão a par da iluminação e da distribuição de brilho implicam reflexões por parte do projetista para a obtenção de uma boa iluminação visual, revelando-se essencial para a determinação dos padrões de luz necessários num edifício discriminar as características da tarefa visual a que se destina.

2.2 Unidades e conceitos fundamentais

De maneira a haver uma melhor compreensão da temática da iluminação natural, é importante fazer referência a um conjunto de unidades e de conceitos fundamentais ligados à mesma. Seguidamente serão abordados os conceitos mais relevantes ligados a esta temática. Alguns destes estão representados e interligados na Figura 2.2.

2.2.1 Fluxo luminoso (Φ_v ; Φ)

De uma forma mais rigorosa o conceito de fluxo luminoso consiste na “grandeza derivada do fluxo energético por avaliação da radiação de acordo com a sua ação sobre um recetor seletivo cuja sensibilidade espectral é definida pelas eficácias luminosas relativas espectrais normalizadas” (Carvalho, 1986). No entanto, é possível apresentar este termo de um modo mais simplista, com vista a facilitar a sua compreensão e assimilação. Nestes termos o fluxo luminoso é considerado como sendo a quantidade de luz emitida, em todas as direções, por uma fonte luminosa (em lumens) (Coutinho, 2009).

2.2.2 Intensidade Luminosa (I_v ; I)

A intensidade luminosa corresponde ao quociente do fluxo luminoso, emitido por uma fonte e propagando-se num ângulo sólido (ângulo formado pelas linhas imaginárias irradiadas do centro de uma esfera que intersejam a sua superfície (Hunt & Pointer, 2011)) elementar numa

determinada direção. Numa linguagem mais simples este conceito corresponde à quantidade de luz emitida, numa dada direção, por uma fonte luminosa (Castanheira, 2012)

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (2.1)$$

onde:

I – Intensidade Luminosa [cd];

Φ – Fluxo luminoso – [lm];

Ω – Ângulo sólido – [sr];

2.2.3 Iluminância (E_v ; E)

A iluminância corresponde à razão entre o fluxo luminoso incidente numa dada superfície contendo um ponto, pela área dessa mesma superfície. Alternativamente, de uma forma mais prática, a iluminância traduz-se na quantidade de luz visível que incide num ponto de uma superfície, em todas as direções, acima dessa superfície. A unidade da iluminância é o Lux, ou seja, lumens por metro quadrado (lm.m^{-2}) (Carvalho, 1986)

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (2.2)$$

onde:

E – Iluminância – [lx];

Φ – Fluxo luminoso – [lm];

A – Área da superfície de incidência – [m^2];

2.2.4 Luminância (L_v ; L)

A luminância de uma superfície é a intensidade luminosa emitida por unidade de área projetada dessa superfície, numa determinada direção. Este termo prende-se diretamente com a medida física do brilho e utiliza-se geralmente para definir estímulos provocados ao sistema visual. A unidade de medida da luminância é a candela por metro quadrado (cd.m^{-2}) (Carvalho, 1986).

2.2.5 Refletância

A refletância é o quociente entre o fluxo luminoso refletido por uma superfície e o fluxo luminoso incidente na mesma. Este valor é expresso em percentagem ou num intervalo entre 0 e 1 (Hunt & Pointer, 2011).

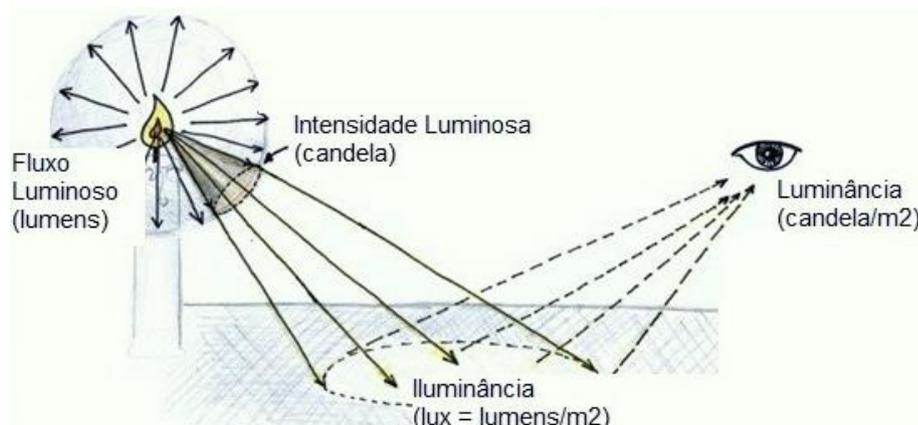


Figura 2.2 – Alguns conceitos relacionados com a iluminação natural (ConceitosL@, 2016).

2.3 Métricas Luminárias

Quando abordada a temática da iluminação natural, torna-se importante fazer a distinção entre ambientes que transmitem boas condições de iluminação natural e conforto visual aos seus ocupantes, ao longo dos diferentes períodos do dia, daqueles onde as estratégias e soluções luminárias adotadas tornam o ambiente interno mal iluminado e desconfortável aos seus utilizadores. Para tal, são utilizadas grandezas ou métricas que auxiliam os diferentes intervenientes de um qualquer projeto. Geralmente, as métricas mais usuais estabelecem uma superfície de referência para análise, denominada de “plano de trabalho”. Este consiste numa superfície horizontal a uma cota compreendida entre os 0,75 m e os 0,80 m, acima do pavimento (Santos, 2013).

Nas próximas seções irão ser descritos as grandezas e métricas de iluminação natural mais utilizadas no passado e no presente, bem como os aspetos mais e menos favoráveis de cada uma.

2.3.1 Fator de Luz do Dia (FLD)

O Fator de Luz do Dia é uma métrica amplamente usada para avaliar a iluminação natural nos edifícios e define-se como sendo o “quociente entre a iluminação num ponto de um plano interior de um compartimento e a iluminância exterior num plano horizontal desobstruído e não sombreado, sob condições de nebulosidade traduzidas pelo Céu Encoberto-Padrão da CIE” (Santos, 2014). O Fator de Luz do Dia está relacionado com a presença de luz natural num espaço interior, isto é, o valor desta grandeza aumenta com a crescente presença da mesma num compartimento.

Como vantagens desta métrica temos: a simplicidade no seu cálculo e a grande utilidade em locais onde prevaleçam as condições de céu encoberto. Em contrapartida, esta métrica não tem em consideração o controlo do encadeamento, os dispositivos de sombreamento instalados nos vãos envidraçados e ainda as mudanças nas condições temporais (Santos, 2014).

A expressão do FLD num ponto pode ser dada por:

$$\text{FLD} = \frac{E_{\text{interior}}}{E_{\text{exterior}}} * 100 \quad (2.3)$$

onde:

FLD – Fator de Luz do Dia [%];

E_{interior} – Iluminação num ponto [lx];

E_{exterior} – Iluminação exterior [lx].

2.3.2 Autonomia da Luz Natural (ALN)

A Autonomia da Luz Natural é uma das métricas inovadoras, que tem vindo a ser utilizada nos últimos anos, proposta pela *Association Suisse des Electriciens*, em 1989 (MetricasIN@, 2016) Define-se como sendo “a percentagem anual do tempo de ocupação de um espaço em que os requisitos mínimos de iluminância são satisfeitos apenas com recurso à iluminação natural” (Santos, 2014).

2.3.3 Iluminâncias Úteis da Luz Natural

Tal como o nome indica, esta grandeza permite calcular, num determinado ponto de um espaço interior, o número total de horas de luz natural “útil” incidente nesse ponto. Pode ser definida como luz natural “útil” aquela que as suas iluminâncias variam entre os 100 lux e os 2000 lux. Qualquer iluminância a cima deste valor (2000 lux) pode levar a fenómenos que causam mau estar aos ocupantes do espaço, como níveis elevados de encadeamento e de ganhos solares. Em contrapartida, os valores abaixo dos 100 lux impedem os utilizadores de realizarem as suas atividades, pois não existe iluminação natural suficiente (Santos, 2014).

2.4 Benefícios e potenciais inconvenientes

Segundo o SLL (2009) é do maior interesse o uso da luz proveniente do sol como a principal fonte de iluminação nos edifícios, derivado do aumento dos custos energéticos e da preocupação com o aquecimento global. Em Edwards & Torcellini (2002) é defendido que a iluminação natural é normalmente integrada nos edifícios com vista a satisfazer os requisitos arquitetónicos e de maneira a haver poupanças energéticas. No entanto, os benefícios decorrentes do uso da iluminação natural vão para além dos supramencionados. É de enorme importância ter em conta os aspetos fisiológicos e psicológicos. Contudo, um mau dimensionamento dos dispositivos de iluminação natural, como vidros e janelas, e um mau uso dos mesmos pode causar desconforto (encadeamento) aos ocupantes dos edifícios, bem como, custos monetários adicionais.

2.4.1 Benefícios para saúde e bem-estar

Vários estudos apontam para o facto de a luz influenciar o corpo humano de duas formas distintas. Por um lado, o modo como a luz natural incide sobre a retina afeta o metabolismo bem como o sistema endócrino e hormonal. Por outro lado, a interação da luz com a pele produz vitamina D, através do processo de fotossíntese (Boubekri, 2008).

Do ponto de vista dos benefícios físicos é relevante mencionar que a luz natural é um importante estimulante para o sistema visual e para o sistema circadiano humano. O desempenho de tarefas limitadas pela visibilidade está relacionado com os estímulos que a tarefa apresenta ao sistema visual e o estado operacional desse mesmo sistema. Sendo assim, a iluminação natural tem a capacidade de maximizar o desempenho visual, pois pode ser entregue em grandes quantidades e com um espectro que garante uma excelente reprodução de cor (Boyce, Hunter, & Howlett, 2003). Segundo Boyce et al., (2003) para evitar a interrupção do sistema circadiano humano, é necessário haver uma exposição à luz proveniente do sol durante dia, e, por contrapartida, uma baixa exposição durante o período noturno. Sendo que a performance nas atividades que requerem uma componente visual ou não-visual é afetada pela perturbação deste sistema. É ainda sabido que a luz natural desempenha um papel importante na produção de vitamina D. Boubekri (2008) afirma que a luz proveniente do sol é essencial para a espécie humana, visto que é um fator indispensável na produção deste tipo de vitamina. Problemas de saúde como desgaste ósseo, diferentes formas de cancro, hipertensão arterial, distúrbios no sistema imunológico, esclerose múltipla, artrite reumatoide e diabetes podem ser causados ou agravados por níveis baixos de vitamina D no corpo humano, derivados de uma inadequada exposição à luz solar (Boubekri, 2008).

Psicologicamente, uma exposição adequada à luz natural provoca melhorias na atitude e no bem-estar das pessoas. Inúmeros estudos demonstram que a luz natural melhora as vendas de produtos, o aproveitamento escolar dos alunos, a produtividade dos trabalhadores e as taxas de recuperação dos doentes (Rogers & Goldman, 2006).

2.4.2 Eficiência energética

A crise energética, na década de 70, levou a um crescente interesse na conservação e no uso de energias renováveis, como a energia solar. Com o uso excessivo de combustíveis fósseis como o petróleo e o gás natural para a produção de eletricidade, começou a haver a preocupação de utilizar a energia solar como fonte alternativa, com vista a satisfazer as demandas energéticas dos edifícios (Boubekri, 2008).

Do ponto de vista da eficiência energética, a iluminação natural pode oferecer relevantes poupanças energéticas devido à redução da eletricidade usada para iluminação e no aquecimento/arrefecimento de espaços. Os ganhos solares durante os períodos de arrefecimento e aquecimento podem ser controlados, conforme conveniente, por intermédio de sistemas de controlo de iluminação, como as janelas (Rogers & Goldman, 2006)

Conforme é defendido por Santos, (2014) “O aproveitamento da iluminação natural nos edifícios, e em particular naqueles com ocupação predominantemente diurna, pode contribuir para a sua eficiência energética desde que sejam corretamente avaliadas as consequências energéticas desse aproveitamento”. Os sistemas utilizados para proporcionarem a entrada de luz natural nos edifícios devem ser cuidadosamente pensados e dimensionados, de maneira a que não tenhamos outro tipo de problemas decorrentes de uma má gestão e planeamento. É comum encontrar edifícios modernos com a iluminação elétrica a funcionar na sua potência máxima ao longo de grande parte dos períodos de utilização do mesmo. Isto resulta de uma má articulação das estratégias de aproveitamento da iluminação natural, de controlo da radiação solar, da iluminação artificial e de encadeamento. A conjugação destes pontos pode levar a gastos energéticos adicionais e desnecessários (Santos, 2014).

É ainda importante referir que ao serem planeadas as medidas de eficiência energética na iluminação das edificações é importante ter em conta a iluminação natural e a iluminação artificial, tanto individualizadas como a conjugação de ambas (Santos, 2014). Segundo Arquitectos, (2001) citado em Castanheira, (2012) a combinação dos sistemas de iluminação natural com os de iluminação artificial podem levar a poupanças no consumo energético na ordem dos 30 a 50%, e em certos casos podem mesmo chegar aos 60 e 70%.

2.4.3 Desvantagens da iluminação natural

Quando falamos das problemáticas relacionadas com a iluminação natural é importante, numa primeira fase, fazer referência aos cuidados a ter aquando da exposição à luz natural, pois ambos os temas estão bastante relacionados. Quando essa exposição é feita durante longos períodos de tempo o corpo humano pode estar sujeito a danos na pele e nos olhos. Este tipo de riscos são dramaticamente reduzidos quando a componente ultravioleta da luz natural atravessa o envidraçado (Boyce et al., 2003).

Sendo que a iluminação natural é apresentada aos edifícios por intermédio de dispositivos, como vidros e janelas, esta pode causar problemas visuais, térmicos, energéticos e de privacidade. Alguns dos principais impactos (negativos) causados pela iluminação natural nos edifícios são as perdas térmicas através dos vãos envidraçados (nos períodos frios) e os ganhos solares excessivos (nas estações quentes), sendo que estes podem originar desconforto térmico e/ou consumos adicionais em AVAC (Santos, 2014). Em SLL, (2009) é defendido que a iluminação natural pode causar problemas como brilho e reflexos, perturbando assim o quotidiano dos seus ocupantes. É também abordado por este autor a questão da privacidade. Segundo o mesmo este tipo de problema é mais evidente nos edifícios com as fachadas compostas maioritariamente por vãos envidraçados, sendo que os seus utilizadores acabam por fechar completamente as cortinas, ou outros sistemas de sombreamento, tendo depois de recorrer ao uso de iluminação artificial.

É essencial haver um cuidado na fase de projeto dos edifícios para que possam ser minimizados os problemas relacionados com a temática da iluminação natural, pois, caso não haja uma boa planificação e uma boa execução, os impactes decorrentes deste tipo de soluções construtivas poderão ser bastante prejudiciais para os utilizadores dos edifícios e adicionar aos mesmos consumos energéticos desnecessários. Ainda assim, quando bem aplicada e combinada, a iluminação natural pode trazer grandes benefícios para os edifícios e para os seus ocupantes. (SLL, 2009).

2.5 Estratégias de iluminação natural

Conforme é defendido por Santos (2014), relativamente ao conforto ambiental e à eficiência energética nos edifícios, a temática da iluminação natural está fortemente ligada com parte arquitetónica. É de uma enorme importância conseguir integrar as estratégias de iluminação natural nas fases mais iniciais do projeto do edifício, de modo a garantir as melhores condições de iluminação natural no interior de cada compartimento. Com isto, vamos proporcionar maiores níveis de satisfação e melhores condições de uso aos ocupantes dos mesmos.

Como parte da estratégia energética Europeia e das políticas de redução do uso de combustíveis fósseis é do maior interesse encontrar soluções que incorporem o uso de energias renováveis (Eur-lex, 2010). Dispositivos como as janelas têm um grande impacto nos consumos energéticos e no ambiente interior dos edifícios. Por exemplo, janelas com grande área podem proporcionar a entrada de mais luz natural num determinado compartimento, o que é bom, mas por outro lado podem causar desconforto visual aos seus ocupantes e ganhos ou perdas excessivas de calor (Vanhoutteghem, Skarning, Hviid, & Svendsen, 2015). Assim, é importante encontrar um equilíbrio entre o conforto térmico, a eficiência energética e a disponibilidade de luz, aquando da aplicação de estratégias de aproveitamento da luz natural. Com isto é importante criar um ambiente luminoso agradável sem que se comprometa o desempenho térmico e energético global dos edifícios (Santos, 2014).

As estratégias de iluminação natural podem ser divididas em dois grandes grupos. O primeiro é composto pelas aberturas laterais, onde a luz natural entra pelos dispositivos presentes na fachada lateral dos edifícios, iluminando o espaço interior. O exemplo mais simples deste tipo de estratégia é a janela. O segundo grupo é composto pelas aberturas zenitais, onde a luz natural entra pelos dispositivos que se encontram no topo do edifício, iluminando o espaço interior. O exemplo mais básico deste tipo de sistema é a claraboia (Boubekri, 2008). É também importante fazer referência a outros tipos de estratégias de iluminação, tais como: átrios, *lightshelves systems*, painéis prismáticos e *light pipes*. De seguida vai ser feita uma exposição mais detalhada de cada uma das estratégias a cima mencionadas.

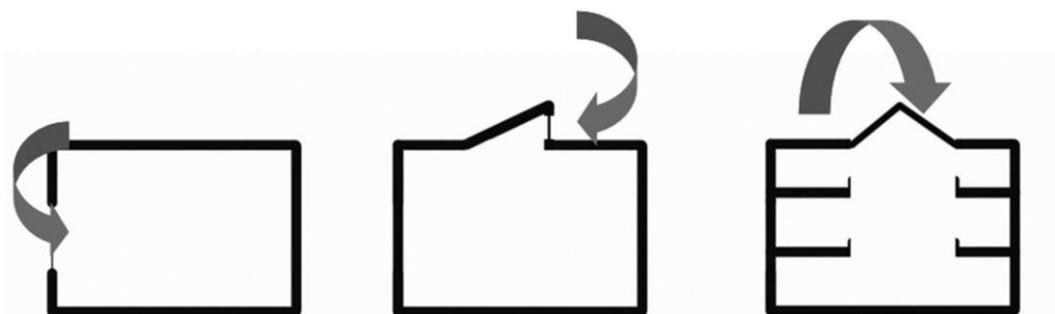


Figura 2.3 – Estratégias de iluminação natural (Gherri, 2015).

2.5.1 Aberturas laterais

Treado et al (1984) citado em Acosta et al. (2015) afirma que as janelas são dispositivos essenciais na arquitetura de um edifício, uma vez que representam o recurso mais básico para a presença de luz natural no interior do mesmo. Uma vez bem dimensionadas, podem trazer melhorias no conforto térmico e visual, bem como significativas poupanças energéticas (Li, 2010).

As janelas são aberturas na fachada de um edifício, que permitem a ligação entre o exterior e o interior. Estas possibilitam trocas luminosas, térmicas e acústicas mas também ventilação natural (Baker, Fanchiotti, & Steemers, 1993).

Uma janela pode ser caracterizada pelo seu tipo, tamanho, forma, posicionamento e orientação. Relativamente ao tipo, podemos ter janelas dimensionadas com o propósito de satisfazer e melhorar as condições de iluminação natural ou até mesmo janelas para ventilação natural. Quanto ao tamanho, estas podem ser classificadas consoante a área da sua superfície (pequenas, $<0,5 \text{ m}^2$; médias, entre $0,5$ e 2 m^2 ; grandes, $>2 \text{ m}^2$) ou pela razão entre da área total das janelas com a área total do compartimento ou fachada onde estão inseridas (%). A forma de uma janela influencia a distribuição da luz natural no espaço iluminado, as condições de visualização e a ventilação natural. Assim, podem ser classificadas (relativamente à sua forma e relacionando a altura com o comprimento) como: janelas horizontais, janelas verticais e janelas intermédias. Este tipo de dispositivo pode ter qualquer orientação (sul, este, oeste ou norte). Quando orientadas para Sul as janelas vão proporcionar elevados níveis de luminosidade, grandes ganhos energéticos no Inverno e médios no Verão. Quando orientadas para Este ou Oeste, ambos fornecem níveis médios de luminosidade, elevados ganhos energéticos no Verão e baixos no Inverno. Janelas orientadas para Norte oferecem baixos níveis de luminosidade e baixos ganhos energéticos (Baker et al., 1993).

As janelas situadas a meia altura, apesar de serem as mais usuais, não são as que apresentam melhor distribuição de luz natural nos compartimentos. Na maioria dos casos são aplicadas pela vista que proporcionam aos ocupantes dos espaços interiores do edifício e não pela iluminação natural que proporcionam (Coutinho, 2009).

Não tão habituais, as janelas situadas na parte inferior das paredes conseguem apresentar melhores resultados na distribuição da luz solar nos espaços internos dos edifícios, em dias de céu limpo. Deste tipo de janela resulta uma iluminação proveniente da reflexão dos raios solares (Coutinho, 2009).

As janelas superiores, ou *Clerestory Windows*, são aquelas que estão inseridas na parte superior das paredes de um compartimento. De um modo geral, este tipo de solução não proporciona uma vista tão agradável para o exterior do edifício, mas apresenta melhores níveis de penetração da luz natural nos compartimentos, quando comparada com as janelas tradicionais. A penetração da luz solar através deste tipo solução não causa tantos problemas (tais como o encadeamento) como nas soluções mais usuais (janelas laterais a meia altura) pois está fora do campo de visão dos seus ocupantes. Quanto mais alta estiver a janela mais profunda será a penetração da luz no compartimento (Boubekri, 2008).

É consensual entre a maioria dos autores que a profundidade alcançada pela passagem da luz natural por uma janela lateral é de 1.5 a 2 vezes a altura da mesma, quando o seu céu não se encontra obstruído (Boubekri, 2008;SLL, 2009). Caso exista uma obstrução do céu a área afetada pela luz do dia, quando atravessa uma janela, é delimitada pela *no-sky line*, como se pode ver na Figura 2.4 (SLL, 2009).

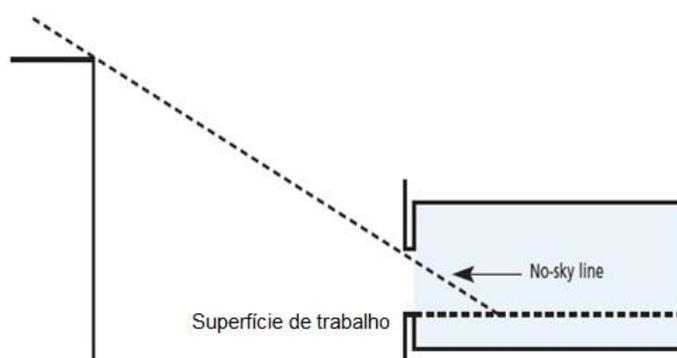


Figura 2.4 – *No sky-line*, extensão da penetração da luz natural (SLL, 2009).

Contudo, é importante ter bastante cuidado no dimensionamento e na localização deste tipo de dispositivos, pois podemos estar a prejudicar os ocupantes do edifício e a desequilibrar a componente energética do mesmo. Em termos energéticos o calor proveniente do interior dos compartimentos é dissipado através dos vidros que se encontram instalados nas janelas, sendo que estes são melhor condutores que qualquer parede convencional com a mesma área. Nos meses mais quentes, o calor excessivo proveniente da passagem dos raios solares pelas janelas pode causar desconforto aos ocupantes dos edifícios e gastos energéticos inesperados (Hopkinson et al., 1975).

A quantidade e a qualidade da iluminação natural de um compartimento não estão só dependentes da passagem da luz natural pelas janelas. Depois de ter penetrado num espaço interior, a luz natural é refletida pelas superfícies que se encontram no compartimento até uma extensão que depende das propriedades refletoras das mesmas. Se as superfícies presentes no espaço interior forem claras, a luz natural terá uma boa penetração e propagação. Caso o compartimento tenha teto, pavimento e paredes escuras dificilmente a luz natural chegará a todos os cantos do mesmo. No entanto é preciso ter atenção aos fenómenos de encadeamento, que acontecem quando temos uma grande quantidade de radiação a incidir sobre as superfícies de trabalho ou quando essa luz está a ser refletida prejudicando aqueles que estão a usufruir do espaço (Hopkinson et al., 1975).

De forma a serem evitados alguns problemas relacionados com a iluminação ineficiente dos espaços internos, podem ser adotadas algumas estratégias com o objetivo de proporcionar uma distribuição mais uniforme da luz natural nos compartimentos de um edifício. Estratégias como a construção de janelas em duas paredes diferentes (Figura 2.5) e a combinação de uma janela lateral com uma janela superior (Figura 2.6) podem trazer melhores condições de iluminação natural para o compartimento onde estão inseridas (Boubekri, 2008). É também recomendado o posicionamento de janelas perto de paredes interiores de forma a reduzir o contraste entre ambas. A inclusão de sistemas de sombreamento neste tipo de soluções pode também ajudar no controlo da radiação que as atravessa (Gherri, 2015).

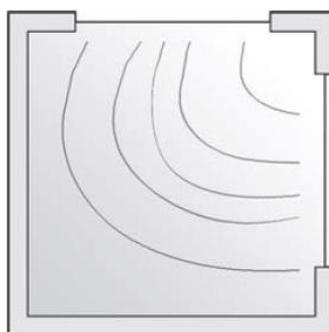


Figura 2.5 – Combinação de duas janelas laterais em paredes diferentes para uma melhor distribuição da iluminação natural (Boubekri, 2008).

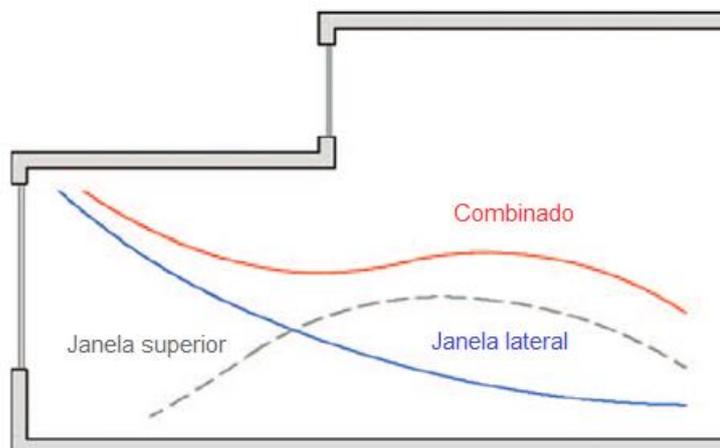


Figura 2.6 – Propagação da iluminação natural num compartimento com uma janela lateral e uma superior (Boubekri, 2008).

2.5.2 Aberturas zenitais

Uma das estratégias mais utilizadas para controlar a presença de luz natural nos ambientes interiores são as aberturas zenitais. A claraboia, como exemplo mais simples deste tipo de solução, é colocada no telhado do edifício possibilitando a entrada de luz natural no compartimento onde se insere, iluminando-o (Gherri, 2015).

Como principal vantagem deste tipo de solução tem-se a distribuição uniforme da luz natural que penetra o edifício pelo seu topo, sem que com isso se verifiquem fenómenos indesejáveis como a reflexão. Assim, é assegurada uma disponibilidade mais extensa da luz natural e consequentemente uma melhor iluminação natural do ambiente interno (Gherri, 2015).

A presença de luz natural é máxima por baixo da claraboia e vai diminuindo progressivamente à medida que a distância aumenta (relativamente à claraboia), como se pode ver na Figura 2.7.

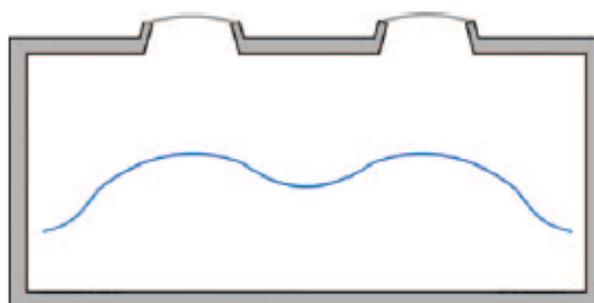


Figura 2.7 – Distribuição da luz natural com o recurso a claraboias (Boubekri, 2008).

Como outras soluções de aberturas zenitais temos o *roof monitor* e os *sawtooth systems*. Este tipo de soluções captam a luz através de aberturas verticais ou oblíquas no topo dos edifícios (Boubekri, 2008).

Os aspetos negativos destas estratégias são os fenómenos de brilho excessivo nos compartimentos e o sobreaquecimento das áreas imediatamente abaixo destas soluções. Em edifícios com muitos andares este tipo de estratégias são apenas relevantes para o andar que se encontra no topo do edifício, sendo que os demais não beneficiam da aplicação destes métodos (Gherri, 2015).

2.5.3 Átrios

O átrio (Figura 2.8) é uma técnica básica de iluminação natural que é usada nos edifícios modernos com vários andares. Este tipo de estratégia surge do contato do interior do edifício com o exterior por intermédio de um envidraçado ou outra qualquer superfície transparente (Gherri, 2015).

Conforme refere Baker et al. (1993) devem ser cumpridos dois requisitos para conseguir uma eficiente iluminação natural no átrio. O primeiro são níveis adequados de luz natural para os ocupantes do átrio e dos espaços adjacentes a este. O segundo é a presença de luz natural suficiente para o crescimento e manutenção das plantas no interior do átrio, pois estas vão ser essenciais para evitar fenómenos de reflexão da luz natural no pavimento e nas paredes.

Assim, este tipo de estratégia traz inúmeras vantagens para os utilizadores do edifício onde esta se insere. Caso seja bem dimensionado e executado o átrio proporciona níveis equilibrados de luz natural e controlo do brilho no seu interior (Baker et al., 1993). Para além disso, o contacto visual com o exterior assegura aos ocupantes do espaço um maior conforto visual e psicológico.

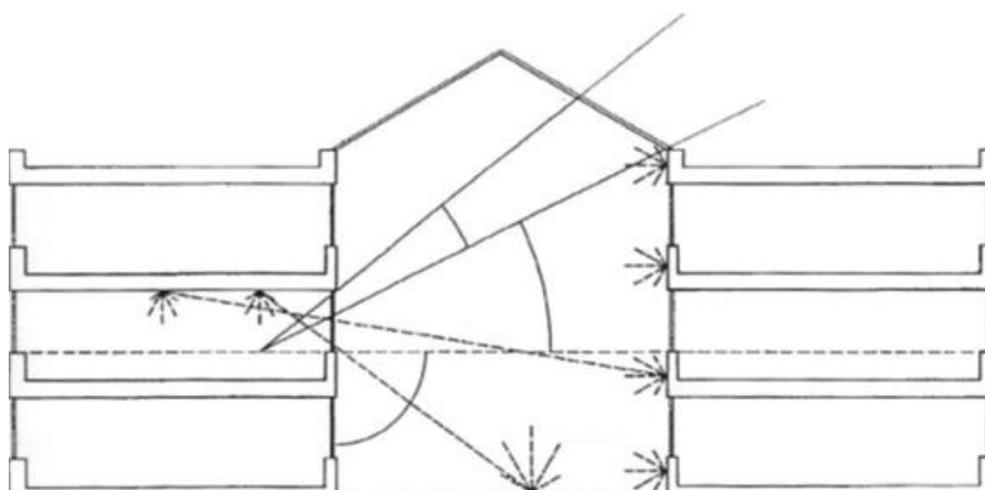


Figura 2.8 – Esquema de um átrio com as respetivas reflexões no interior (Baker et al., 1993).

2.5.4 Lightshelf system

Segundo Baker et al. (1993) as *lightshelves* ou prateleiras de luz (Figura 2.9) são elementos curvos ou planos presentes na fachada das janelas e que se encontram acima do nível de visão humano. Estes servem captar a luz natural, proveniente do exterior, e redireciona-la para os espaços mais longínquos do compartimento por reflexão. Como resultado, este tipo de solução consegue proporcionar uma melhor distribuição da luz natural pelo compartimento (Boubekri, 2008).

Este tipo de dispositivo pode ser classificado como exterior, interior e combinado. As exteriores estão aplicadas na janela e estendem-se para o exterior do edifício. As interiores são aplicadas no mesmo sítio mas prolongam-se para o interior do compartimento. Por fim, as combinadas são como a conjugação de ambos os tipos de *lightshelves* referidos em cima (Baker et al., 1993). Boubekri (2008) ainda complementa esta informação defendendo que as exteriores são mais eficientes no que toca ao sombreamento do espaço interior, quando comparadas com os dispositivos internos, mas não tão eficazes na redistribuição da luz pelo restante compartimento. Tal como os outros tipos de soluções que contribuem para uma melhor iluminação natural nos espaços interiores de um edifício, as *lightshelves* devem ser planeadas nas fases iniciais do projeto e integradas na fenestração do edifício.

Segundo Boubekri (2008) e Baker et al. (1993) a *lightshelf* divide a janela em duas partes, sendo que a parte inferior vai servir para proporcionar aos utilizadores do edifício uma vista para o exterior. A parte superior, um *clerestory window*, vai ter como principal função iluminar as partes mais longínquas do compartimento, pois a luz natural vai sendo refletida no teto do mesmo.

Inicialmente este tipo de dispositivo era concebido com o propósito de fazer o controlo da luz difusa e de servir como sistema de sombreamento. Com o avançar do tempo passou a ter muita importância no redirecionamento da luz natural para o espaço interior (Baker et al., 1993).

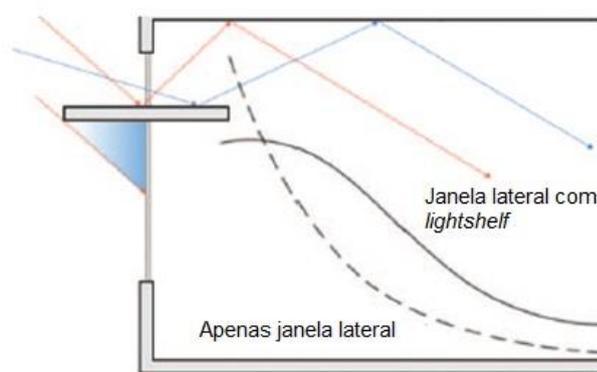


Figura 2.9 – Comparação da penetração da luz natural entre uma janela lateral e a mesma combinada com uma *lightshelf* (Boubekri, 2008).

2.5.5 Light pipe system

O objetivo deste tipo de dispositivo é a condução da luz natural para os pisos inferiores de um edifício. As componentes envolvidas nesta solução são: um coletor solar, instalado no topo do edifício e que serve para captar a radiação proveniente do sol, um concentrador que foca a radiação solar numa área menor, um sistema de transporte e outro de distribuição (Figura 2.10)

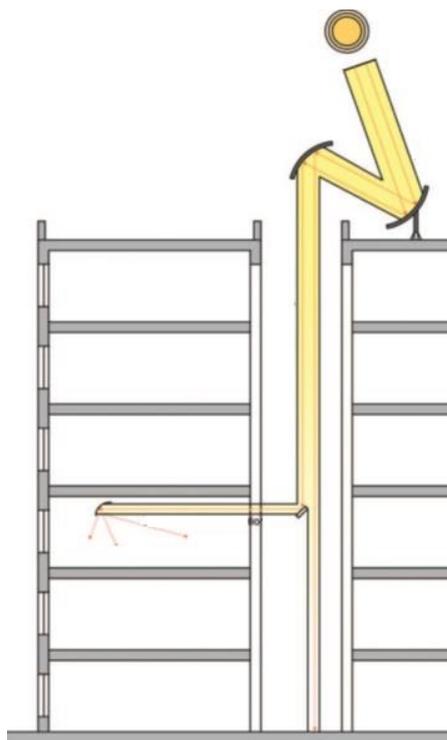


Figura 2.10 – Sistema de *light pipes* (Boubekri, 2008).

2.5.6 Painéis prismáticos

Este tipo de sistema é composto por um ou mais painéis prismáticos em acrílico que mudam a direção da luz solar incidente por reflexão e refração. Como se pode verificar na Figura 2.11 a luz incide num prisma ou numa parte angulosa e a sua direção é alterada devido à refração, sendo que de seguida a luz vai ser refletida para o teto e para a parte mais longínqua do compartimento, iluminando-a (Boubekri, 2008).

Baker et al. (1993) refere que este sistema tem como principais vantagens a translucidez dos painéis, que vão impedir fenómenos de brilho excessivo, pois deixamos de ver o céu, e as claras melhorias na iluminação natural do compartimento. Como desvantagens aponta o fato de esta não possibilitar uma vista do exterior, a complexidade na conceção dos painéis e os custos materiais deste tipo de solução. Deixando como salvaguarda que apesar de ser uma solução mais cara que outras, podem ser reduzidos custos em sistemas de sombreamento e mesmo na energia gasta para iluminação artificial dos compartimentos (Baker et al., 1993).

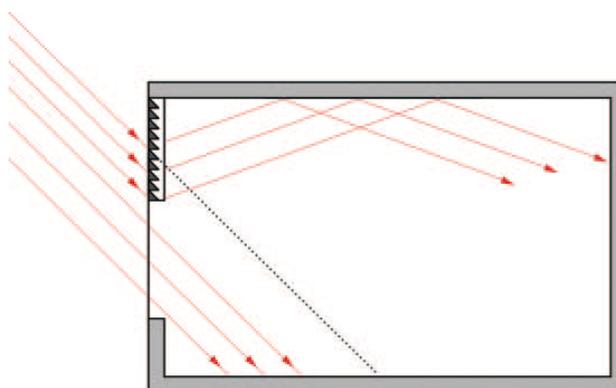


Figura 2.11 – Painéis prismáticos aplicados numa janela lateral (Boubekri, 2008).

2.6 Dispositivos de sombreamento

Segundo Bellia et al (2014) os sistemas de sombreamento presentes nos edifícios têm um grande impacto na energia gasta por estes para aquecimento, arrefecimento e iluminação, sendo que também influencia o conforto visual e térmico dos seus ocupantes. Com este tipo de dispositivos é possível controlar a entrada da luz natural pelas aberturas presentes nas diferentes fachadas dos edifícios e evitar fenómenos de desconforto para os seus ocupantes, como o encadeamento.

Citando António José Santos em Santos (2014) “Os dispositivos de sombreamento podem ter de desempenhar várias funções, como sejam: *i*) a proteção contra os ganhos solares, *ii*) o controlo do encadeamento, *iii*) o controlo e modelação da iluminação natural, *iv*) a possibilidade de obscurecimento e ocultação, *v*) a garantia de privacidade, *vi*) a possibilidade de contacto com o exterior, entre outras”.

Quanto à sua classificação, Bellia et al. (2014) e Palhinha, (2009) fazem a distinção dos dispositivos de sombreamento como sendo interiores ou exteriores e fixos ou móveis. A orientação/direção de alguns destes sistemas pode variar entre horizontal e vertical.

Palhinha (2009) defende que os sistemas de sombreamento instalados pelo interior são menos eficazes que os instalados pelo exterior, pois podem aumentar a temperatura (sobreaquecimento) do compartimento onde estão instalados, provocando desconforto aos seus ocupantes. Os dispositivos instalados pelo exterior têm um maior impacto na estética do edifício e são mais dispendiosos aquando da sua instalação e manutenção. Podem ainda, a longo prazo, reduzir de forma significativa o consumo energético dos edifícios (Palhinha, 2009). Os dispositivos instalados pelo interior permitem maiores ganhos solares (IEA, 2000). Em países com clima idêntico ao de Portugal, Palhinha, (2009) defende que os sistemas pelo exterior são mais apropriados para o sombreamento dos espaços interiores.

Os dispositivos de sombreamento fixos são elementos permanentes na fachada dos edifícios e a sua posição não pode ser alterada ao longo do tempo. Estes devem obstruir a passagem dos raios solares, no Verão, e por outro lado devem permitir a sua passagem no Inverno. Para tal,

deve-se ter cuidado no dimensionamento e no posicionamento deste tipo de dispositivos. O sucesso de um sistema fixo está dependente do posicionamento solar (varia ao longo do dia e do ano). De modo a evitar este tipo de condicionante podem ser implementados dispositivos móveis. Este tipo de dispositivos permitem a regulação da entrada de luz natural, permitindo a sua entrada quando desejável e impossibilitando a sua passagem quando não desejável. Com eles podemos obter melhorias significativas na iluminação natural dos compartimentos e um maior controlo na regulação térmica dos mesmos (Palhinha, 2009).

Conforme é defendido por Coutinho (2009), a implementação de dispositivos de sombreamento com direção/orientação horizontal deve ser feita em fachadas orientadas a Sul. Estes impedem a passagem dos raios solares que incidem verticalmente (Verão) e possibilitam a passagem dos raios solares que incidem mais na horizontal (Inverno). Nas fachadas orientadas a Oeste e a Este, a melhor orientação/direção dos sistemas de sombreamento é a vertical, sendo que desta forma vamos bloquear os raios solares aquando do nascer e pôr-do-sol.

Como dispositivos de sombreamento mais usados temos: palas horizontais e verticais, lamelas ou *brise-soleils*, malhas metálicas, portadas, venezianas, estores, telas de rolo, cortinas, toldos e a vegetação.

2.7 Vãos envidraçados

Podemos definir o vidro como sendo uma “substância dura e frágil, geralmente transparente, muito resistente à água, à luz e aos agentes químicos, que se produz pela solidificação de uma massa fundida, mais ou menos complexa, de silicatos e em parte também de boratos (...)” em Oliveira (1988).

O vidro é um elemento essencial na conceção de um edifício pois vai permitir a passagem da luz natural para o ambiente interno, bem como a possibilidade de contacto visual com o exterior. Segundo Castanheira (2012) o vidro tem uma baixa resistência ao fluxo térmico, isto é, é um bom condutor de calor. Cruz & Pequeno (2005) defendem que a transparência/translucidez, a luminosidade natural e a amplitude visual são as grandes vantagens da utilização do vidro na construção. É ainda importante referir que o vidro é um material muito desejado em termos arquitetónicos, pois apresenta uma agradável sensação visual.

Segundo Santos (2014) os tipos de envidraçados presentes no mercado, até ao final da década de 80 do século XX, eram: os vidros simples, os vidros coloridos, os vidros refletantes e os vidros duplos. Nos dias de hoje, encontra-se no mercado uma grande variedade de dispositivos envidraçados com propriedades e características capazes de satisfazer um bom desempenho energético do edifício uma boa iluminação natural no interior do mesmo. De seguida serão apresentados alguns tipos de envidraçados mais relevantes no mercado.

2.7.1 Vidro simples

Vidro transparente com superfícies praticamente planas e de espessura compreendida entre os 2 mm e os 19 mm. Este tipo de vidro é produzido em grandes quantidades e amplamente usado no passado (Mendes, 2011). O vidro simples permite a passagem de grande parte da radiação solar, tanto do espectro visível como do infravermelho (Garrocho, 2005). Com isto, poderemos ter grandes perdas ou ganhos energéticos (calor).

2.7.2 Vidros com isolante térmico

Este tipo de vidro continua a ser bastante usado na construção em Portugal. O conjunto do envidraçado é composto por duas ou mais folhas de vidro (duplo ou triplo) separadas por um espaço selado hermeticamente que pode ser preenchido por ar ou por um gás nobre (árgon, cripton ou xénon), como se pode verificar na Figura 2.12. Este espaço é ainda composto por um perfil espaçador em alumínio, um dessecante para absorver a humidade presente no espaço de ar e elementos de selagem (primária e secundária) do conjunto (Mendes, 2011).

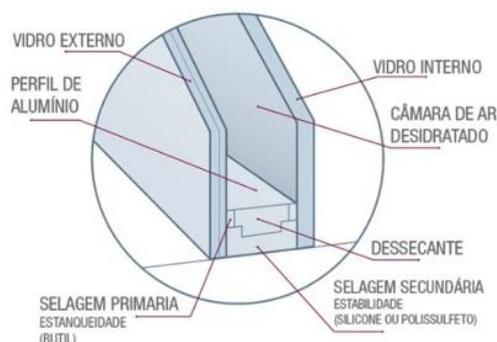


Figura 2.12 – Pormenor de um vidro duplo (VidroD@, 2016).

Conforme é afirmado por Mendes (2011) este conjunto de envidraçado apresenta uma baixa condutibilidade térmica, quando comparado com os vidros simples. Sendo assim, é possível encontrar um balanço energético satisfatório, no interior dos compartimentos, sem que com isso se aumente o consumo energético dos edifícios. A substituição do ar pelos gases nobres, no interior da caixa-de-ar, vai diminuir a condutibilidade térmica do conjunto pois estes gases são piores condutores térmicos que o ar Mendes (2011).

2.7.3 Envidraçados com revestimentos de baixa emissividade e espectralmente seletivos

Conforme é referido por Santos (2014) os envidraçados de baixa emissividade (*low-E*) começaram por ser introduzidos no mercado nos anos 80. Tendo estes um baixo coeficiente de transmissão térmica a quantidade de calor que se perde vai ser reduzida, possibilitando assim uma maior retenção do mesmo no interior do compartimento. Os envidraçados de baixa

emissividade foram desenvolvidos para serem aplicados edifícios situados em climas frios, onde predominam as necessidades de aquecimento, pois este tipo de vidro deixa passar a luz solar e retêm o calor no seu interior.

Nos anos 90, foi desenvolvido um tipo de vidro de baixa emissividade com revestimento espectralmente seletivo que pode ser aplicado em climas com necessidades de aquecimento no Inverno e arrefecimento no Verão. Quando comparado com as soluções mais tradicionais, como o vidro simples, o vidro com revestimento espectralmente seletivo pode reduzir os ganhos solares até 40% Energy (1998). Neste tipo de envidraçados “as refletâncias solares dos revestimentos baixo-emissivos (*low-E*) podem ser “manipuladas” de modo a incluírem ou excluïrem determinadas partes específicas do espectro visível ou infravermelho” (Santos, 2014). Assim, é possível “selecionar” e transmitir a radiação com comprimentos de onda desejáveis e refletir a radiação com comprimentos de onda indesejável (Santos, 2014).

Pode ainda ser feita referência aos envidraçados com baixa emissividade (*low-E*) e de baixa transmissão, ideais para climas quentes. Este envidraçado é composto por um vidro colorido com um revestimento *low-E* onde a sua refletância é aumentada. Com isto podem ser reduzidos os ganhos solares e o encadeamento aos ocupantes dos edifícios (Santos, 2014).

2.7.4 “Envidraçados inteligentes”

Segundo é afirmado por Santos (2014) este tipo de envidraçados pode ser dividido em dois grupos: o dos dispositivos passivos, que são aqueles que se vão modificar perante uma alteração das condições ambientais (temperatura e radiação solar, por exemplo) e o dos dispositivos ativos, onde é possível controlar dinamicamente as suas características óticas.

Dentro dos dispositivos passivos temos os envidraçados fotocromicos e os termocromicos. Os primeiros “modificam a sua transparência em resposta às alterações da intensidade da luz”. Os segundos “modificam a sua transparência em respostas às alterações de temperatura”. Um dos grandes problemas deste tipo de envidraçado é a incapacidade de ver para o exterior, quando estes alteram a sua transparência. Futuramente este tipo de envidraçados pode trazer inúmeras vantagens como o controlo da iluminação natural, prevenindo fenómenos de encadeamento e sobreaquecimento.

Nos dispositivos ativos é importante fazer referência aos envidraçados electrocromicos. Tal como nos envidraçados passivos, estes também podem mudar a sua transparência controlando a iluminação natural, os ganhos solares e o encadeamento nos compartimentos. A diferença desta tecnologia para a anterior passa pela maior flexibilidade no seu controlo, isto é, podem ser “operados mediante sistemas de gestão centralizados automáticos (SGCA), por um ocupante, ou simplesmente mediante termostatos ou sensores fotoelétricos”. Este tipo de tecnologia já se encontra disponível no mercado, no entanto a área dos envidraçados tem de estar compreendida entre 1 e 2 m² (Santos, 2014).

2.7.5 Vidro refletante

Este tipo de vidro incorpora uma camada de óxidos metálicos numa das suas faces, interna ou externa, que acaba por diminuir a transmitância luminosa do mesmo (Garrocho, 2005).

2.8 Legislação e normalização

As normas e os regulamentos relacionados com a área da construção são criados com o objetivo de garantir o bem-estar, a saúde e a segurança dos ocupantes dos edifícios (Boubekri, 2004). De maneira a salvaguardar estes três princípios, as normas e os regulamentos construtivos definem requisitos, limites e restrições para o uso da luz natural nestes espaços (Gherri, 2015).

Hoje em dia já é possível prever os níveis de iluminação natural, a partir de modelos computacionais ou empíricos, recorrendo a dados recolhidos ao longo de grandes períodos de tempo. Ainda assim, estes dados não passam de previsões estatísticas (Boubekri, 2004).

No Quadro 2.1 são apresentadas as normas, relacionadas com a temática da iluminação natural, redigidas pelo CEN (Comité Europeu para a Normalização) e pela ISO (“*International Organization for Standardization*”), em colaboração com o CIE (“*Commission Internationale de l’Eclairage*”).

Quadro 2.1 – Normas internacionais sobre iluminação natural.

CEN	EN 12464-1:2011	Light and Lighting – Lighting of Work Places – Part 1: Indoor Work Places
	EN 15193:2007	Energy Performance of Buildings – Energy Requirements for Lighting
	EN 13363	Solar Protection Devices Combined With Glazing – Calculation of Solar and Light Transmittance – Part 1 (2003) and Part 2 (2005)
	EN 410:2011	Glass in Building – Determination of Luminous and Solar Characteristics of Glazing
	EN 14501:2005	Blinds and Shutters – Thermal and Visual Comfort – Performance Characteristics and Classification
ISO	ISO 15469:2004	Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky
	ISO 8995:2002	Lighting of Indoor Work Places

Das normas acima mencionadas a EN 12464-1 (2011) e a ISO 8995 (2002) são as mais completas e ligadas com as temáticas da luz natural e da iluminação natural. De uma maneira geral, estas normas descrevem a iluminação necessária, para as pessoas poderem realizar as tarefas do dia-a-dia de forma eficiente, em segurança e com conforto, ao longo do período de ocupação desse espaço. Na norma ISO 8995 (2002) são focados aspetos relacionados com: o

ambiente luminoso, a distribuição luminosa nos espaços, as iluminâncias, o encadeamento, considerações energéticas, requisitos de iluminação, entre outros CIE (2002). Foram idealizadas para ambientes internos, sendo que não podem ser aplicadas em espaços de trabalho exteriores, subterrâneos e para iluminação de emergência (NormasIN@, 2016).

Relativamente às normas EN 13363 parte 1 e 2 (2005) e EN 410 (2011) estas especificam, tal como o próprio nome indica, métodos de cálculo capazes de: estimar a transmissão total de energia solar, de um sistema combinado de vidro mais dispositivo de sombreamento; de determinar as características luminosas o vidro nos edifícios. A primeira pode ser aplicada a inúmeros tipos de sistemas de sombreamento, sendo que a segunda permite fazer a comparação entre os diferentes tipos de vidro usados na construção. A norma EN 14501 (2005) foca-se em dispositivos de sombreamentos como cortinas, persianas e toldos. Neste caso são particularizadas as propriedades que se devem ter conta, aquando da comparação entre este tipo de soluções. O conforto térmico e visual, a transmissão direta solar, o controlo do encadeamento, o uso de luz natural e o contacto com o exterior são aspetos a ter em conta, de acordo com esta norma (NormasIN@, 2016).

Conforme é referido por Li et al. (2010) na norma ISO 8995 (2002) foram adotados, pela CIE, 15 tipos de céu que cobrem um grande espectro de céus que podem ser encontrados pelo mundo fora, sendo que a cada um está associada uma distribuição luminosa única.

3 SIMULAÇÃO E MEDIÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Os avanços tecnológicos na área computacional permitiram o aparecimento de inúmeros *softwares*, capazes de auxiliar a análise e a compreensão de inúmeras áreas científicas. No que diz respeito à temática da iluminação natural, os principais intervenientes num projeto de edifícios, podem encontrar uma gama alargada de *softwares* CAD (*Computer Aided Design*) e BIM (*Building Information Modeling*), que os ajudam a modelar os diferentes espaços. De seguida, os projetistas podem recorrer a *softwares* aptos para simular e analisar a iluminação natural. Estes modelos virtuais têm vindo a ganhar bastante destaque, pois simplificam a modelação dos espaços e a análise da iluminação natural (Pereira, 2011).

Antes de passar à descrição dos *softwares* de modelação e simulação mais usados nos dias de hoje, é importante fazer a distinção de alguns conceitos relacionados com este tipo de programas. Relativamente aos *softwares* de modelação, é necessário fazer a distinção entre CAD e BIM. Enquanto que os *softwares* CAD permitem a criação de desenhos técnicos, o conceito BIM comporta a parte gráfica e não gráfica (por exemplo, materiais e elementos decorativos), possibilitando assim a compilação de todas as características de um projeto, num único local. Sendo assim, conclui-se que o CAD está incorporado no BIM, não havendo a possibilidade de dissociar ambos. Os modelos criados nestes *softwares* podem depois ser importados para os programas de simulação da iluminação natural para posterior análise.

Nos *softwares* de simulação podemos distinguir dois métodos usados para o cálculo da iluminação natural: o método *Radiosity* e o método *Ray-tracing* (IEA, 2000). O método *Radiosity* é um algoritmo de iluminação, usado em programas gráficos tridimensionais. Este separa o sombreamento do cálculo da visibilidade, sendo que numa primeira fase é feita a modelação das interações entre as fontes de luz e os objetos e numa segunda fase é feito cálculo da visibilidade e do sombreamento, acompanhado de uma imagem do espaço (Pereira, 2011). Este método permite ainda a inter-reflexão de luz entre as superfícies das paredes do compartimento (IEA, 2000). O método *Ray-tracing* permite a conceção de uma imagem virtual, “através de um caminho de luz num plano de imagem” (Pereira, 2011), onde é possível simular a sua interseção com os objetos virtuais. As imagens geradas por este método apresentam grande realismo, pois captam a luz bem como todas as refrações e reflexos (Pereira, 2011).

De seguida vão ser descritas as propriedades de alguns dos *softwares* mais usados para a simulação da iluminação natural em edifícios bem como os *softwares* capazes de efetuarem a modelação tridimensional de espaços.

3.1 Softwares para simulação da iluminação natural

3.1.1 Daysim

Christoph Reinhart tem sido o responsável pelo desenvolvimento da ferramenta *Daysim* desde 1998. O *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE)*, a Universidade de *Harvard*, o *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* e o *National Research Council (NRC) Canada* foram os responsáveis pela sua criação e aperfeiçoamento (Daysim@, 2016).

O *Daysim* é um *software* que permite fazer a simulação, baseando-se na ferramenta *Radiance*, da iluminação natural nos edifícios. O programa permite-nos calcular as iluminâncias e luminâncias, e ainda importantes métricas de iluminação natural como a Autonomia da Luz Natural e as Iluminâncias Úteis da Luz Natural. O *Daysim* é ainda compatível com os *softwares* *Rhinocero* e *Google SketchUp* para a modelação geométrica (Daysim@, 2016).

Com este programa podemos ainda gerar dados de ocupação, consumos de energia elétrica e informação relativa aos sistemas de sombreamento que poderão ser úteis aquando da utilização de *softwares* mais complexos, como o *EnergyPlus* (Daysim@, 2016).

3.1.2 DesignBuilder

O *DesignBuilder* é o *interface* gráfico do programa de simulação térmica e dinâmica *EnergyPlus*. É normalmente usado para:

- Calcular os consumos energéticos dos edifícios;
- Iluminação natural – modelação de sistemas de controlo da iluminação e poupanças na energia elétrica;
- Avaliar opções de fachada;
- Simulações térmicas de edifícios ventilados naturalmente;
- Visualização de sistemas de sombreamento
- Calcular o tamanho dos equipamentos para aquecimento e arrefecimento;
- Uso educacional (DsB, 2009).

Mais detalhadamente este *software* oferece aos seus utilizadores uma plataforma onde é possível fazer a modelação geométrica tridimensional dos edifícios, de uma forma bastante simples, intuitiva e sem limitações geométricas. Nas pré-definições os utilizadores podem conferir aos modelos geométricos uma variedade de dados e características construtivas (sistemas AVAC e iluminação, por exemplo), consoante as necessidades de cada projeto. No final podem ser consultados os dados referentes às simulações efetuadas, sem recorrer a módulos separados ou independentes (NaturalWorks@, 2016).

No que toca à iluminação natural, o programa permite calcular as Iluminâncias e o Fator de Luz do Dia, recorrendo ao *software* de simulação *Radiance*. *Warren Gray*, engenheiro mecânico,

afirma que os níveis de luz natural medidos em edifícios aproximam-se muito aos resultados apresentados pelo *DesignBuilder*.

3.1.3 Diva for Rhino

O *Diva for Rhino* é um *plug-in* de iluminação natural e eficiência energética, para o programa de modelação geométrica tridimensional *Rhinoceros - NURBS modeler*. A empresa que distribui e desenvolve este produto é a *Solemma LLC*, mas, numa fase inicial, quem estava responsável pelo mesmo era a *Graduate School of Design* na *Harvard University*. O software permite aos utilizadores fazerem um estudo bastante completo do desempenho ambiental dos edifícios e das paisagens urbanas. De entre as suas potencialidades destaco o estudo das métricas de iluminação natural, a criação de mapas de radiação, de modelos tridimensionais e o estudo do encadeamento (Diva4Rhino@, 2016).

3.1.4 EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um *software* gratuito e multiplataforma (*Windows*, *Mac OS X* e *Linux*) desenvolvido para o *U.S. Department of Energy (DOE) Building Technologies Office (BTO)* por várias instituições académicas, laboratórios e entidades privadas nos Estados Unidos da América (EnergyPlus@, 2016).

Este *software* de simulação energética para edifícios, permite aos engenheiros, arquitetos e projetistas fazerem o estudo e análise da energia consumida (pelo edifício) para arrefecimento, aquecimento, iluminação e ventilação. É ainda relevante mencionar a possibilidade de cálculo das iluminâncias e do índice de encadeamento, bem como a disponibilização de diversos modelos de fenestração (janelas e sistemas de sombreamentos) (EnergyPlus@, 2016).

Visto tratar-se de um programa com um *interface* pouco apelativo, isto é, os dados são fornecidos ao programa através de uma linha de comandos, é útil a sua ligação com outros *softwares* de modelação tridimensional, como o *AutoCad* e o *Google SketchUp* (EnergyPlus@, 2016).

3.1.5 Light Analysis for Revit (LAR)

O *LAR* é um *plug-in* que funciona com o software de modelação *Revit* da *Autodesk*. Este *plug-in* faz uso do *A360 Rendering* para estudar e analisar a iluminação natural e artificial nos espaços previamente modelados, apresentando estes dados diretamente no *Revit*, em poucos minutos (LAR@, 2016a)

Segundo o site da *Autodesk*, o *plug-in* é de fácil compreensão e manuseamento, sendo que os utilizadores não precisam de ter um conhecimento aprofundado sobre a temática da iluminação para o usarem (LAR@, 2016b).

3.1.6 Radiance

O *Radiance* é um *software* gratuito e multiplataforma (*Unix, Linux, Mac OS X, Windows*) lançado em 1985 por *Greg Ward*, em parceria com o *Lawrence Berkeley National Laboratory*, nos Estados Unidos da América (*Radiance@*, 2016).

É um poderoso *software* que usa o método de *ray-tracing* para a análise e visualização da luz natural em ambientes internos ou externos. Os *inputs* permitem especificar a geometria espacial, os aparelhos de iluminação, os materiais, os modelos de céu, a data e a hora. No final, é possível calcular os valores das luminâncias e iluminâncias para um determinado espaço, bem como conhecer os valores do encadeamento (*Radiance@*, 2016).

O *Radiance* apresenta poucas limitações no que toca à geometria dos espaços e dos materiais, quando comparado com outros *softwares* que fazem a análise da iluminação. Continua a ser um programa bastante usado por engenheiros, arquitetos e investigadores para visualização e análise da iluminação natural em edifícios (*Radiance@*, 2016).

3.1.7 Velux Daylight Visualizer

O *Velux Daylight Visualizer* é um *software* gratuito e multiplataforma (*Windows e Mac OS X*) desenvolvido pela *LUXION* em colaboração com o *Velux Group* (*VeluxDV@*, 2016).

É uma ferramenta validada de simulação e visualização utilizada para a análise da iluminação natural. Com ela pretende-se encorajar e auxiliar os profissionais ligados à área do projeto e da construção, a promoverem e integrarem estratégias que utilizem a luz natural como forma de iluminação, para os espaços a serem projetados (*VeluxDV@*, 2016). Com este *software* é possível calcular iluminâncias, luminâncias e o fator de luz do dia para os 15 tipos de céu inseridos na *CIE Standard General Sky* (*TheDaylightS@*, 2016). Como principais características do programa, destacam-se:

- Facilidade no manuseamento;
- Rapidez e precisão;
- Criar e importar ficheiros 3D (*AutoCad, Google Sketchup, Archicad*);
- Imagens reais, detalhadas e interativas;
- Cálculo do fator de luz do dia (FLD);
- Disponibilização de relatórios relativos às simulações realizadas (*VeluxDV@*, 2016).

3.2 Softwares para modelação tridimensional

3.2.1 ArchiCAD

O *ArchiCAD* é considerado fonte de inovação, apresentando-se como o primeiro *software* de modelação geométrica CAD e BIM para computadores pessoais, desenvolvido pela empresa

Húngara, *Graphisoft*, sendo compatível com os sistemas operativos *Windows* e *Mac OS X* (ArchiW@, 2016).

O programa permite aos seus utilizadores (engenheiros, arquitetos, projetistas) fazerem a modelação 2D e 3D espaços e edifícios, bem como a criação de *renders* (imagem pormenorizada de um modelo) de alta qualidade, facilitando assim a sua compreensão por parte de todos os intervenientes nos projetos (ArchiW@, 2016). Nas suas versões mais atuais é ainda relevante fazer referência a funcionalidades como: a análise dos consumos energéticos associados a cada projeto criado, capacidade de encontrar problemas no desenho, como interseção de peças. Outra funcionalidade que parece ser bastante interessante é a tecnologia *TeamWork*. Esta tecnologia consiste no trabalho concertado e simultâneo realizado por uma equipa em determinado projeto, sendo que cada membro pode executar a sua prestação e salvá-la na *BIMcloud*, a diferentes ritmos (ArchiCAD@, 2016).

3.2.2 AutoCAD

O *AutoCAD* é um conhecido *software* de projeto 2D e 3D concebido pela empresa *Autodesk* desde 1982. Nos dias de hoje é amplamente usado por arquitetos, engenheiros e projetistas no desenho de projetos. É um programa de fácil manuseamento e compreensão, encontrando-se disponível para os sistemas operativos *Windows*, *Android*, *Mac OS X* e *iOS* (AutoCAD@, 2016).

3.2.3 Revit

O *Revit* é um *software* de modelação CAD e BIM desenvolvido pela *Autodesk* e compatível com o sistema operativo *Windows*. O programa fornece ferramentas aos utilizadores para estes poderem desenvolver projetos de arquitetura, engenharia e construção (Revit@, 2016).

Conforme é referido por Pereira (2011) o programa permite aos utilizadores fazerem a modelação de objetos e formas 3D, bem como a criação de imagens e *renders* virtuais bastante reais e pormenorizados. Podemos ainda fazer referência a outro tipo de funcionalidades como:

- Modelação de componentes paramétricas;
- Ligar as diferentes equipas do projeto, através do *A360 Collaboration for Revit*;
- Visualização de projetos 3D;
- Criação de *renders*, *Autodesk Raytracer*;
- Análise estrutural;
- Projetos e documentação de AVAC e de eletricidade;
- Análise do balanço energético do projeto;
- Análise da iluminação no projeto (Revit@, 2016).

3.2.4 Google SketchUp

O *Google SketchUp* é um poderoso e sofisticado *software* de modelação tridimensional, compatível com *Windows* e *Mac OS X*, destinado para projetos de engenharia civil, arquitetura, engenharia mecânica, bem como para criação de jogos e produção de audiovisuais Pereira (2011). O *software SketchUp* foi criado e desenvolvido pela empresa *Last Software* em 2000, que mais tarde, em 2006, foi adquirida pela gigante *Google*, que lançou posteriormente a primeira versão gratuita do *Google SketchUp*, em 2007 (Fleron, 2009).

Nos dias de hoje o *Google SketchUp* é um programa amplamente usado na modelação tridimensional, possuindo uma versão gratuita, o *SketchUp Make*, que apenas possibilita a construção de modelos 3D e uma versão paga, o *Sketch Up Pro*, com inúmeras funcionalidades (próprias do programa ou de *plug-ins* compatíveis). De entre as quais é importante destacar:

- Construção de modelos 3D;
- Produção de desenhos construtivos;
- Possibilidade de importar outros ficheiros CAD e exportar ficheiros PDF;
- Possibilidade de fazer e exportar imagens e vídeos;
- Trabalhar com câmaras virtuais;
- Geração de listas e relatórios;
- *3D Warehouse*, onde se podem encontrar uma grande variedade de modelos 3D;
- Criação de *renders*;
- Modelação energética e criação de cenários de iluminação natural (GoogleSU@, 2016).

3.2.5 Rhinoceros

O *Rhinoceros*, ou *Rhino*, é um *software* de modelação tridimensional e multiplataforma (*Windows* e *Mac OS X*) desenvolvido pela empresa Norte Americana, *Robert McNeel and Associates* (Rhinoceros@, 2016).

A geometria do *Rhino* é baseada no modelo matemático NURBS, que, resumidamente, é uma precisa representação matemática de geometria 3D, capaz de descrever a mais simples linha 2D e a mais complexa forma 3D (Nurbs@, 2016). Pode ser usado para projetos de arquitetura e engenharia pois possui uma variedade de ferramentas que permitem modelar qualquer forma e objeto 3D, criar *renders* de alta qualidade, importar e exportar ficheiros (compatível com inúmeros produtos de CAD, CAM, entre outros), realizar impressões 3D (RhinoF@, 2016).

3.3 Equipamentos de medição

Normalmente são usados dois tipos de ferramentas para a avaliar quantitativamente a iluminação num compartimento: os medidores de iluminância e os de luminância. De seguida é feita uma breve descrição de ambos os aparelhos, pormenorizando as suas principais características e diferenças (SLL, 2009).

3.3.1 Medidores de iluminâncias

Este tipo de aparelho é usado para medir os valores das iluminâncias compreendidos entre os 0,1 lux e os 100,000 lux, isto é, desde condições de iluminação de emergência até condições de iluminação natural. Como pode ser visto na Figura 3.1 este tipo de aparelhos é habitualmente constituído por uma célula fotovoltaica, de silício ou selénio, ligada, diretamente, ou por intermédio de um cabo extensor, a um *display* digital ou analógico (SLL, 2009). Os aparelhos mais recentes podem realizar medições em múltiplos pontos, dentro de água e possibilitam ainda a transferência de dados para um computador (Minolta, 2012).

3.3.2 Medidores de luminâncias

Os medidores de luminâncias são capazes de medir valores no intervalo dos 10^{-4} até aos 10^8 cd/m^2 . São constituídos por um fotorreceptor, um sistema de imagem e um *display*, como pode ser observado na Figura 3.1 (SLL, 2009). Este tipo de aparelhos mede o brilho fotométrico, isto é, a quantidade de luz que atinge uma superfície. Hoje em dia são dispositivos portáteis, leves e compactos, sendo possível fazer a descarga dos dados das medições para um computador (LuminanceM@, 2016).



Figura 3.1 – Medidores de iluminâncias (a) e de luminâncias (b) (MinoltaIM@, 2016) (LuminanceM@, 2016).

4 CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA

No decorrer deste capítulo apresentar-se-á o caso de estudo e a metodologia que irá servir de guia no presente estudo. Ao longo desta investigação vai ser analisada a ferramenta a utilizar na modelação computacional bem como os espaços a serem modelados.

Para este caso de estudo foi selecionada uma sala de aula com o objetivo de simular e estudar a distribuição de iluminação natural na mesma, recorrendo ao *software DesignBuilder*. Na modelação tridimensional desta sala foi essencial ter em consideração as dimensões reais dos espaços, os materiais e cores dos revestimentos usados na construção dos mesmos e os tipos de envidraçados usados nas janelas exteriores e portas. Posteriormente é feito um estudo paramétrico, tendo por base a mesma sala de aula, onde vai ser analisada a influência, na distribuição da iluminação natural, de uma claraboia e pala de sombreamento, de diferentes tipos vidro e de mudanças nas condições de céu e da tonalidade dos materiais de revestimento interior.

Resta acrescentar que todos estes tópicos serão objeto de uma análise objetiva e diligente, imposta pelas limitações espaço-temporais de uma dissertação de mestrado desta dimensão, esperando, contudo, dar resposta a todas as questões, de forma crítica.

4.1 Descrição da sala de aula

Numa primeira fase desta investigação foi necessário ponderar os espaços disponíveis e com condições recomendáveis para efetuar o estudo das condições de iluminação natural. Acabou por se escolher um edifício escolar, o Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (Figura 4.2), integrado no Pólo II desta Universidade. Os requisitos de conforto visual e consequentemente de iluminação que este tipo de atividade (ensino) comporta, também estiveram na origem da escolha deste tipo de espaço.

Dentro do Departamento de Engenharia Civil foi seccionada a sala SC 3.6 (Figura 4.1 e Figura 4.3), assinalada na Figura 4.2 por intermédio de uma seta vermelha, localizada no terceiro piso do edifício e com a fachada exterior com quatro janelas, orientada a Sul.

A escolha do espaço a analisar acabou por recair nesta sala de aula devido à sua semelhança com a maioria das outras salas do departamento, tanto na sua orientação (Sul) como na geometria, materiais de revestimento e vãos envidraçados presentes na mesma. No entanto não foram reproduzidas no modelo da mesma o mobiliário presente no seu interior (mesas, cadeiras e quadro).



Figura 4.1 – Interior da Sala SC 3.6.

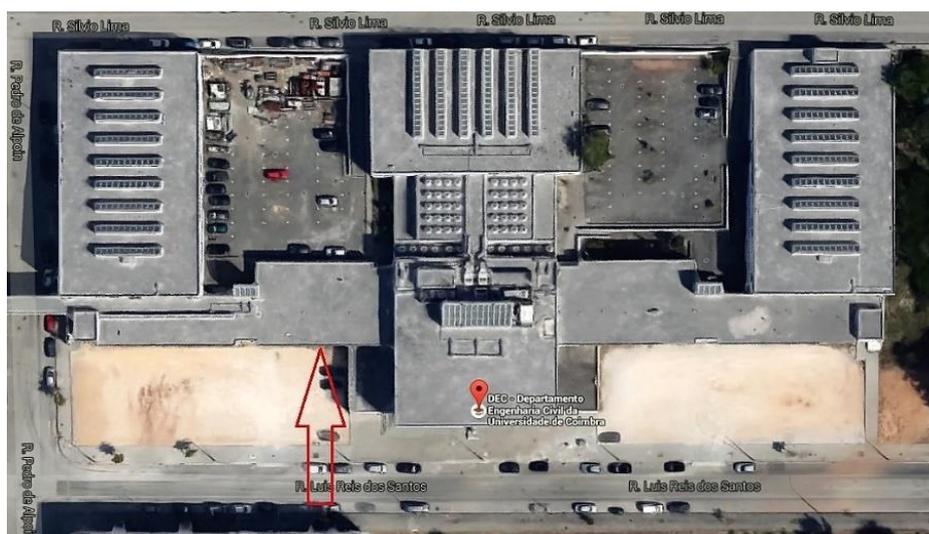


Figura 4.2 – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e localização da sala SC 3.6 assinalada com uma seta vermelha (retirada do Google Maps).

De antemão, é importante esclarecer que o presente estudo não pretende tecer críticas sobre as opções tomadas no projeto do edifício, mas tão só utilizar as geometrias de alguns espaços, presentes no mesmo, de maneira a serem efetuadas as simulações, com vista a analisar os dados relativos à iluminação natural, de forma a compará-los e enquadrá-los com os padrões específicos para a iluminação natural em espaços com finalidades educativas.

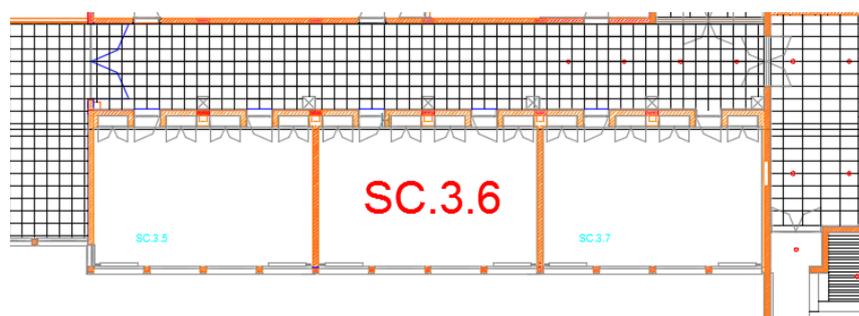


Figura 4.3 – Planta da sala SC 3.6 (disponibilizada pelo departamento).

4.2 Software utilizado

Com os avanços tecnológicos presentes na área computacional, hoje em dia é possível encontrar um elevado número de *softwares* que podem auxiliar na modelação tridimensional de espaços e nas simulações dos níveis de iluminação natural presentes nos mesmos. Como pode ser observado no Capítulo 3, foram estudados alguns dos *softwares* mais usados, tanto para modelação tridimensional como para a execução de simulações, sendo que foi tido em conta as vantagens e as desvantagens de cada um. Um dos principais problemas encontrados foi relacionar a aprendizagem de um ou mais *softwares* para executar o trabalho, com os prazos para a sua realização.

Tendo tudo isto em consideração acabei por optar pelo *software DesignBuilder* (Figura 4.4), versão 4.2.0.054, para desenvolver este estudo. Alguns dos aspetos que me levaram à sua escolha foram:

- Ter incorporada no mesmo *interface* a parte da modelação e das simulações;
- Facilidade no uso e manuseamento para a modelação tridimensional dos espaços;
- Poucas limitações no que toca à geometria dos espaços;
- Usar o *Radiance* para os cálculos relativos à iluminação natural;
- Bom feedback por parte dos utilizadores do programa;
- Conhecimento do software por parte de um dos orientadores desta dissertação.

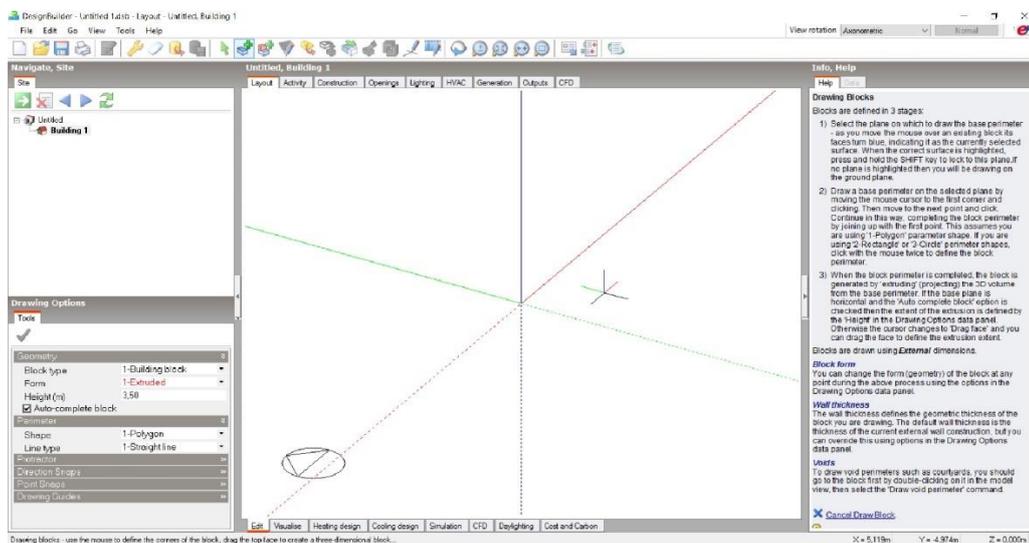


Figura 4.4 – Interface do *DesignBuilder* (NaturalWorks@, 2016).

4.3 Modelação da sala de aula

A parte relativa à modelação do espaço em estudo é de enorme importância visto que o sucesso e a exatidão dos resultados das simulações a serem efetuados de seguida estão bastante dependentes da precisão com que este é representado no *software* (neste caso o *DesignBuilder*). Para tal, é importante ter em atenção os pormenores relativos às propriedades geométricas, aos materiais constituintes da sala e à sua localização.

4.3.1 Localização

Os dados relativos à localização geográfica da sala são de extrema importância para este estudo pois vão influenciar os resultados da distribuição da iluminação natural na mesma. O próprio *software* tem incorporado uma lista de locais possíveis, onde pormenores como a latitude, longitude, fuso horário e as condições meteorológicas já se encontram preenchidos. Estes dados não foram alterados manualmente pois são bastante precisos. No Quadro 4.1 podem ser observados algumas das características geográficas adotadas para o modelo da sala de aula.

Quadro 4.1 – Dados geográficos dos modelos.

Localização	Latitude	Longitude	Fuso horário (horas)
Coimbra, Portugal	40,20	-8,42	GMT 0

4.3.2 Tipologia e tipo de atividade

O modelo da sala de aula de referência é constituído por dois blocos: um bloco genérico de base, que apenas serve para simular a altura a que os restantes blocos estão do solo, um bloco

que representa a sala de aula e o corredor que se encontra agregado à mesma, separados por uma parede divisória interior.

4.3.3 Parâmetros construtivos

Com o objetivo de simular a distribuição da iluminação natural na sala SC 3.6, torna-se fundamental conhecer as propriedades dos materiais de revestimento para que os resultados apresentados pelo *software* sejam os mais precisos e corretos possíveis.

Posto isto, neste estudo não se deu tanta importância aos materiais que constituem as camadas intermédias e externas das paredes exteriores da sala, pois estes acabam por não ter grande influência nos cálculos relativos à iluminação natural. Ainda assim, houve um cuidado em escolher os materiais apropriados à sua constituição, para que o aspeto estético seja o mais semelhante possível às condições reais. Vão ainda ser apresentados as propriedades dos envidraçados escolhidos na construção do modelo, no Quadro 4.3 .

No que diz respeito aos materiais de revestimento da sala, a norma EN12464-1:2011 recomenda as seguintes refletâncias para a maioria das superfícies interiores:

- Teto: 0,7 a 0,9;
- Paredes: 0,5 a 0,8;
- Pavimento: 0,2 a 0,4 (CEN/TC 169, 2011).

Na constituição das superfícies internas do modelo temos materiais com tonalidades brancas e amarelas nas paredes e tetos. No pavimento da sala temos madeira e no corredor temos mármore claro. Ainda nas paredes divisórias temos os cacifos em madeira (mesma tonalidade que a madeira do chão). A refletância de todos estes materiais está indicada no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Propriedades das superfícies interiores.

Elemento Construtivo	Tipo de acabamento	Cor/Tonalidade	Refletância
Parede branca	Reboco pintado	Branco	0,80
Parede amarela	Reboco pintado	Amarelo intermédio	0,68
Teto	Reboco pintado	Branco	0,80
Pavimento (sala)	Madeira	Tipo Carvalho	0,35
Pavimento (corredor)	Mármore	Claro	0,40
Cacifos	Madeira	Tipo Carvalho	0,35

Os valores relativos às refletâncias foram consultados nos seguintes documentos: Fontoyront (2014), Coutinho (2009), (Santos, 2014), Baker et al. (1993) e Martins (2010).

Os envidraçados adotados para as janelas laterais são duplos (3mm cada pano) com uma camada interior preenchida por ar (10 mm). Para as portas optou-se por selecionar um envidraçado cinza simples com 6 mm de espessura. As caixilharias dos vidros das janelas são metálicas (aço), enquanto que a moldura dos vidros da porta é em madeira.

As propriedades dos envidraçados podem ser consultadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Propriedades dos envidraçados.

	Tipo de vidro	Espessuras	Transmitância luminosa
Janelas exteriores	Duplo	3mm/10mm/3mm	0.80
Portas	Cinza Simples	6mm	0.43

Relativamente à constituição das paredes, foram utilizadas as características pré-definidas pelo *DesignBuilder*, sendo apenas alterados os materiais de revestimento, pois são estes que vão influenciar os resultados da iluminação natural.

4.3.4 Modelo tridimensional

Neste ponto pretende-se mostrar o espaço modelado no *software DesignBuilder*. Os materiais e revestimentos usados na sua conceção estão em concordância com aqueles apresentados na Seção 4.3.3, uma vez que estes são essenciais para efetuar as simulações de uma forma precisa.

Como já foi referido esta sala de aula encontra-se localizada no terceiro piso do edifício em causa e a sua fachada envidraçada está orientada a Sul. Na planta a sala apresenta uma largura interna de 5,65 m, no entanto as medições no local mostraram uma largura interna de 6,10 m de comprimento. Sendo assim, neste estudo serão usadas as medições obtidas *in situ* (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 – Medidas internas da Sala SC 3.6.

Espaço	Comprimento interior (m)	Largura interior (m)	Altura (m)	Paredes (m)
Sala SC 3.6	8,75	6,10	3,15	0,20

Na Figura 4.5 e Figura 4.6 estão apresentadas as medições internas para as paredes com maior comprimento. Na parede oposta à fachada da sala de aula estão ainda instalados 4 blocos de cacifos com dimensões de 1,22 m de comprimento, 2,43 m de altura e 0,45 m de profundidade.

As paredes de menor comprimento (6,10 m de comprimento por 3,15 m de altura) não apresentam nenhum dispositivo com abertura para o exterior, não estando aqui representadas em pormenor.

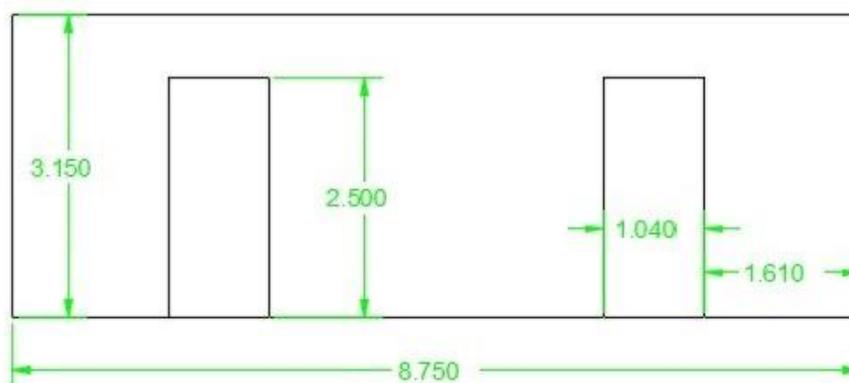


Figura 4.5 –Parede oposta à fachada da sala SC 3.6 (medidas em metros).

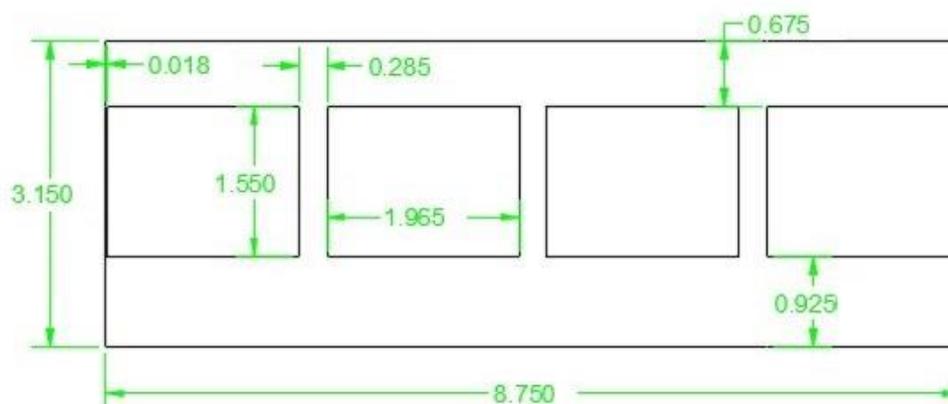


Figura 4.6 –Parede de fachada da sala SC 3.6 (medidas em metros).

Quanto à sua modelação no software *DesignBuilder* comecei por inserir o edifício base, com 9,15 m (fachada exterior) por 10,20 m e 6,00 m de altura. Neste bloco não foi preciso ter em atenção as propriedades das superfícies, visto que a sua única função é simular a altura da sala e do corredor. Para as paredes exteriores foi usada a configuração pré-definida pelo programa, com o paramento exterior composto por betão, o intermédio em poliestireno extrudido (XPS) e o interno em cimento. No que diz respeito aos tetos e pavimento térreo foram deixadas as configurações base do programa.

O bloco que incorpora a sala de aula e o corredor foi sobreposto ao bloco do edifício base, com as mesmas medidas. De seguida foi feita a divisão das zonas por intermédio de paredes divisórias. Com isto, foi possível diferenciar a sala e os quatro cacifos presentes na mesma do corredor, como mostra na Figura 4.7.

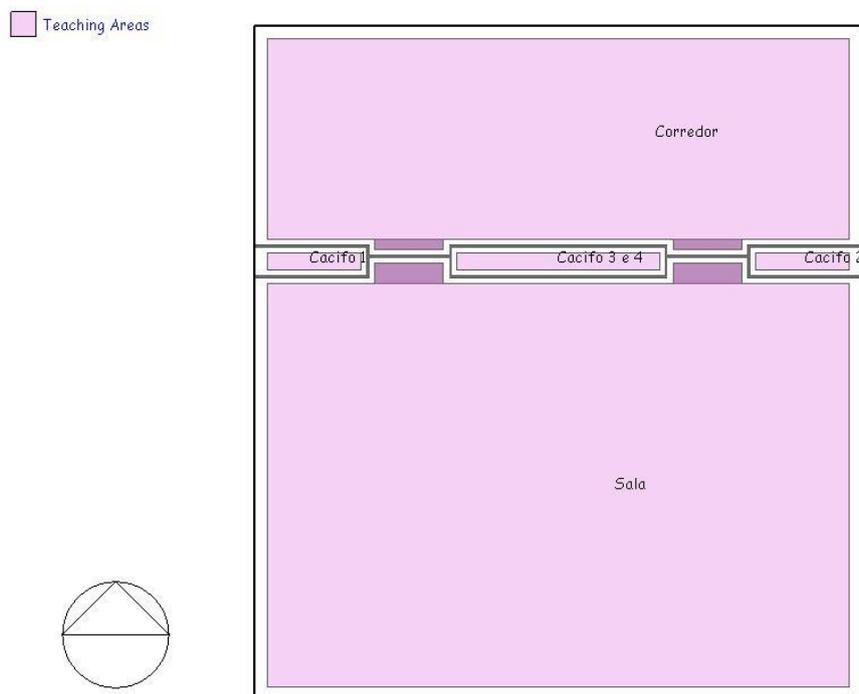


Figura 4.7 – Modelo *DesignBuilder* da sala SC 3.6 em planta (seta no canto inferior esquerdo aponta para o Norte).

As paredes exteriores do corredor encontram-se orientadas a Norte, Este e Oeste, enquanto que as paredes exteriores da sala estão orientadas a Sul, Este e Oeste.

Quanto às superfícies internas de cada um dos compartimentos, o corredor é constituído por paredes e teto em reboco pintado de branco e o pavimento em mármore. Na sala, as superfícies internas das paredes são constituídas por reboco pintado de amarelo, até à altura da janela, e de reboco pintado de branco numa faixa que vai da janela até ao teto, em todo o perímetro da sala. O pavimento é constituído por madeira parquet e o teto é de reboco pintado de branco. Os cacifos são em madeira com igual tonalidade ao pavimento. Quanto aos vãos envidraçados temos as janelas laterais em vidro duplo e as portas em vidros simples (com as propriedades iguais às descritas no Capítulo 4.3.3). Todos estes pormenores podem ser consultados na Figura 4.8 e Figura 4.9.

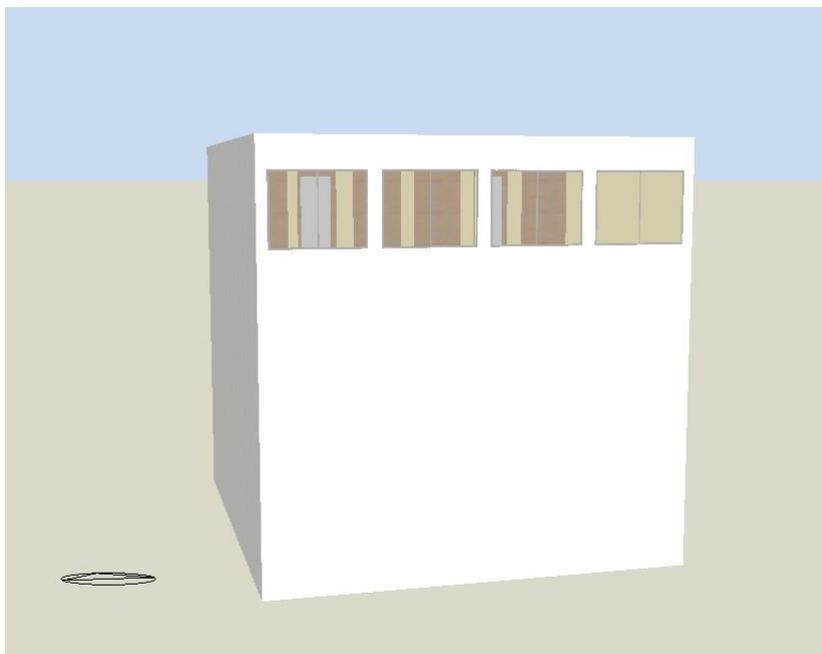


Figura 4.8 –Modelo tridimensional que incorpora a sala SC 3.6.

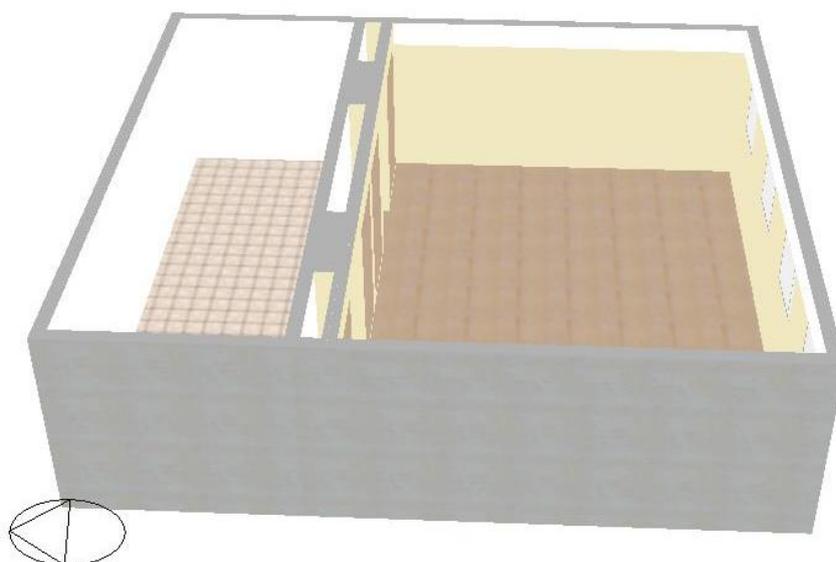


Figura 4.9 – Vista interior da sala SC 3.6 e corredor.

4.4 Resultados para a sala de referência

Neste ponto são apresentadas as simulações realizadas utilizando o modelo da sala de aula, descrito na Secção 4.3.4, de forma a obter os valores das Iluminâncias e do Fator de Luz do Dia (FLD) na mesma, recorrendo ao *software DesignBuilder*. Numa fase posterior estes valores irão

ser comparados e analisados de acordo com as recomendações na norma EN 12464-1:2011 e por diversos trabalhos de investigação.

Estes dois parâmetros (Iluminâncias e FLD) são os mais utilizados no cálculo e avaliação da iluminação natural. No que diz respeito ao FLD, este parâmetro continua a ser um dos mais usados quando se pretende prever a disponibilidade de luz natural no interior de um espaço. Deve ser calculado com condições de céu encoberto, CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) – *Overcast sky*, quando não há a influência da luz direta a entrar no compartimento, pois representa o pior cenário possível quando tentamos calcular a distribuição da iluminação natural (Kensek & Suk, 2011). Para a simulação da sala de aula foi precisamente escolhido este tipo de céu, encoberto (10000lux).

Visto que a sala analisada é utilizada para fins educacionais, a norma EN 12464-1:2011 recomenda para este tipo de atividade valores de iluminâncias compreendidos entre os 300 e os 500 lux.

No que diz respeito ao FLD, Santos (2014) recomenda um valor de 3,5% para espaços educacionais, dando como valor mínimo os 2%.

Dado que o *software* apresenta os dados numa grelha de pontos, foi necessário recorrer à norma EN-12464-1:2011 para averiguar os valores recomendados para o espaçamento entre os mesmos. No entanto, a norma EN-12464-1:2011 apenas especifica a distância máxima entre pontos, não havendo qualquer referência para a distância mínima entre os mesmos. No Quadro 4.5 são apresentados esses mesmos valores, que variam consoante a maior dimensão da sala.

Quadro 4.5 – Valores recomendados para a distância entre pontos.

Comprimento da sala (m)	Distância máxima entre pontos (m)	Número mínimo de pontos
5,00	0,60	8
10,00	1,00	10

Como o comprimento da sala de aula é de 8,75 m, o valor máximo da distância entre pontos vai estar compreendido entre os 0,60 m e 1 m. Com isto, foi escolhido para este estudo uma distância máxima entre pontos de 0,50 m e uma distância mínima de 0,05 m, de modo a garantir uma boa cobertura de pontos.

Quanto à altura da superfície de trabalho, Santos (2014) e Coutinho (2009) recomendam uma altura da superfície de trabalho, neste caso reproduzida pela grelha de pontos, entre os 0,75 e os 0,80 m. Neste estudo foi escolhida uma altura de 0,75 m para a grelha de pontos.

O *software* ainda permite refinar a qualidade das simulações. Como não poderia deixar de ser, para este estudo foi escolhida a qualidade máxima disponibilizada pelo *DesignBuilder*.

De seguida serão apresentados os resultados das simulações, bem como a análise feita aos mesmos.

Na Figura 4.10 e Figura 4.11 são disponibilizados os resultados das simulações para a sala de aula SC 3.6. É importante fazer referência à escala que apresenta os valores de Iluminâncias e do Fator de Luz do Dia, visto que esta muda consoante o modelo selecionado.

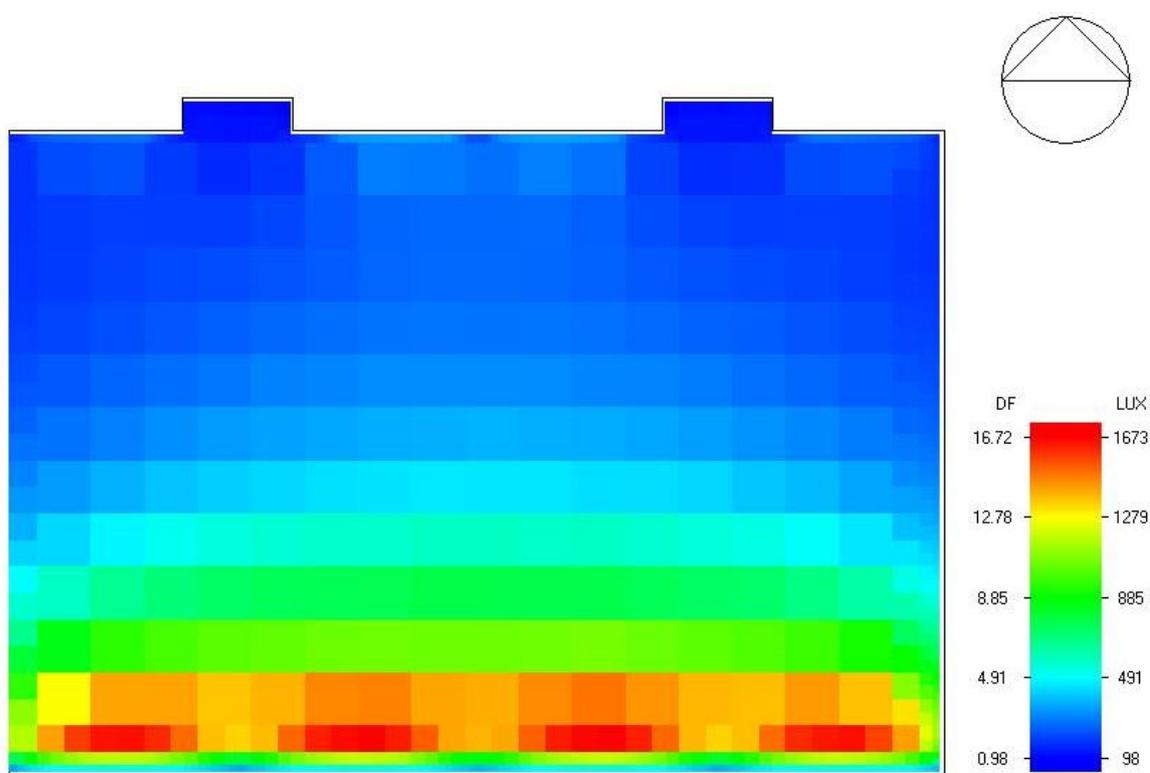


Figura 4.10 – Distribuição da iluminação natural na Sala SC 3.6.

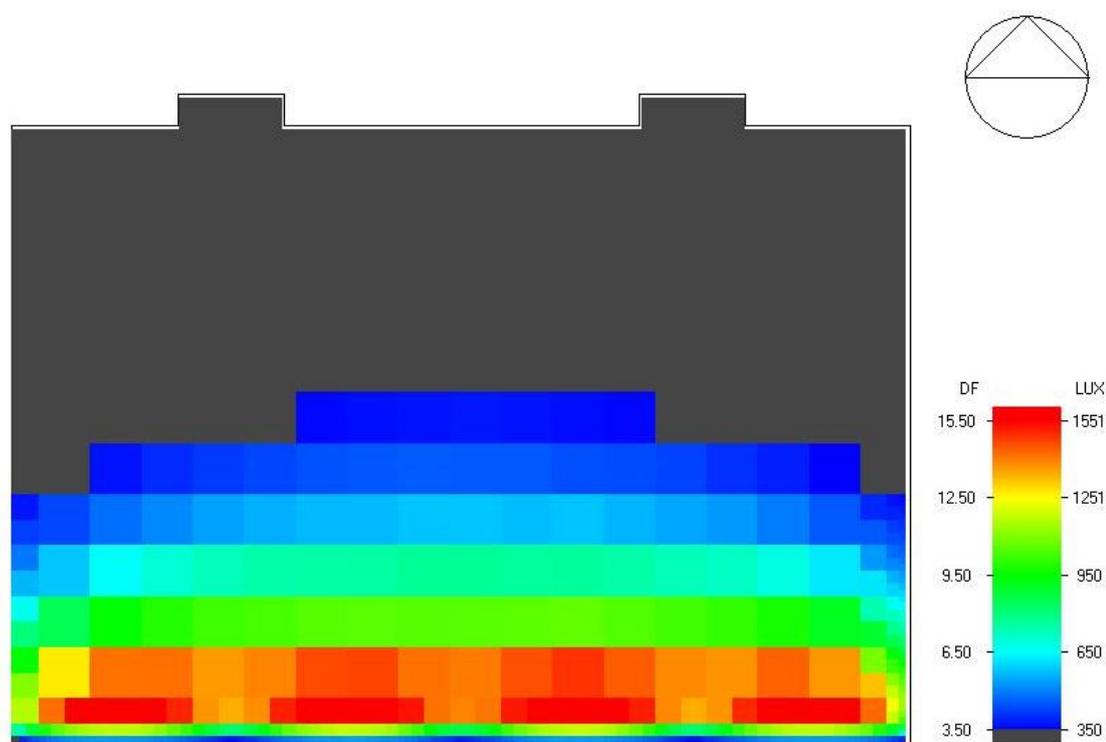


Figura 4.11 – Seleção das áreas com o Fator de Luz do Dia abaixo dos 3,5% (a cinzento).

No Quadro 4.6 podem ser consultados os valores: médio, mínimo e máximo do Fator de Luz do Dia bem como os valores máximos e mínimos das iluminâncias presentes na sala de aula.

Quadro 4.6 – Valores do Fator de Luz do dia para a Sala SC 3.6.

	Valor médio do FLD (%)	Valor mínimo do FLD (%)	Valor máximo do FLD (%)	Iluminâncias (mín-máx)
Sala SC 3.6	5,49	0,98	16,72	98-1673 lux

Analisando a Figura 4.10 pode-se concluir que a sala de aula apresenta valores máximos para as Iluminâncias e para o Fator de Luz do Dia na ordem dos 1670 lux e 16%, respetivamente, situando-se estes valores bem acima dos recomendados (300-500 Lux) para este tipo de espaços. No entanto, é preciso ter em conta que estes números só são alcançados nas áreas junto às janelas exteriores onde há uma maior incidência da luz natural proveniente do exterior. É ainda de notar uma acentuada descida destes valores à medida que nos afastamos das janelas exteriores, sendo que a partir do meio da sala os valores acabam por ficar abaixo do FLD recomendado de 3,5%, tal como se pode ver na Figura 4.11 (zonas a cinza), obrigando a que se recorra a outro tipo de dispositivos (por exemplo de iluminação artificial) para garantir uma iluminação eficaz do espaço.

O valor do FLD médio (5,49%) para esta sala, apresentado no Quadro 4.6, acabaria por ser bastante satisfatório caso fosse analisado em separado das Figura 4.10 e Figura 4.11. No entanto, apesar de ser um parâmetro a ter em conta, é importante referir que o valor acaba por ser um pouco inflacionado devido aos níveis elevados das iluminâncias encontrados junto das janelas exteriores da sala de aula. Neste caso, é fundamental haver uma análise conjunta (imagens com a distribuição da iluminação e os valores médios, máximos e mínimos das iluminâncias e FLD) por forma a não haver erros no estudo da iluminação natural neste tipo de espaços. Outro valor interessante presente no Quadro 4.6 é o FLD mínimo de 0,98%, que pode ser encontrado nas zonas junto às portas do compartimento, que se encontra bem abaixo do mínimo de 2% referido por Santos (2014).

5 ESTUDO PARAMÉTRICO

Neste capítulo é realizado um estudo paramétrico com o objetivo de analisar e comparar o impacto do tipo de vidro, dos materiais usados no revestimento, de diferentes “tipos de céu” e de palas de sombreamento na distribuição da iluminação natural. Vai ainda ser ainda estudada a influência de uma claraboia adicionada à sala SC 3.6, baseada na existente em outras salas do edifício (SC 3.1, SC 3.2 e SC 3.3). Neste capítulo todas as simulações vão ser realizadas para condições de céu encoberto (pelas mesmas razões das apresentadas na Secção 4.4) menos para o estudo apresentado na Secção 5.3, pois nesse parâmetro vai ser analisada a influência de condições de céu limpo.

5.1 Tipo de vidro

No modelo da sala de aula foi alterado o tipo de vidro das quatro janelas laterais para duas soluções amplamente usadas nos dias de hoje, os vidros de baixa emissividade e os vidros refletantes. O objetivo desta mudança é estudar a distribuição da iluminação natural aquando do uso de vidros com transmitâncias luminosas bastante diferentes das do modelo original, estudado no Capítulo 4.4. No Quadro 5.1 estão descritas as propriedades dos vidros usados neste estudo paramétrico.

Quadro 5.1 – Tipos de vidro usados no estudo paramétrico.

Tipo de vidro	Espessuras	Transmitância luminosa
Duplo de baixa emissividade e espectralmente seletivo	6mm/12mm/6mm	0,68
Duplo moderadamente refletante colorido	6mm/12mm/6mm	0,20

Na Figura 5.1 e Figura 5.2 é possível observar a distribuição da iluminação natural na sala SC 3.6 com a utilização dos vidros descritos em cima. É importante salientar a diferença nas escalas de cores, uma vez que o *DesignBuilder* não deixa selecionar manualmente a escala, acabando por mudá-la de caso para caso.

No Quadro 5.2 estão indicados os valores das iluminâncias máximas e mínimas bem como os valores relativos ao FLD, respeitantes à sala de aula.

Quadro 5.2 – Iluminâncias e FLD para ambos os vidros.

Tipo de Vidro	Iluminâncias (mín-máx)	FLD médio
Baixa emissividade	76-1351 lux	2,95 %
Refletante	23-364 lux	1,29 %
Sala de referência	98-1673 lux	5,49 %

Como já seria de esperar os valores das iluminâncias e do fator de luz do dia reduziram bastante, quando comparados com os valores da sala de referência, apresentados no Capítulo 4.4 . No entanto, na Figura 5.1 podemos observar uma boa distribuição da iluminação natural até metade da sala, com valores iguais e superiores aos 300 lux recomendados, tal como no modelo da Secção 4.4. Quanto ao vidro refletantes, este só acaba por ter valores aceitáveis junto das aberturas lateais.

Em jeito de conclusão cada um destes vidros apresenta valores de iluminâncias e FLD bastante mais baixos que os de um vidro duplo mais comum. No entanto, os resultados obtidos para o vidro duplo de baixa emissividade acabam por ser satisfatórios, pois os valores recomendados acabam por ser cumpridos até meio da sala, apenas um pouco superados pelo vidro duplo comum. O vidro duplo refletante acaba por ser bastante útil para atividades a serem desempenhadas junto às aberturas para o exterior, onde os requisitos acabam por ser satisfeitos.

Na Secção seguinte vai ser estudado o impacto das cores dos materiais de revestimento na iluminação natural na sala de aula.

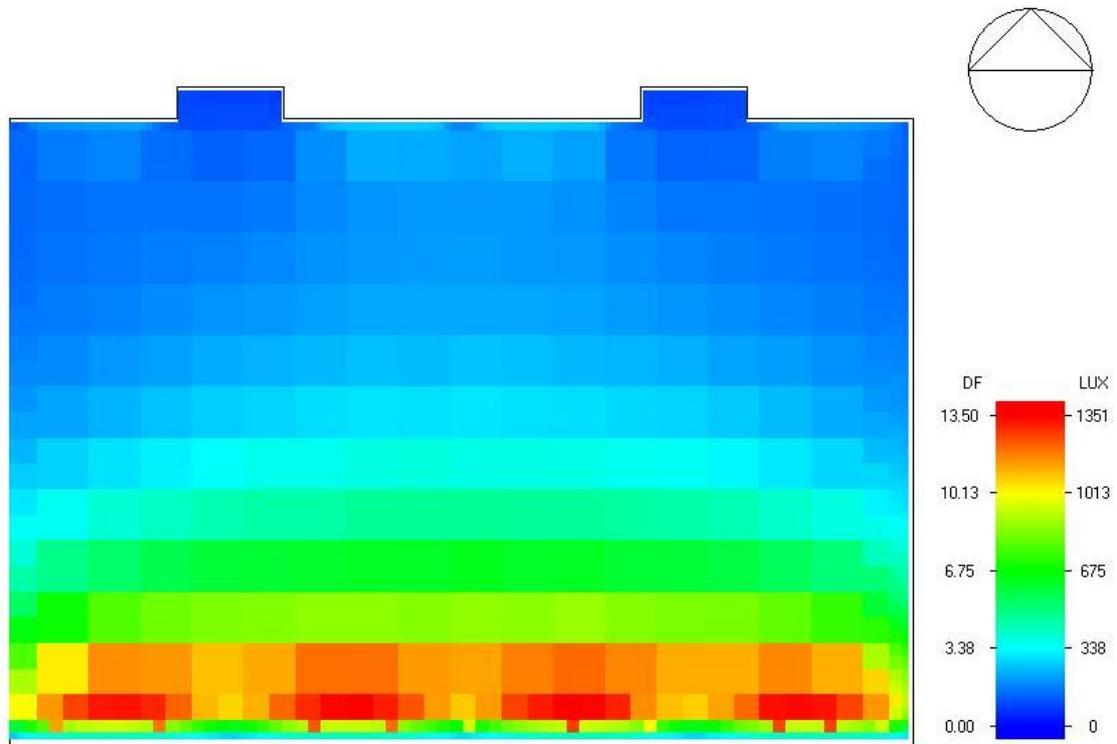


Figura 5.1 – Distribuição da iluminação natural com vidro de baixa emissividade.

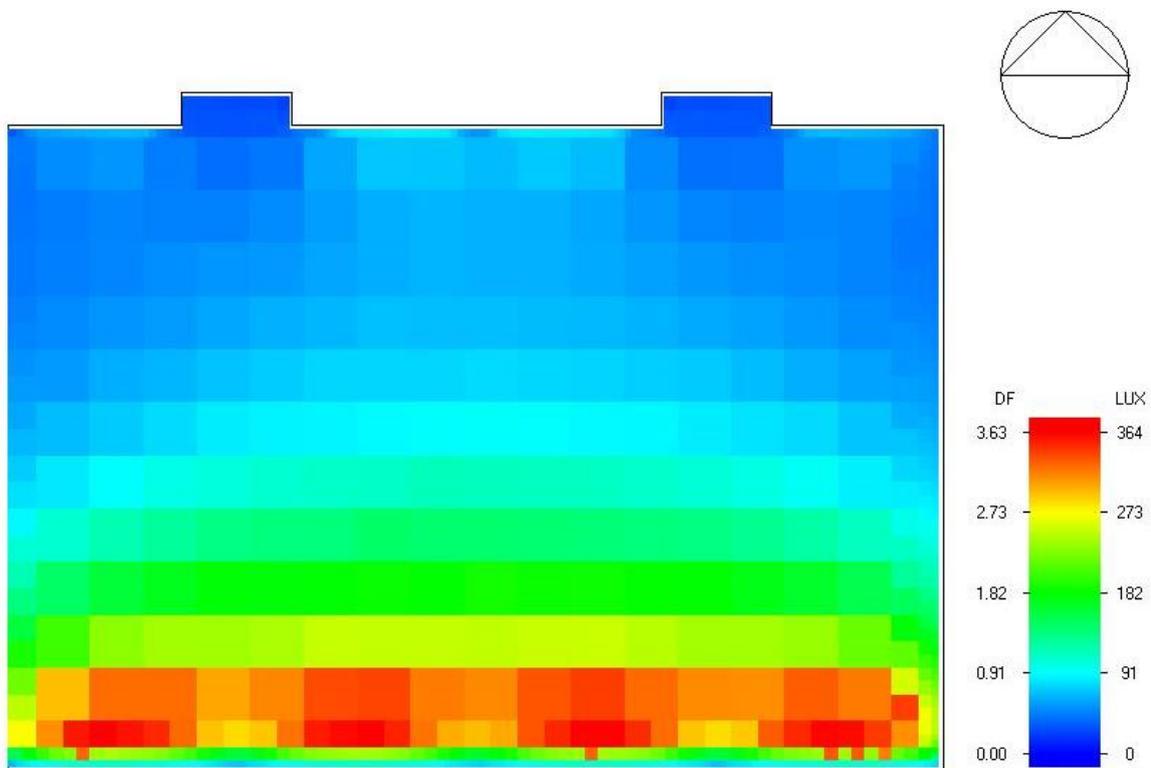


Figura 5.2 – Distribuição da iluminação natural com vidro refletante.

5.2 Cor dos materiais de revestimento

Outro aspeto que tem um grande impacto nos valores da iluminação natural é a cor dos materiais de revestimento das superfícies interiores. Neste estudo vai ser comparada a distribuição da iluminação natural, no modelo da sala SC 3.6, tendo sido usado um material com refletância alta (80%) e outro de baixa refletância (10%).

Na Figura 5.3 e Figura 5.4 são apresentados os valores das iluminâncias e do FLD para ambos os casos e no Quadro 5.3 o valor do FLD médio e iluminâncias mínimas e máximas.

Quadro 5.3 –FLD para o revestimento branco e negro.

Material de revestimento	Iluminâncias (mín-máx)	FLD médio
Branco	127-1703 lux	5,7 %
Negro	62-1580 lux	4,65 %
Sala de referência	98-1673 lux	5,49 %

Comparando ambas as figuras podemos concluir que as iluminâncias e o FLD são bastante diferentes de uma sala para a outra, isto é, na sala branca temos valores bastante mais elevados ao longo da sua largura, podendo observar os tons de azul claro mesmo ao pé da parede mais distante das janelas. Em contrapartida, na sala negra os valores das iluminâncias e do FLD baixam rapidamente à medida que a distância às janelas exteriores aumenta, devido à pouca refletância do material de revestimento. Relativamente às iluminâncias máximas temos uma diferença, relativamente à “sala branca” e sala “negra”, na ordem dos 120 lux e no FLD uma diferença de 1%.

De seguida vai ser estudada a distribuição da iluminação natural na sala de aula para condições de céu limpo.

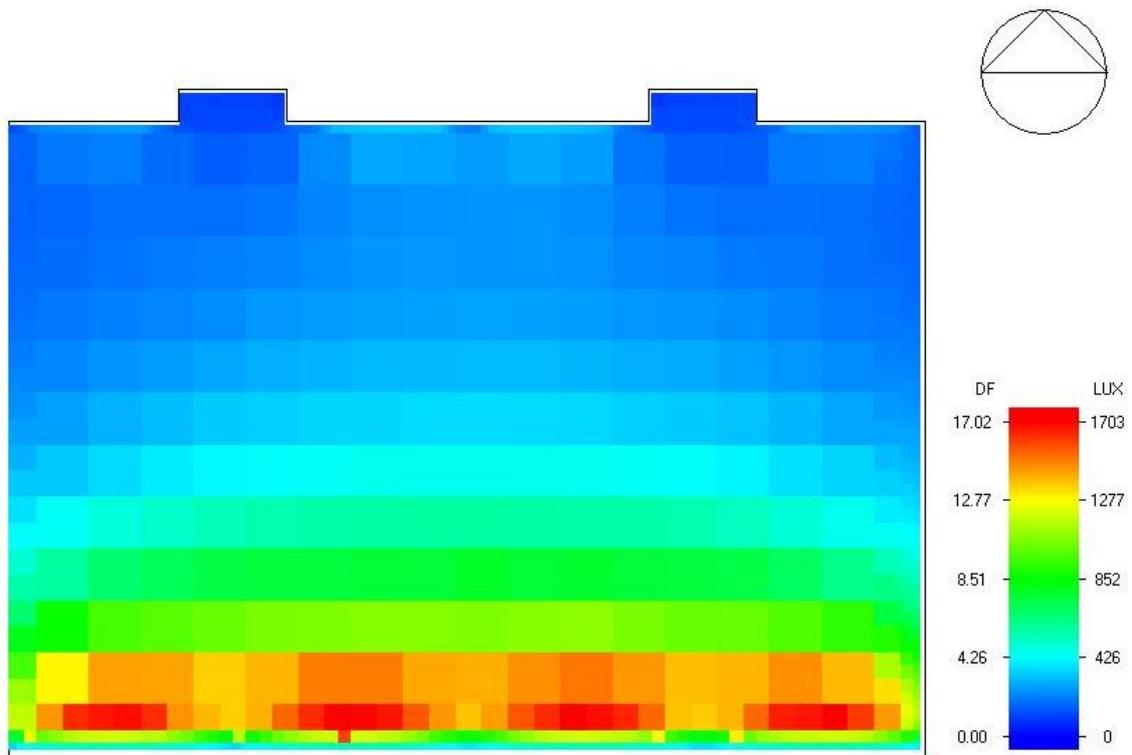


Figura 5.3 – Distribuição da iluminação natural na sala branca.

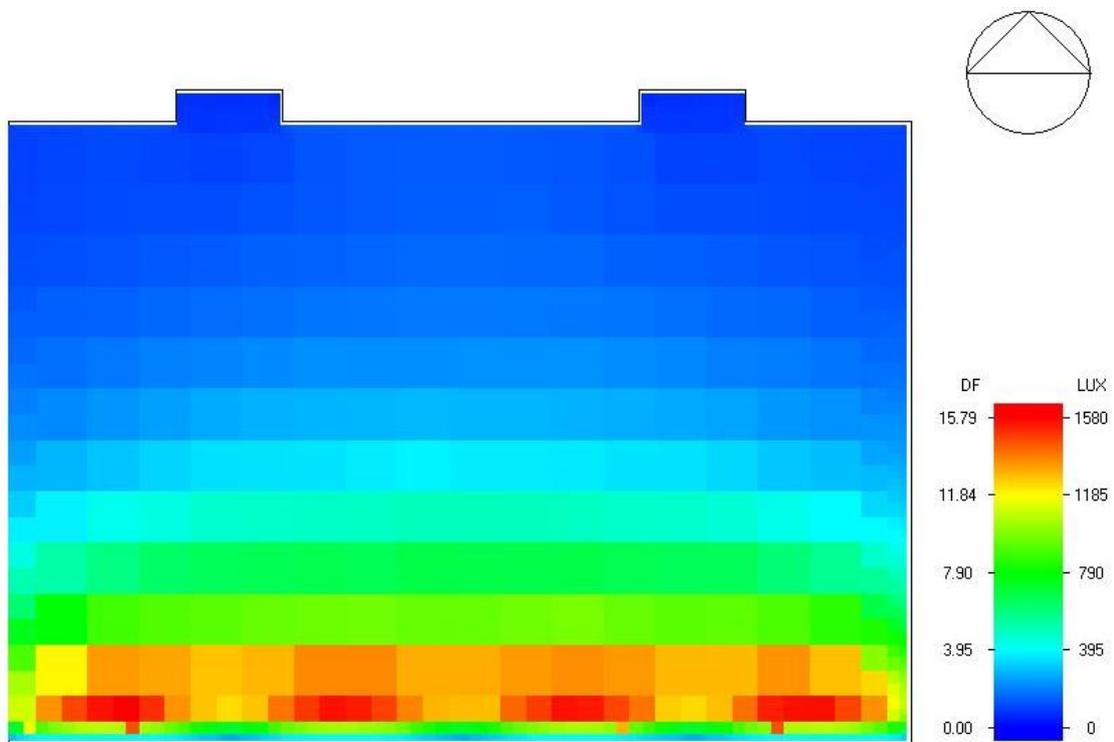


Figura 5.4 – Distribuição da iluminação natural na sala negra.

5.3 “Tipos de céu”

Conforme é defendido por Kensek e Suk (2011) é também importante conhecer a distribuição da iluminação natural para condições de céu limpo, uma vez que é possível encontrarem-se, com alguma frequência, estas condições climatéricas em climas amenos e temperados. Neste estudo vai ser simulada a iluminação natural presente na sala SC 3.6 quando predomina um céu com uma percentagem de nuvens abaixo dos 30%, ou seja, céu (quase) limpo (padrão CIE). Neste caso o programa obriga a selecionar o dia e a hora da simulação, sendo selecionado os dias dos dois solstícios, 21 de Dezembro e 21 de Junho, pois representam o dia mais curto e mais comprido, respetivamente. De maneira a apanhar o sol numa posição elevada foi selecionado as 14 horas para ambos os dias.

Na Figura 5.5 e Figura 5.6 está representada a distribuição da iluminação natural em ambos os casos e no Quadro 5.4 os valores das iluminâncias e do FLD médio.

Quadro 5.4 – Iluminâncias e FLD para condições de céu aberto.

Dia e hora	Iluminâncias (mín-máx)	FLD médio
21 de Junho às 14:00h	216-2280 lux	10,45 %
21 de Dezembro às 14:00h	324-2190 lux	18,5 %
Sala de referência	98-1673 lux	5,49 %

Observando a Figura 5.5 e Figura 5.6 é possível afirmar que no dia 21 de Dezembro os valores da iluminâncias e do FLD são superiores aos do dia 21 de Junho na globalidade da sala de aula, estando esta conclusão em concordância com o valor do FLD médio, apresentado no Quadro 5.4. No entanto, o valor máximo da iluminância é superior no dia 21 de Junho pois a radiação proveniente do Sol é mais intensa nessa altura do ano. Outro aspeto que explica os níveis mais elevados de iluminâncias, na parte mais afastada da sala, a 21 de Dezembro é a posição solar ser mais baixa no zénite nesta altura do ano, originando raios solares mais horizontais e consequentemente uma maior penetração em profundidade da luz natural, tal como pode ser observado na Figura 5.5 (zonas a verde junto à parede oposta às janelas). A horizontalidade e verticalidade dos raios solares é explicada pelas zonas a vermelho na Figura 5.5 e Figura 5.6, onde se pode observar uma área superior de radiação incidente (a vermelho) no dia 21 de Dezembro (raios mais horizontais) do que no dia 21 de Junho (raios mais verticais, pois o Sol encontra-se numa posição mais elevada no zénite).

Relativamente aos resultados de referência é notória a diferença nas iluminâncias e no FLD (Quadro 5.4), podendo-se afirmar que acaba por ser relevante ter em conta os resultados apresentados em condições de céu limpo quando estamos na presença de climas onde seja frequente a verificação destas condições climatéricas, conforme também é defendido por Kensek e Suk (2011).

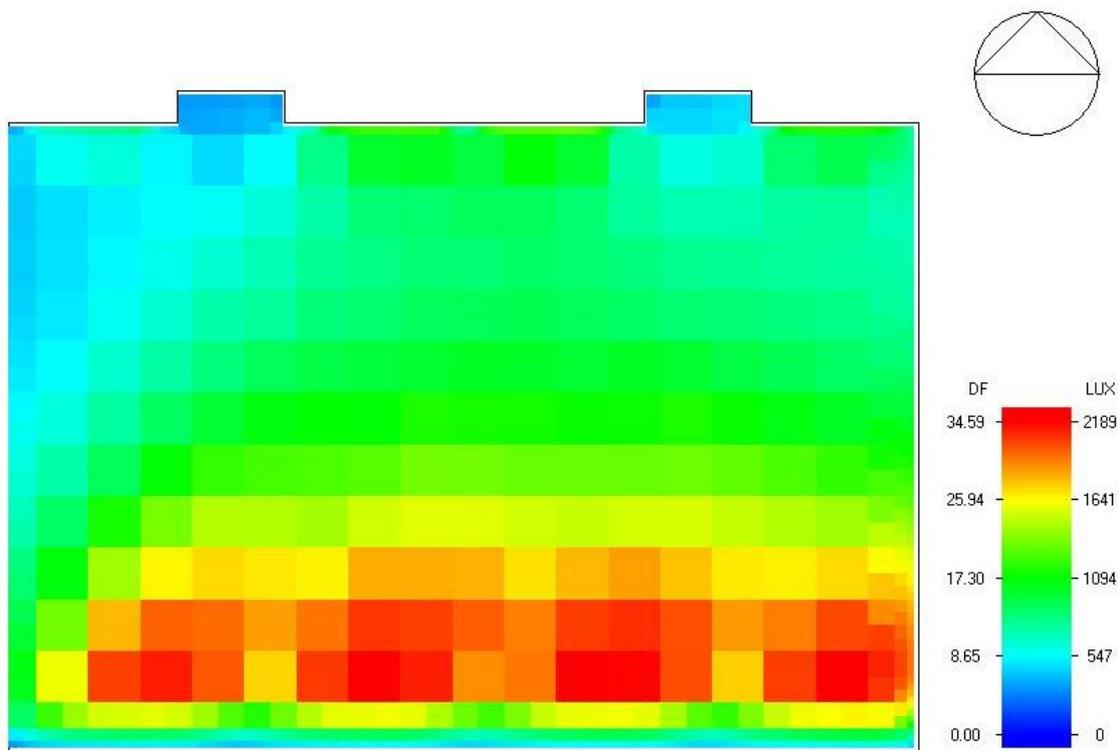


Figura 5.5 – Distribuição da iluminação natural no dia 21 de Dezembro às 14:00 horas.

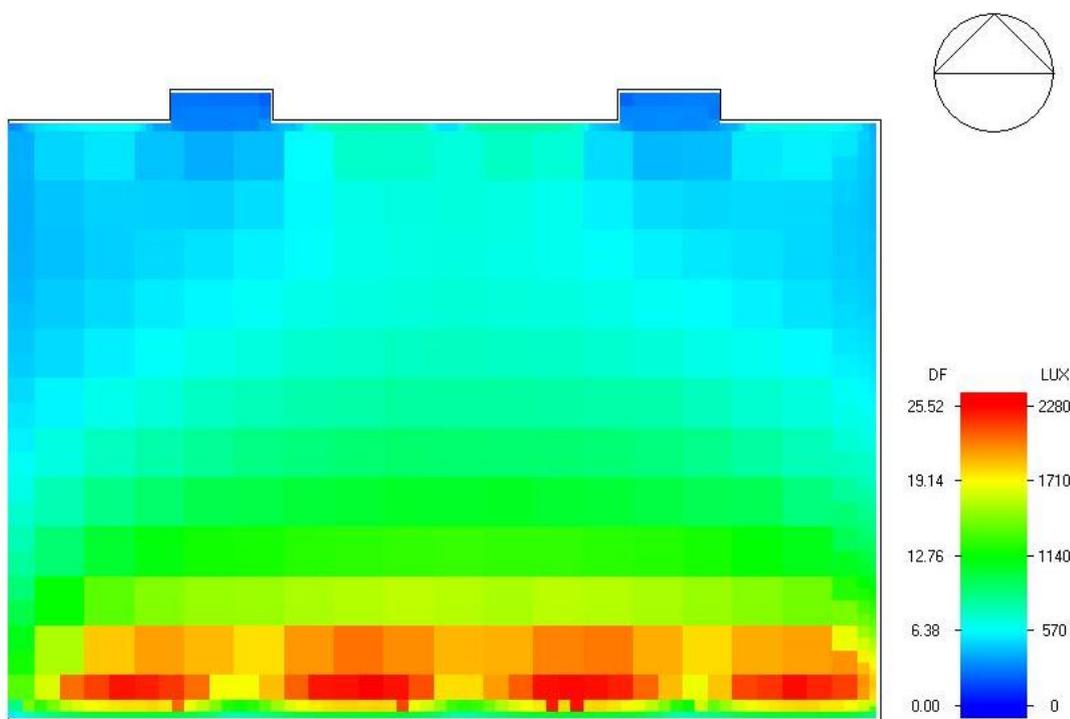


Figura 5.6 – Distribuição da iluminação natural no dia 21 de Junho às 14:00 horas.

Na próxima secção vai ser analisada a distribuição de iluminação natural aquando da introdução de palas de sombreamento no modelo da sala de aula de referência.

5.4 Palas de sombreamento

Nesta secção vai ser comparada a influência de duas palas, com dimensões distintas (Quadro 5.5), inseridas no modelo da sala SC 3.6 (Figura 5.7).

Quadro 5.5 – Dimensões das palas.

	Dimensões (comp. x larg. x esp.)	Cor/tonalidade
Pala 1	9,15x0,50x0,20 (m)	Branco
Pala 2	9,15x1,00x0,20 (m)	Branco

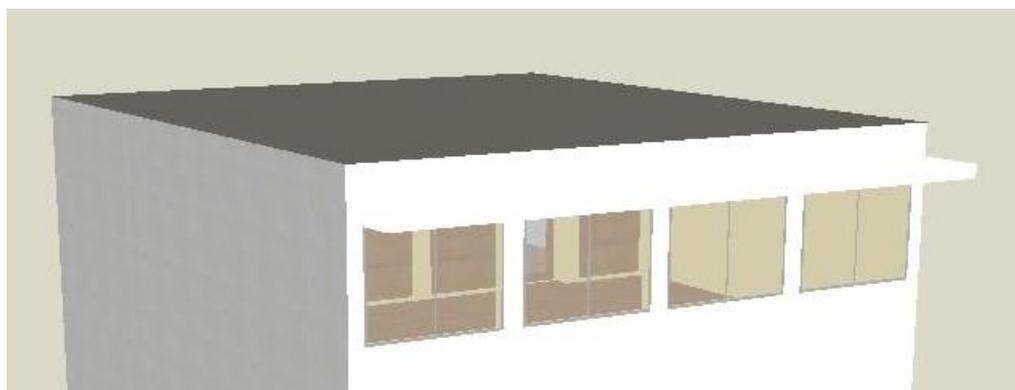


Figura 5.7 – Modelo com a pala de 1 m.

Na Figura 5.8 e Figura 5.9 é apresentada a distribuição da iluminação natural pela sala SC 3.6 com a aplicação das palas com 0,5 e 1,0 m de largura, respetivamente.

Como pode ser observado Figura 5.8 e Figura 5.9 a luz natural é distribuída de forma idêntica em ambas os casos.

No entanto, no caso da Pala 1, os valores das iluminâncias e do FLD (Quadro 5.6) são relativamente superiores, quando comparados com o caso da Pala 2. Em ambos os casos (Pala 1 e 2) são cumpridos os requisitos mínimos de 300 lux até mais ou menos a meio da sala de aula. Ambos estes modelos acabam por apresentar bons valores para estes dois parâmetros, sem que com isso se atinjam elevados valores (Iluminância e FLD) junto das janelas exteriores, o que acaba por ser uma vantagem relativamente à sala de referência.

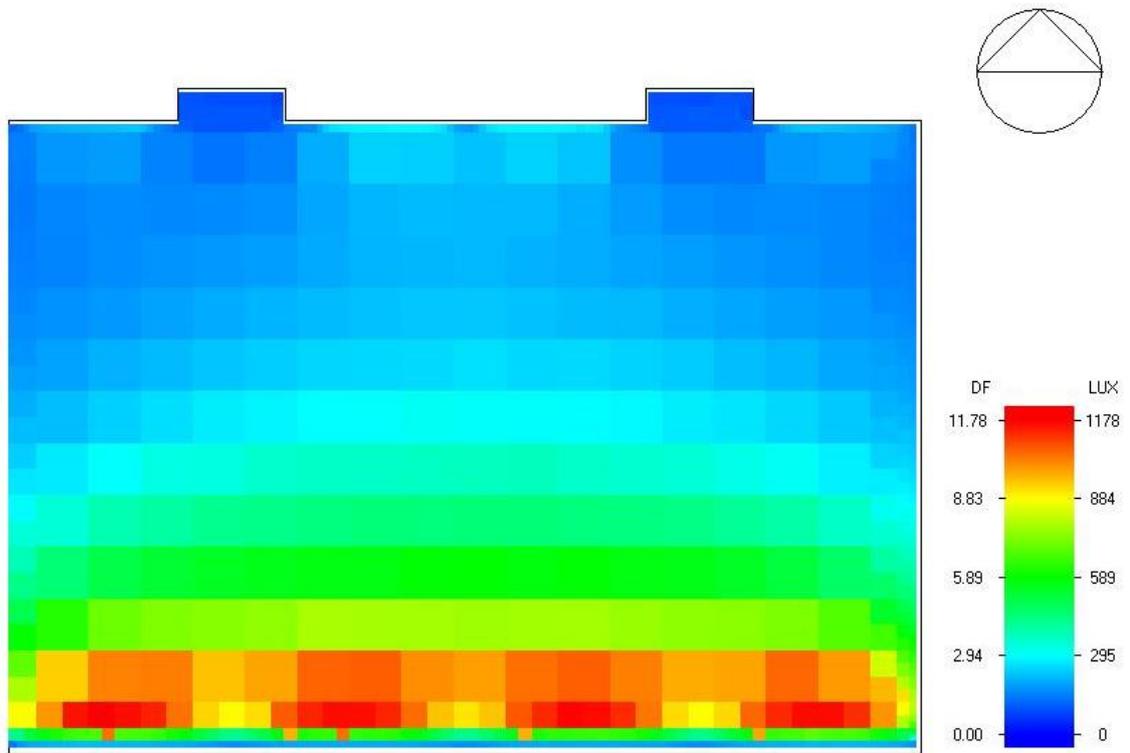


Figura 5.8 – Distribuição da iluminação natural com a pala de 0,5 m de largura.

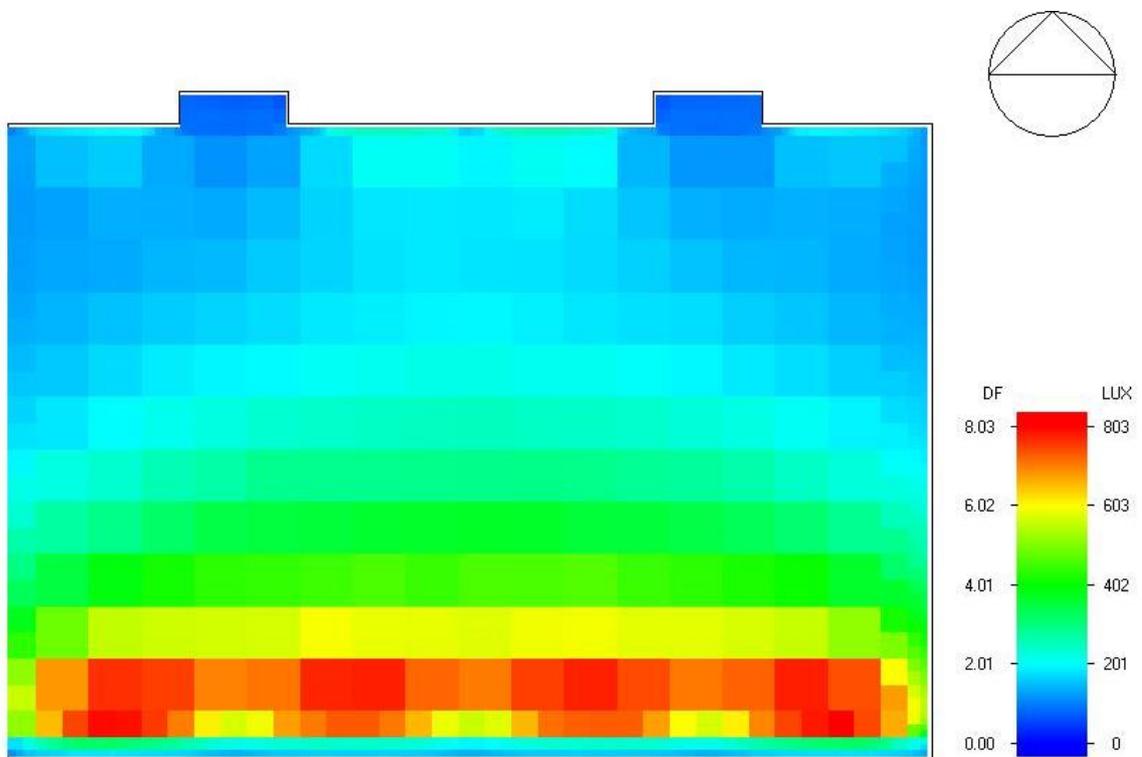


Figura 5.9 – Distribuição da iluminação natural com a pala de 1,0 m de largura.

Quadro 5.6 – Valores das Iluminâncias e FLD médio para a Pala 1 e 2.

	Iluminâncias (mín-máx)	FLD médio
Sala de referência (s/ pala)	98-1673 lux	5,49 %
Pala 1 (0,5 m)	78-1178 lux	4,11 %
Pala 2 (1,0 m)	67-803 lux	3,13 %

Para finalizar o Capítulo irá ser simulada a iluminação natural depois da introdução de claraboias no modelo da sala de aula de referência.

5.5 Claraboia

Para finalizar o estudo paramétrico é analisada a influência que uma claraboia tem na distribuição da iluminação natural da sala de aula de referência. Para tal, foram modeladas duas claraboias, sendo que uma delas é igual à das salas SC 3.1, SC 3.2 e SC 3.3, presentes no mesmo edifício e piso (3º) da sala de referência. A outra claraboia tem o dobro da largura, mas mantém as restantes dimensões. O vidro usado em ambas as claraboias é igual (vidro duplo) ao apresentado na Secção 4.3.3. Para dar maior realismo ao modelo foi ainda adicionada uma viga superior presente nas três salas supramencionadas que percorre toda a largura (6,10 m) da sala de aula. No Quadro 5.7 são descritas as dimensões destes elementos.

Ambas as claraboias são modeladas no endireito da parede divisória que divide a sala e o corredor. A viga encontra-se mesmo a meio do comprimento da sala, percorrendo toda a largura da mesma.

Quadro 5.7 – Dimensões das claraboias e da viga.

	Dimensões (comp. x larg. x alt.)
Claraboia 1	9,15x0,39x1,59 (m)
Claraboia 2	9,15x0,78x1,59 (m)
Viga	6,10x0,24x0,66 (m)

No Quadro 5.8 estão os valores: médio, mínimo e máximo do FLD bem como as iluminâncias mínimas e máximas da sala de aula com as diferentes soluções de claraboia.

Quadro 5.8 – Valores do Fator de Luz do dia para a Sala SC 3.6.

	Iluminâncias (mín-máx)	FLD médio
Claraboia 1	149-1671 lux	5,6 %
Claraboia 2	275-1716 lux	7,44 %
Sala de referência	98-1673 lux	5,49 %



Figura 5.10 – Modelo da sala de aula com a introdução da Claraboia 1.

Comparando com os resultados da sala de referência, o modelo com a Claraboia 1 apresenta valores de iluminâncias e FLD muito idênticos junto às janelas exteriores, no entanto, as zonas perto da parede divisória, no endireito da claraboia, acabam por apresentar valores recomendados para a prática educacional, tal como se pode observar na Figura 5.11 (zona azul clara e verde). No entanto, a meio da sala ainda temos valores abaixo dos recomendados.

Relativamente à solução que incorpora a Claraboia 2 (Figura 5.12) os valores das iluminâncias acabam por ser bastante mais elevados na generalidade da sala, quando comparados com os da Claraboia 1 e sala de referência. Os valores por baixo da claraboia acabam estar bastante acima dos recomendados pela norma EN 12464-1:2011.

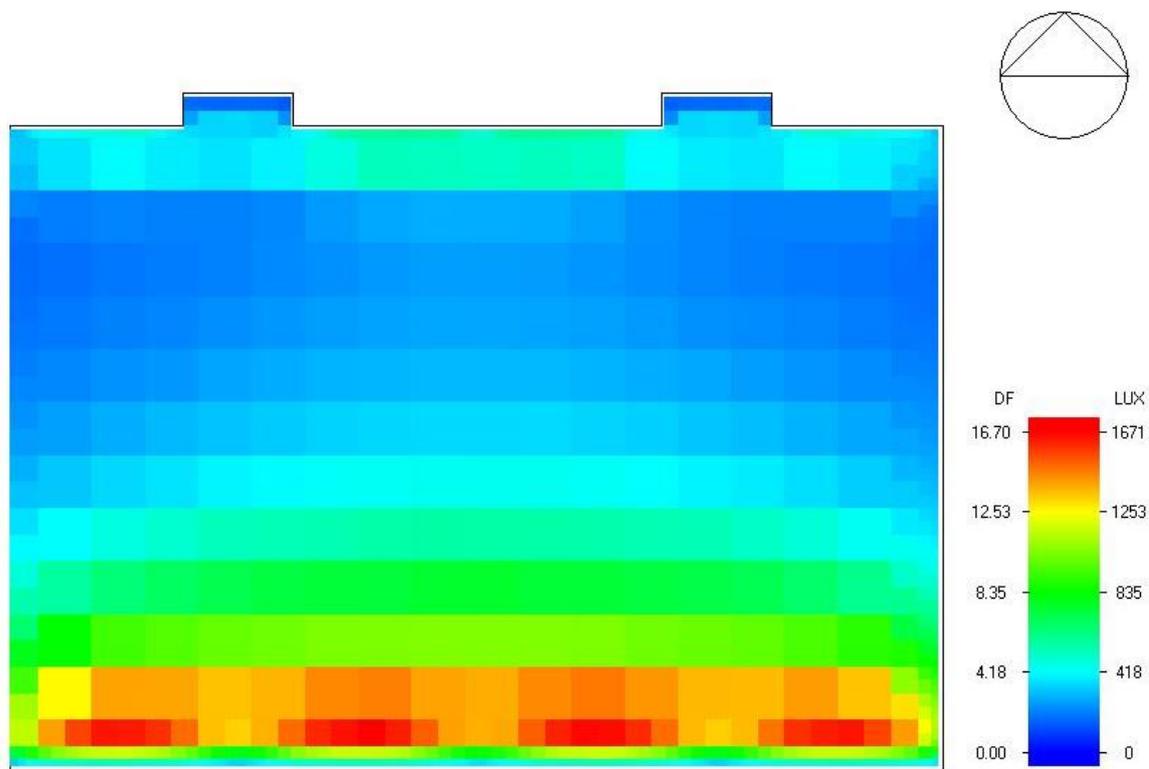


Figura 5.11 – Distribuição da iluminação natural com Claraboia 1.

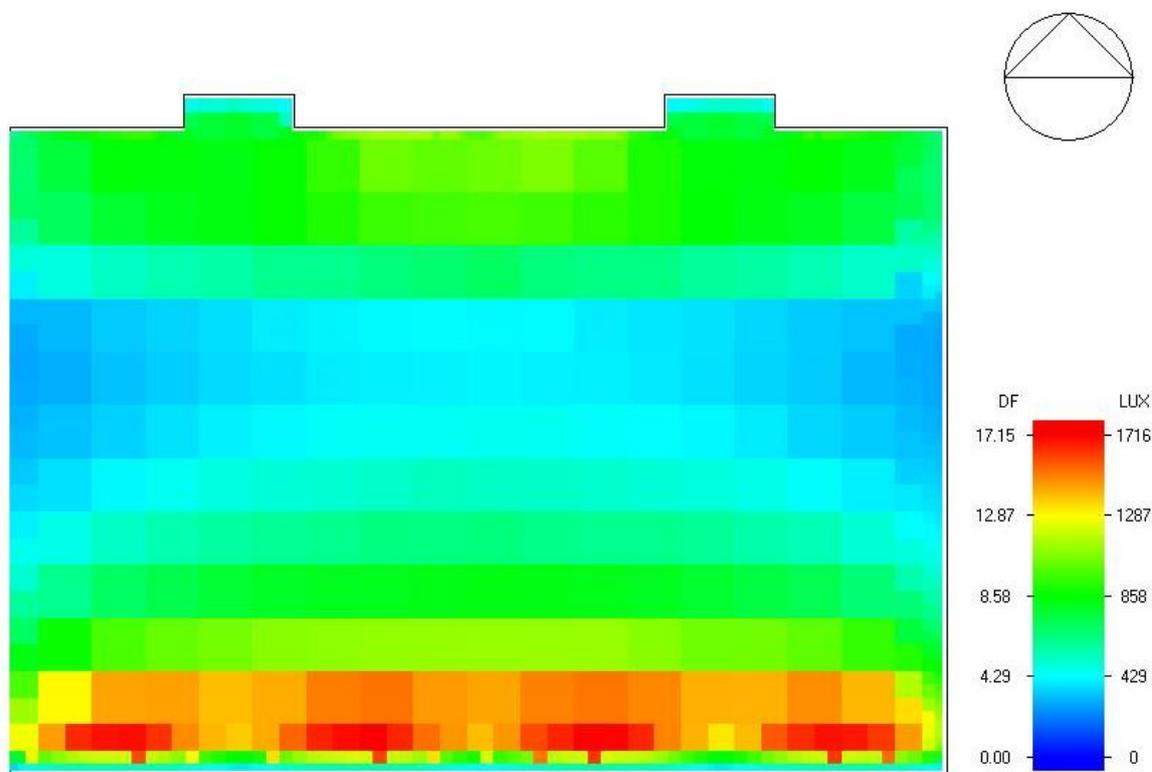


Figura 5.12 – Distribuição da iluminação natural com Claraboia 2.

5.6 Visão global dos resultados obtidos

Para finalizar o estudo paramétrico é necessário fazer uma análise mais global aos resultados obtidos no decorrer deste capítulo. Para tal, é apresentado no Quadro 5.9, os valores das iluminâncias e do FLD para os casos analisados nas secções 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, bem como as diferenças verificadas para os resultados de referência.

Quadro 5.9 – Valores das iluminâncias e FLD para todos os parâmetros do estudo paramétrico (diferenças relativas aos valores de referência assinaladas a azul).

		Iluminâncias [lux] mín-máx (diferenças)	FLD médio [%] (diferença)
Sala de referência (SC 3.6)		<u>98-1673</u>	5,49
Tipo de Vidro	Baixa emissividade	76-1351 (-22,45 %; -19,25 %)	2,95 (-2,54 %)
	Refletante	23-364 (-76,53 %; -78,24 %)	1,29 (-4,2 %)
Cor do Revestimento	Branco	127-1703 (+29,59 %; +1,79 %)	5,70 (+0,21 %)
	Negro	62-1580 (-36,73 %; -5,56 %)	4,65 (-0,84 %)
“Tipo de céu” – Céu limpo	21 de Dezembro	324-2190 (+230,61 %; +30,90 %)	18,5 (+13,01 %)
	21 de Junho	216-2280 (+120,41 %; +36,28 %)	10,45 (+4,96 %)
Pala	Pala 1	78-1178 (-20,41 %; -29,59 %)	4,11 (-1,38 %)
	Pala 2	67-803 (-31,63 %; -52,00 %)	3,13 (-2,36 %)
Claraboia	Claraboia 1	149-1671 (+52,04 %; -0,12 %)	5,60 (+0,11 %)
	Claraboia 2	275-1716 (+180,61 %; +2,57 %)	7,44 (+1,95 %)

No global é possível observar uma maior alteração nos níveis mínimos para as iluminâncias, sendo este o indicador que sofre mais alterações e aquele que requer maior atenção aquando da análise da distribuição da iluminação natural. Os valores máximos das iluminâncias estão mais dependentes das condições climatéricas, das mudanças nos constituintes das janelas (tipo de vidro) e na presença de palas para sombreamento, pois acabam por condicionar a entrada de luz natural. Nos casos em que estes parâmetros não foram alterados as diferenças relativamente aos resultados de referência acabam por ser menores.

Conforme pode ser observado no Quadro 5.9, as condições de céu limpo foram as que apresentaram os maiores aumentos relativamente às iluminâncias máximas (+30,90 % e +36,28 %), mínimas (+230,61 % e +120,41 %) e FLD médio (+13,01 % e +4,96 %). As condições de céu limpo podem apresentar também alguns inconvenientes, isto é, são também mais propícios a fenómenos de encadeamento e sobreaquecimento. Em locais onde este “tipo de céu” (climas temperados e amenos) se verifique com alguma regularidade também é relevante estudar este tipo de céu.

Relativamente ao tipo de vidro, o vidro refletante é aquele que apresenta as maiores reduções relativamente à iluminância máxima (-78,24 %), mínima (-76,53 %) e FLD médio (4,2 %), representando uma má solução para este tipo de atividade, pois, tal como foi referido no capítulo anterior, esta solução acaba apenas por satisfazer os requisitos mínimos de iluminação (300 lux) nas zonas junto às janelas exteriores, não iluminando suficientemente as restantes áreas.

Quanto às cores dos materiais de revestimento, apesar dos resultados serem coerentes (redução das iluminâncias e FLD para cores mais escuras e aumento dos mesmos para cores mais claras), as diferenças das iluminâncias (+29,59 % e +1,79 %, para a cor branca e -36,73 % -5,56 % para a cor negra) e FLD (+0,21 %, para a cor branca e -0,84%, para a cor negra), relativamente aos resultados de referência, acabam por ter pouco impacto, quando comparadas com os outros parâmetros estudados.

Relativamente às claraboias, as mudanças acabam por ser mais relevantes nos valores mínimos das iluminâncias (+52,04 % e +180,61 %, para o caso 1 e 2, respetivamente), tal como esperado. Pode-se concluir que, conjuntamente com a Figura 5.11 e Figura 5.12 estas soluções acabam por trazer melhorias significativas nas zonas mais afastadas das janelas exteriores, possibilitando a realização das tarefas educacionais dispensando ou minimizando o recurso à iluminação artificial durante o dia. As diferenças de -0,12 % (Claraboia 1) e +2,57 % (Claraboia 2), nas iluminâncias máximas, não são muito expressivas pois não houve mudanças nas janelas exteriores.

Os estudos das Palas 1 e 2 juntamente com o do vidro duplo de baixa emissividade acabam por representar mudanças mais significativas nas iluminâncias máximas da sala de aula. As diferenças de -22,45 % (vidro duplo), -20,41 % (Pala 1) e -31,63 % (Pala 2) neste indicador, quando comparados com os resultados de referência, permitem concluir que esta decréscimo está de acordo com a redução da presença de luz natural nas zonas das janelas exteriores. É possível também afirmar que, apesar destes três estudos apresentarem uma diminuição generalizada das iluminâncias e do FLD médio, os requisitos mínimos de 300 lux acabam por ser cumpridos até meio da sala (Figura 5.1, Figura 5.8 e Figura 5.9), apresentando por isso, uma solução válida e de possível aplicabilidade.

É ainda importante referir que estes resultados devem ser analisados em conjunto, não deixando de parte a observação das imagens relativas à previsão da distribuição da iluminação natural no interior das salas, para cada um destes parâmetros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Ao longo deste trabalho foi estudada a importância da iluminação natural no interior de edifícios, em particular nas salas de aula. Foi feito um levantamento dos programas de cálculo automático mais usados atualmente para simulação e análise da iluminação natural em edifícios. Optou-se por escolher o *software DesignBuilder* devido à sua capacidade em incorporar os aspetos da modelação tridimensional e da simulação da iluminação natural no mesmo *interface*.

Utilizando o *DesignBuilder* foi modelada a sala de aula do caso de estudo e prevista a distribuição da iluminação natural no seu interior, para condições de céu encoberto. Para tal, foi preciso ter em atenção alguns aspetos e parâmetros construtivos, tais como a localização, a tipologia, as cores dos materiais usados nos revestimentos interiores e as dimensões reais da sala de aula. Foi também analisada a norma EN 12464-1:2011 para saber quais os valores recomendados para as iluminâncias e fator de luz do dia (FLD) em espaços educacionais.

Foi também realizado um estudo paramétrico, que teve por base o modelo da sala de aula de referência, onde foi possível quantificar e analisar o impacto de diferentes soluções de vidro, de diferentes tonalidades dos materiais de revestimento, de outras condições de céu, da incorporação de claraboias e palas de sombreamento na iluminação natural no interior da mesma.

No primeiro parâmetro, onde foi avaliada a importância do tipo de vidro, verificou-se que a solução de vidro duplo de baixa emissividade é uma solução viável pois apresenta resultados idênticos aos do vidro normal (valores recomendados de iluminância e FLD até metade da profundidade da sala), sem que se registem valores tão elevados de iluminâncias, que podem trazer sobreaquecimento e encadeamento, perto das janelas exteriores. Em contrapartida, o vidro refletante acaba por ser uma má solução para espaços educacionais, onde as dimensões dos compartimentos são consideráveis, pois os resultados acabam por apenas satisfazer os requisitos de iluminância e FLD junto das janelas exteriores.

No segundo parâmetro foi avaliado o impacto da cor dos materiais de revestimento na distribuição da iluminação natural na sala de aula, tendo sido usado um material com refletância alta (80%) e outro com refletância baixa (10%). As diferenças para as iluminâncias e FLD de referência acabaram por ser menos expressivos, quando comparados com os restantes parâmetros.

No terceiro estudo foram simuladas condições de céu limpo para o modelo de referência da sala de aula. Estes resultados acabaram por exibir aumentos bastantes significativos em ambos os parâmetros, iluminâncias e FLD, apresentando uma melhor distribuição da iluminação natural na sala de aula. No entanto, os valores próximos das janelas acabam também por ser bastante mais elevados, podendo trazer fenómenos de brilho excessivo e encadeamento nestas zonas.

No quarto estudo foi estudada a introdução de duas soluções de palas de sombreamento horizontais no modelo da sala de aula, com 0,5 e 1,0 m de largura. Nos dois casos verificou-se um decréscimo nas iluminâncias máximas e mínimas e FLD, comparativamente aos valores de referência. No entanto, os requisitos mínimos para ambos os parâmetros foram cumpridos até metade da largura da sala. A vantagem da aplicação das palas de sombreamento está no decréscimo dos valores destes parâmetros nas zonas das janelas exteriores.

No quinto e último estudo foram analisadas duas soluções de claraboias, uma com 0,39m de largura e a outra com 0,78m de largura, colocadas ao longo da parede divisória entre a sala de aula e o corredor, ou seja, na parede oposta às janelas. Os resultados para os parâmetros da iluminância e FLD junto à parede divisória passaram a cumprir os mínimos recomendados pela norma EN 12464-1:2011, sendo que no caso da claraboia maior a distribuição da iluminação natural acabou por ser bastante uniforme em praticamente toda a sala de aula.

Soluções como o vidro de baixa emissividade e as palas de sombreamento acabam por ser viáveis dependendo das dimensões do compartimento e das aberturas exteriores. As claraboias quando aplicadas nas zonas mais afastadas das aberturas exteriores, e consequentemente nas zonas de mais difícil penetração para a luz natural, acabam por trazer níveis de iluminâncias e FLD que possibilitam a realização das tarefas em espaços educativos. Por fim, quando estamos perante salas de aula situadas em locais que apresentam condições de céu limpo (mais frequentes em climas amenos e temperados), é necessário realizar e ter em conta os resultados das simulações para este tipo de céu, pois os ganhos relativos às iluminâncias e FLD acabam por ser muito superiores às condições de céu encoberto, podendo trazer fenómenos inconvenientes, como o sobreaquecimento e encadeamento.

Para finalizar, de entre os parâmetros avaliados no estudo paramétrico, o que apresentou menores variações relativamente às iluminâncias mínimas, máximas e FLD foram as cores dos materiais de revestimento, sendo que, em contrapartida, o parâmetro com maiores discrepâncias para os valores de referência foi as condições de céu limpo. Ainda é importante referir que os resultados para os indicadores (iluminância mínima, máxima e FLD) da iluminação natural presentes em salas de aula devem ser analisados em conjunto com as imagens que mostram a distribuição destes níveis em toda a extensão da mesma, de forma a haver uma maior coerência e exatidão nas conclusões a retirar.

6.2 Trabalhos futuros

Tendo em conta os resultados e as conclusões obtidas no decorrer deste trabalho, seria importante em trabalhos futuros realizar um estudo termo-energético, onde fossem modelados com rigor os parâmetros construtivos e os sistemas de iluminação artificial, a acompanhar os resultados da distribuição da iluminação natural, de forma a poder analisar-se o comportamento térmico e os consumos energéticos (usados para iluminação artificial, aquecimento e arrefecimento) associados a cada solução. Desta forma seria possível escolher com maior rigor as soluções mais eficientes adaptadas às salas de aula, estabelecendo o tão desejado equilíbrio entre o conforto visual provido pela iluminação natural e a eficiência energética resultante dos consumos para iluminação artificial e para aquecimento/arrefecimento dos espaços, tendo também em consideração os ganhos solares e internos (e.g. calor libertado pelos sistemas de iluminação).

Seria também interessante acompanhar o estudo da iluminação natural com o cálculo do índice de encadeamento, selecionando as soluções que apresentem um melhor balanço entre a uniformidade luminária e o conforto visual para os ocupantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, I., Munoz, C., Campano, M. A., & Navarro, J. (2015). «Analysis of daylight factors and energy saving allowed by windows under overcast sky conditions». *Renewable Energy*, 77(1), 194–207.
- Alves, F. L. de P. L. (2008). «*Medidas de Eficiência Energética na Iluminação Integrando Luz Natural*». Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- ArchiCAD@. (2016). <http://archicad.com/en/all-about-archicad/> - Software ArchiCAD. (Acedido a 27/05/2016).
- ArchiW@. (2016). <https://en.wikipedia.org/wiki/ArchiCAD>. - Software ArchiCAD (Acedido a 27/05/2016).
- AutoCAD@. (2016). <https://en.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>. - Software AutoCAD (Acedido a 27/05/2016).
- Baker, N. V., Fanchiotti, A., & Steemers, K. (1993). «*Daylighting in Architecture: A European Reference Book*». James & James.
- Bellia, L., Marino, C., Minichiello, F., & Pedace, A. (2014). «An overview on solar shading systems for buildings». *Energy Procedia*, 62, 309–317.
- Boubekri, M. (2004). «A Overview of The Current State of Daylight Legislation». *Journal of the Human-Environment System*, 7(2), 57–63.
- Boubekri, M. (2008). «*Daylighting, Architecture and Health. Building Design Strategies*». Elsevier ltd. Routledge.
- Boyce, P., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). «The Benefits of Daylight through Windows». *Lighting Research Center*, 1(1), 1–88.
- Carvalho, L. C. de. (1986). «*Vocabulário Internacional de Iluminação Natural. 1970: tradução parcial I - termos e definições correspondentes com interesse para o estudo da iluminação natural e matérias afins.*» Lisboa: LNEC.
- Castanheira, L. M. (2012). «*Estudo da influência da luz natural na qualidade da iluminação e na eficiência energética*». Tese de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa.
- CIE. (1994). *Commission Internationale de l'Eclairage* «*Spatial distribution of daylight: Luminance distribution of various reference skies.*»
- ConceitosL@. (2016). <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/measuring-light-levels>. - Conceitos luminários (consultado a 20/05/2016).
- Coutinho, M. S. (2009). «*Avaliação das Condições de Iluminação Natural através de Simulações em Modelos Virtuais*». Tese de Mestrado - Instituto Superior Técnico.
- Cruz, P., & Pequeno, J. (2005). «Vidro na arquitectura». *Arte & Construção*, 48–53.
-

-
- Daysim@. (2016). <http://daysim.ning.com/>. - Software Daysim (Acedido a 18/05/2016).
- Diva4Rhino@. (2016). <http://diva4rhino.com/>. - Software Diva for Rhino (Acedido a 20/05/2016).
- Dsb. (2009). «DesignBuilder 2.1 User's Manual».
- Edwards, L., & Torcellini, P. (2002). «A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants». *Colorado: National Renewable Energy Laboratory – U.S. Department of Energy*, (July), 1–58.
- Energy, U. S. D. of. (1998). U.S Department of Energy«Spectrally Selective Glazings». *DOE/EE-0173 Technical Report*, ..., 1–46.
- EnergyPlus@. (2016). <https://energyplus.net/>. - Software EnergyPlus (Acedido a 24/05/2016).
- EspectroLV@. (2016). <http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2007/12/espectrovisivel-da-luz.jpg>. - Espectro da Luz Visível (Acedido a 06/06/2016).
- Eur-lex. (2010). *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*.
- Fleron, J. F. (2009). «Google SketchUp: A Powerful Tool for Teaching , Learning and Applying Geometry». *Earth*, 1–33.
- Fontoynt, M. (2014). *Daylight Performance of Buildings*. Routledge.
- Garrocho, J. S. (2005). «Luz natural e projeto de arquitetura - Estratégias para iluminação zenital em centros de compras». Tese de Mestrado - Universidade de Brasília.
- Gherri, B. (2015). «Assessment of Daylight Performance in Buildings. Methods and design strategies». WIT Press.
- GoogleSU@. (2016). <http://help.sketchup.com/en/content/sketchup-make-and-sketchup-pro>. - Software Google SketchUp (Acedido a 27/05/2016).
- Hopkinson, R. G., Petherbridge, P., & Longmore, J. (1975). «Iluminação natural». *Tradução e prefácio de António Sarmiento Lobato de Faria*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Hunt, R. W. G., & Pointer, M. R. (2011). «Measuring Colour: Fourth Edition». *Measuring Colour: Fourth Edition*. John Wiley and Sons.
- IEA. (2000). «Daylight in Buildings». Em *Task 21/ ECBCS Annex 29* (p. 262).
- INE, I. P., & DGEG. (2011). «Inquerito ao consumo de energia doméstico 2010».
- Kensek, K., & Suk, J. (2011). Daylight Factor (overcast sky) versus Daylight Availability (clear sky) in Computer-based Daylighting Simulations. *Journal of Creative Sustainable Architecture & Built ...*, 1(November), 3–14.
- LAR@. (2016a). http://www.autodesk.com/products/lighting-analysis-revit/overview#_ga=1.84983769.1157180692.1463158152. - Software Light Analysis for Revit (Acedido a 24/05/2016).
- LAR@. (2016b). <https://knowledge.autodesk.com/support/green-building-studio/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/BPA-PerformanceStudies/files/GUID-5AE6A81D-B170-47A5-8BF8-190235F25287-htm.html>. - Software Light Analysis for
-

- Revit (Acedido a 24/05/2016).
- Li, D. H. W. (2010). «A review of daylight illuminance determinations and energy implications». *Applied Energy*, 87(7), 2109–2118.
- Li, D. H. W., Tang, H. L., Lee, E. W. M., & Muneer, T. (2010). «Classification of CIE standard skies using probabilistic neural networks». *International Journal of Climatology*, 30(2), 305–315.
- LuminanceM@. (2016). <http://sensing.konicaminolta.us/technologies/luminance-meters/>. - Luminance Meters (Acedido a 03/06/2016).
- Martins, N. T. L. (2010). «*Compatibilização de Exigências Relativas a Iluminação e Ganhos Solares em Edifícios de Habitação*». Tese de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa.
- Mendes, V. G. P. (2011). «*Quantificação do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados - Modelo de cálculo*». Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- MetricsIN@. (2016). <http://www.buildings.com/article-details/articleid/6340/title/a-new-better-way-to-calculate-daylight.aspx>. - Métricas de iluminação natural (Acedido a 01/06/2016).
- Minolta, K. (2012). «Illuminance Metter T10-A Series».
- MinoltaIM@. (2016). <http://sensing.konicaminolta.asia/products/t-10a-illuminance-meter/>. - Illuminance Meters (Acedido a 03/06/2016).
- NaturalWorks@. (2016). <http://www.natural-works.com/db/>. - Software DesignBuilder (Acedido a 19/05/2016).
- NormasIN@. (2016). <http://thedaylightsite.com/library-3/standard-guidelines/standards/>. - Normas de Iluminação Natural (Acedido a 02/06/2016).
- Nurbs@. (2016). <https://www.rhino3d.com/nurbs>. - Software Rhinoceros (Acedido a 27/05/2016).
- Oliveira, D. M. A. (1988). «*Lexicoteca - Moderna Enciclopédia Universal Volume 18*». Círculo de Leitores.
- Palhinha, M. S. J. (2009). «*Sistemas de sombreamento em arquitectura: Proposta de um novo método de concepção e dimensionamento*». Tese de Mestrado - Instituto Superior Técnico.
- Pereira, M. de C. F. S. (2011). «*Análise Comparativa de Ferramentas Informáticas de Simulação do Desempenho de Iluminação Natural*». Tese de Mestrado - Instituto Superior Técnico.
- Radiance@. (2016). <https://www.radiance-online.org/about>. - Software Radiance (Acedido a 24/05/2016).
- Revit@. (2016). <http://www.autodesk.pt/products/revit-family/overview>. - Software Autodesk Revit (Acedido a 27/05/2016).
- Rhinoceros@. (2016). https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D. - Software Rhinoceros (Acedido a 27/05/2016).

-
- RhinoF@. (2016). <https://www.rhino3d.com/features>. - Software Rhinoceros (Acedido a 27/05/2016).
- Rogers, Z., & Goldman, D. (2006). «Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool». *Boulder, Colorado: Architectural Energy Corporation*, 1–52.
- Santos, A. J. (2013). «Abordagens inovadoras para uma caracterização dinâmica da iluminação natural nos edifícios». Em LNEC (Ed.), *3º Congresso da Luz: Ambiente e Sustentabilidade* (pp. 6–8). Lisboa: LNEC.
- Santos, A. J. (2014). «A iluminação natural nos edifícios. Uma perspectiva no âmbito do conforto ambiental e da eficiência energética». Lisboa: LNEC.
- SLL. (2009). «*The Society of Light and Lighting Handbook*». *Society of Light and Lighting* (Vol. 44).
- Technical Committee CEN/TC 169 «Light and Lighting». (2011). «EN 12464-1 Light and lighting - Lighting of work places - Parte 1: Indoor work places». Em *European Standard* (pp. 1–57).
- The Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (2002). «Lighting of Indoor Work Places». *ISO 8995 CIE S 008/E*, 1–19.
- TheDaylightS@. (2016). <http://thedaylightsite.com/library-3/links/simulation-tools-2/>. - Ferramentas de simulação (Acedido a 25/05/2016).
- Treado, S., Gillette, G., & Kusuda, T. (1984). «Daylighting with windows, skylights, and clerestories». *Energy and Buildings*, 6(4), 319–330.
- Vanhoutteghem, L., Skarning, G. C. J., Hviid, C. A., & Svendsen, S. (2015). «Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses». *Energy and Buildings*, 102, 149–156.
- VeluxDV@. (2016). http://viz.velux.com/daylight_visualizer/about. - Software Velux Daylight Visualizer (Acedido a 25/05/2016).
- Vianna, N. S., & Gonçalves, J. C. S. (2001). «*Iluminação e arquitetura*». (V. S. Ltda, Ed.). São Paulo.
- VidroD@. (2016). <http://www.vidrariacristalmogi.com/vidros-duplos-insulados.php>. - Vidro duplo (Acedido a 12/05/2016).