

Estudo experimental do desempenho térmico e óptico de envidraçados com películas de controlo solar

David Lopes Lourenço

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

Júri

Presidente: Professor Doutor João Pedro Ribeiro Ramôa Correia

Orientador: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Doutor António José Costa dos Santos

Outubro 2016

“Success consists of going from failure to failure without loss of enthusiasm”

Winston Churchill

Agradecimentos

Serve este espaço para agradecer às inúmeras pessoas que, directa ou indirectamente, estiveram ligadas a este trabalho, sem as quais o mesmo não teria sido possível.

Em particular, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues e à Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes, pelo tempo despendido e, sobretudo, pela paciência demonstrada.

Gostaria também de agradecer ao Sr. Carlos Miguel da Impersol, por ter disponibilizado as películas para a campanha experimental e procedido à sua instalação.

Não poderia deixar de agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica do IST por ter autorizado a realização do trabalho experimental e aos Professores Carlos Carneira, João Sousa e Miguel Ayalla Botto, por terem disponibilizado os seus gabinetes para a realização desta campanha experimental, em particular ao Professor Botto uma vez que teve que suportar temperaturas bastante elevadas.

Aos meus amigos, que de uma maneira ou de outra me ajudaram ao longo destes anos, em particular ao Luís Campos, à Júlia Pinheiro e ao João Mexia, pela ajuda prestada no decorrer da campanha experimental.

Por fim, e sem os quais nada disto teria sido possível, aos meus pais e à minha família pelo apoio e encorajamento prestados ao longo de toda a minha vida.

A todos muito obrigado.

Resumo

A preocupação com questões económicas e ambientais tem conduzido a uma maior aposta na reabilitação de edifícios, quer recentes quer mais antigos. Uma das razões na base dessa aposta prende-se com o elevado consumo de energia associado ao funcionamento dos edifícios, em particular aqueles com grandes áreas de envidraçados. Parte desse consumo destina-se a satisfazer exigências de conforto, sendo os envidraçados, como elementos dominantes nas fachadas, um dos principais contribuintes para o menor desempenho energético dos edifícios. Para melhorar este desempenho tem-se recorrido à utilização de películas de controlo solar. Para avaliar o efeito destas películas, foi desenvolvida uma campanha experimental nos períodos de Inverno e de Verão, em três gabinetes idênticos, onde um deles serviu de referência (sem película) e os outros dois para observar o resultado da colocação de películas; num deles foi aplicada uma película pelo exterior e no outro foi aplicada outra película pelo interior. A partir de um conjunto de medições experimentais, foi possível observar diferenças de comportamento entre os envidraçados e retirar algumas conclusões sobre o desempenho das películas. Na campanha de Inverno, as películas reduziram bastante a temperatura interior dos gabinetes, em particular a temperatura máxima. Na campanha de Verão, verificou-se que a película interior contribui para o aquecimento do interior, pelo que a sua aplicação deve resultar de um estudo cuidadoso. Em termos ópticos verificou-se que ambas as películas reduziram bastante as iluminâncias interiores, o que em dias de céu encoberto pode conduzir a um aumento do consumo associado a luz artificial.

Palavras-chave: Películas de controlo solar, eficiência energética, desempenho térmico, desempenho óptico, reabilitação de edifícios

Abstract

The concern over economic and environmental issues has led to an increase in building renovation in order to decrease energy consumption, namely in buildings with large glazed façades. Part of the high energy demand is caused by excessive solar gains due to the use of glazed systems. In order to increase the window's performance, solar control films have been applied to the glazing systems to improve its thermal and solar properties. It is the purpose of this work to study the effect of solar control films. In order to accomplish that objective, it was carried out an experimental setup in three identical offices; one had no films, other had a film applied in the interior surface of the glazing and the third one had a different film applied in the exterior. During the winter campaign it was concluded that the offices with solar control film had a better thermal performance than the office without film. In fact, in a cold day, but with high radiation levels, the peak interior temperature was 23.3, 25.5 and 30.2°C, respectively. In the summer campaign, it was concluded that exterior films may be the best solution, since interior films absorb radiation and increase the room temperature through convection and infrared radiation heat transfer. On the other hand, it was also concluded that the exterior film had the lowest daily illuminance average, which may cause an increase in artificial lighting on cloudy days, which is one of the most drawback of this building rehabilitation solution.

Keywords: Solar control films, energy efficiency, daylight performance, thermal performance, building retrofitting

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos e metodologia de trabalho	2
1.3 Organização do trabalho	4
2 Envidraçados em edifícios	5
2.1 Influência dos envidraçados no consumo de energia	5
2.2 Propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados.....	8
2.2.1 Coeficiente de transmissão térmica (U)	10
2.2.2 Factor solar (g)	11
2.2.3 Transmitância visível (τ_v).....	12
2.2.4 Coeficiente de selectividade espectral (CSE)	12
3 Películas adesivas poliméricas para envidraçados	15
3.1 Contexto histórico.....	15
3.2 Constituição de películas adesivas poliméricas	15
3.3 Propriedades de películas adesivas poliméricas	16

3.4	Tipos de películas adesivas poliméricas	17
3.5	Estudos anteriores.....	18
4	Caso de Estudo.....	25
4.1	Descrição do caso de estudo	25
4.2	Películas utilizadas no caso de estudo	28
4.3	Procedimento experimental.....	30
5	Criação dos sistemas envidraçados com película	35
5.1	Optics6 e Window7.3.....	35
5.2	Propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados do caso de estudo	38
6	Análise e discussão de resultados	43
6.1	Campanha de Inverno	43
6.1.1	Temperatura	43
6.1.2	Fluxos de calor	46
6.1.3	Radiação Solar	47
6.1.4	Iluminância.....	50
6.2	Campanha de Verão	51
6.2.1	Temperatura	52
6.2.2	Fluxos de calor	57
6.2.3	Radiação Solar	58
6.2.4	Iluminância.....	60
6.3	Mapas de iluminâncias no plano de trabalho	61
6.3.1	Mapeamento às 9 horas	62
6.3.2	Mapeamento às 12 horas	63
6.3.3	Mapeamento às 16 horas	64

7	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	67
7.1	Conclusões.....	67
7.2	Desenvolvimentos futuros.....	70
	Referências.....	71

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Metodologia seguida na campanha experimental.	3
Figura 2.1 - Radiação directa e difusa.	8
Figura 2.2 - Espectro da radiação solar [21].	9
Figura 2.3 - Comportamento espectral do vidro simples com diferentes espessuras [27].	10
Figura 2.4 - Factor solar de um envidraçado.	11
Figura 2.5 - Transmitância e reflectância visível de um envidraçado.	12
Figura 3.1 - Constituição típica de uma película adesiva polimérica [35].	16
Figura 3.2 - Efeito das películas em envidraçados.	19
Figura 4.1 - Localização do caso de estudo: a) localização do pavilhão dentro do IST; b) planta do pavilhão.	25
Figura 4.2 - Gabinete de referência: a) planta esquemática; b) dimensões da área envidraçada (m). 26	
Figura 4.3 - Envidraçado do gabinete de referência: a) configuração do sistema envidraçado; vista interior da fachada envidraçada e do sistema de protecção solar.	27
Figura 4.4 - Esquema do alçado Sul e localização dos gabinetes.	27
Figura 4.5 - Remoção (a) e aplicação pelo exterior (b) das películas.	28
Figura 4.6 - Configuração dos envidraçados A e B.	29
Figura 4.7 -Esquema da colocação dos sensores na fachada exterior.	30
Figura 4.8 - Termopares utilizados na campanha experimental: a) termopares para medição da temperatura ambiente interior; b) medição da temperatura superficial interior e exterior.	31
Figura 4.9 - Colocação dos termopares para medição das temperaturas superficiais e ambiente interior e exterior.	31
Figura 4.10 - Fluxímetro: a) vista interior; b) vista exterior.	32
Figura 4.11 - Piranómetros utilizados para medição da radiação e da iluminância: a) piranómetros LICOR (gabinetes A e C); b) piranómetro Kipp&Zonen CMP6 (gabinete B).	32

Figura 4.12 - Sensores utilizados na cobertura (a vermelho o piranómetro vertical da Kipp&Zonen CMP6 e a azul o piranómetro horizontal BF5).	33
Figura 4.13 - Sistemas de aquisição de dados: a) Campbell CR10X (gabinete C); b) Delta-T DL2e (gabinete B); c) sensor HOBO.	33
Figura 4.14 - Corte esquemático com a posição dos sensores no interior do gabinete de referência e na cobertura.	34
Figura 5.1 - Algoritmo para determinar as propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados.	35
Figura 5.2 - Passos para criar um tipo de vidro com película.	36
Figura 5.3 - Ligação entre a base de dados do Optics e a do Window.	37
Figura 5.4 - Importar a base de dados criada no Optics para o Window.	37
Figura 5.5 - Escolha do tipo de envidraçado a calcular.	38
Figura 5.6 - Fachada exterior do edifício (a azul claro é possível observar o interior do gabinete C)..	40
Figura 6.1 - Temperaturas superficial exterior (T_{se}), superficial interior (T_{si}), interior (T_i) e exterior (T_e) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) no DMF (a) e DmR (b).	45
Figura 6.2 - Perfil de temperaturas no gabinete B (a) e gabinete C (b) para o DMF.	46
Figura 6.3 - Fluxos de calor nos gabinetes B e C no DMF (a) e DmR (b).	47
Figura 6.4 - Radiação global vertical interior ($Rad_{v,i}$) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$), no DMF (a) e no DmR (b).	48
Figura 6.5 - Radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) medida no gabinete ($Rad_{v,gab}$) e na cobertura ($Rad_{v,cob}$) no DMF (a) e no DmR (b).	48
Figura 6.6 – Radiação horizontal exterior global (Rad_G) e difusa (Rad_d) no plano horizontal, no DMF (a) e no DmR (b).	49
Figura 6.7 - Iluminâncias exteriores horizontal ($E_{ext,h}$) e vertical calculada ($E_{ext,v\,calc}$) e interiores horizontal ($E_{int,h}$) e vertical ($E_{int,v}$), no DMF (a) e no DmR (b).	50
Figura 6.8 - Temperaturas superficial exterior (T_{se}), superficial interior (T_{si}), interior (T_i) e exterior (T_e) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) no DMQ (a) e no DMR (b).	54
Figura 6.9 - Temperaturas superficial exterior (T_{se}), superficial interior (T_{si}), interior (T_i) e exterior (T_e) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) no DSC.	56

Figura 6.10 - Perfil de temperaturas no DMR nos gabinetes B (a) e C (b).....	57
Figura 6.11 - Fluxos de calor no DMQ (a) e no DMR (b).	58
Figura 6.12 - Radiação global vertical interior ($Rad_{v,i}$) e exterior ($Rad_{v,e}$) no DMQ (a) e no DMR (b). 58	
Figura 6.13 - Radiação global vertical exterior medida no gabinete ($Rad_{v,gab}$) e na cobertura ($Rad_{v,cob}$), no DMQ (a) e no DMR (b).	59
Figura 6.14 - Radiação horizontal exterior global (Rad_G) e difusa (Rad_d) no plano horizontal, no DMQ (a) e no DMR (b).....	60
Figura 6.15 - Iluminâncias interiores verticais ($E_{int,v}$) e iluminância exterior horizontal ($E_{ext,h}$) e iluminância exterior vertical calculada ($E_{ext,v cal}$), no DMQ (a) e no DMR (b).....	61
Figura 6.16 - Mapa de pontos de medição.....	62
Figura 6.17 - Perfil vertical das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) às 9h.	62
Figura 6.18 - Mapa das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) obtidas às 9h no gabinete A (a), gabinete B (b) e gabinete C (c), com a localização dos postos de trabalho.	63
Figura 6.19 - Perfil vertical das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) às 12h.	64
Figura 6.20 - Mapa das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) obtidas às 12h no gabinete A (a), gabinete B (b) e gabinete C (c), com a localização dos postos de trabalho.	64
Figura 6.21 - Perfil vertical das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) às 16h.	65
Figura 6.22 - Mapa das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) obtidas às 16h no gabinete A (a), gabinete B (b) e gabinete C (c), com a localização dos postos de trabalho.	65

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Estudos anteriores sobre películas de controlo solar.	20
Tabela 4.1 - Propriedades das películas utilizadas na campanha experimental [34].	29
Tabela 4.2 - Detalhes dos equipamentos utilizados.	34
Tabela 5.1 - Propriedades dos envidraçados dos gabinetes.	39
Tabela 6.1 - Valores médios diários de temperatura exterior (T_e), de radiação global vertical exterior medida nos gabinetes ($Rad_{V,gab}$) e na cobertura ($Rad_{V,cob}$) e de radiação global horizontal exterior (Rad_H) medida na cobertura, nos DMF e DmR.	43
Tabela 6.2 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$), no DMF.	44
Tabela 6.3 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$), no DmR.	44
Tabela 6.4 - Valores médios diários de temperatura exterior (T_e), de radiação global vertical exterior medida na fachada dos gabinetes ($Rad_{V,gab}$) e na cobertura ($Rad_{V,cob}$) e de radiação global horizontal exterior ($Rad_{H,e}$) medida na cobertura, nos DMQ, DMR e DSC.	52
Tabela 6.5 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$), no DMQ.	53
Tabela 6.6 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$), no DMR.	53
Tabela 6.7 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$), no DSC.	53

Nomenclatura

CSE: Coeficiente de selectividade espectral

DMF: Dia Mais Frio

DMQ: Dia Mais Quente

DMR: Dia de Maior Radiação

DmR: Dia de menor Radiação

DSC: Dia de verão Sem Climatização

g: Factor solar

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IV: Radiação infravermelha

U: Coeficiente de transmissão térmica [$W/m^{20}C$]

UE: União Europeia

UNEP-SCBI: United Nations Environment Programme – Sustainable Buildings and Construction Programme

UV: Radiação ultravioleta

α_1 : Absortância do pano de vidro exterior

α_2 : Absortância do pano de vidro interior

$\rho_{b,sol}$: Reflectância solar de tardoz

$\rho_{b,vis}$: Reflectância visível de tardoz

$\rho_{f,sol}$: Reflectância solar frontal

$\rho_{f,vis}$: Reflectância visível frontal

τ_{sol} : Transmitância solar

τ_{UV} : Transmitância à radiação ultravioleta

τ_{vis} : Transmitância visível

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A dependência energética e a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis, aliadas a uma maior preocupação com as alterações climáticas, têm contribuído para uma maior consciencialização da importância da redução do consumo energético no sector da construção. Em Portugal, devido à escassez de recursos fósseis, sempre existiu uma dependência energética bastante elevada. Em 2005 a dependência era de 88,8%. Apesar de, graças a uma boa política de aposta em energias renováveis, esta dependência ter vindo continuamente a decrescer – tendo-se situado em 2014 em 72,4% [1] –, o facto é que ela continua elevada e por isso merecedora de acções de intervenção mais eficazes.

Ao problema da escassez dos recursos fósseis e da necessidade de implementação de energias renováveis, que são temas que têm merecido destaque pela sua importância no capítulo do desenvolvimento sustentável, junta-se actualmente a crescente preocupação com as alterações climáticas a nível global, que são consequência do aumento de fenómenos climáticos extremos, como por exemplo secas prolongadas, ondas de calor e vagas de frio. O quinto relatório do IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, vem esclarecer, definitivamente, que as alterações climáticas estão a ocorrer a um ritmo bem mais acelerado do que o normal e que a causa principal é a actividade humana. Cada uma das últimas três décadas anteriores tem sido mais quente, sucessivamente, que qualquer década desde 1850 [2].

O sector da construção é um dos sectores da actividade humana que mais contribui para o desenvolvimento a nível do emprego e riqueza, estimando-se que valha cerca de 10% do Produto Interno Bruto mundial e que empregue, em média, cerca de 10% da população mundial. Ao mesmo tempo, é responsável por elevados consumos de energia (entre 25% a 40%) e por elevadas emissões de gases de efeito de estufa (30% a 40%) [3].

Dentro do sector da construção, os edifícios são dos maiores responsáveis por este elevado consumo de energia e de emissões, em particular durante a sua fase de utilização. De facto, e de acordo com a UNEP - SBCI (*United Nations Environment Programme – Sustainable Building and Climate Initiative*), o sector dos edifícios é responsável, a nível mundial, por cerca de 40% do total de energia consumida, 25% do total de água consumida e um terço do total de emissões de gases de efeito de estufa. Em Portugal, devido a menores necessidades de aquecimento, o sector dos edifícios representa cerca de 30% da energia total consumida. Apesar do elevado consumo, este sector apresenta um grande potencial na redução do consumo de energia através de medidas de baixo custo, podendo situar-se entre os 30 e os 80%, de acordo com a mesma organização.

Em Portugal, apesar do *boom* construtivo na década de 90, a maior parte do parque habitacional encontra-se envelhecido e a necessitar de intervenções que melhorem a eficiência energética dos

edifícios. No caso de construções já existentes, são sobretudo os envidraçados que apresentam uma eficiência energética aquém do que é exigido actualmente, obrigando a grandes consumos de energia para manter os níveis de conforto actuais.

Como atrás mencionado, também no caso dos envidraçados a eficiência energética pode ser melhorada através de medidas de baixo custo e sem necessidade de grandes intervenções. Neste tipo de medidas, enquadra-se a aplicação de películas adesivas poliméricas a envidraçados em edifícios existentes.

As películas de controlo solar, sendo um tipo de película adesiva polimérica, ao redefinir as propriedades de transmissão da radiação solar dos envidraçados nos domínios do infravermelho e visível, têm possibilidade de os tornar mais eficientes, quer do ponto de vista da redução das necessidades de arrefecimento para manter o conforto térmico de verão, quer em termos da qualidade do ambiente luminoso em ocasiões de radiação solar exterior excessiva.

1.2 Objectivos e metodologia de trabalho

A presente dissertação tem por objectivo avaliar experimentalmente o desempenho térmico e óptico de películas de controlo solar em envidraçados num caso de estudo real.

Além disso pretendeu-se ainda:

- quantificar as propriedades térmicas e ópticas dos sistemas envidraçados do caso de estudo com películas de controlo solar recorrendo a dois programas de simulação, o *Optics* e o *Window*;
- avaliar o comportamento dos sistemas envidraçados em diferentes dias-tipo, tanto no Inverno como no Verão, de maneira a perceber as diferenças relacionadas com a temperatura do ambiente e os níveis de radiação exterior;
- avaliar a influência que a superfície onde é colocada a película (pelo exterior ou pelo interior) tem no desempenho do envidraçado.

Para tal, foi escolhido um caso de estudo real onde fosse possível colocar equipamentos e sensores com vista à realização de uma campanha experimental que abrangesse os períodos de Inverno e de Verão.

A campanha experimental consistiu na medição de temperaturas superficiais dos envidraçados e do ambiente exterior e interior, bem como a medição do fluxo de calor, radiação solar e luminosidade. Optou-se por um conjunto de três gabinetes contíguos e com as mesmas características no pavilhão de Engenharia Mecânica dentro do Instituto Superior Técnico, servindo um deles como referência, isto é, sem película, enquanto que, relativamente aos outros dois, num foi mantida uma película que tinha

sido instalada do lado interior do envidraçado anteriormente à realização deste trabalho, e no outro foi colocada, expressamente para o presente trabalho, uma película do lado exterior do envidraçado. A película mais recente apresenta propriedades melhoradas relativamente à mais antiga, pelo que um dos interesses do estudo é também evidenciar essa diferença a partir das medições realizadas. Por outro lado, apesar de as películas não serem iguais, julgou-se oportuno avaliar o seu efeito em lados diferentes do envidraçado mesmo que os resultados não pudessem ser directamente comparáveis. Na Figura 1.1 é possível observar a metodologia adoptada para a realização da campanha experimental.

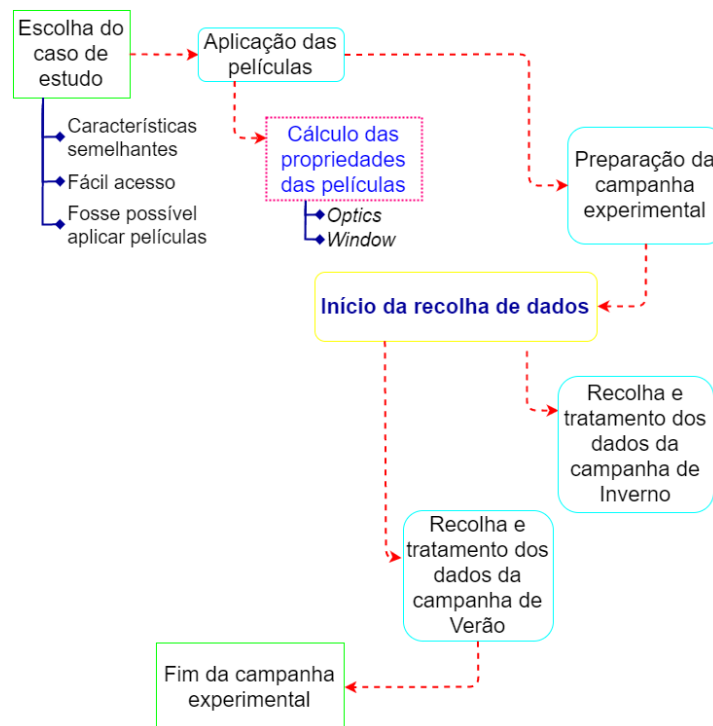


Figura 1.1 - Metodologia seguida na campanha experimental.

A primeira etapa consistiu na escolha do caso de estudo, tendo em atenção os objectivos a cumprir. Passou-se depois ao processo de instalação das películas nos gabinetes do caso de estudo e ao cálculo das propriedades dos sistemas envidraçados através dos programas *Optics* e *Window*. Seguiu-se a preparação da campanha experimental, com a montagem de todos os sensores e equipamentos necessários. Finalmente, procedeu-se à recolha e tratamento de dados com vista à avaliação do desempenho térmico e óptico dos sistemas envidraçados do caso de estudo com películas de controlo solar instaladas.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos, servindo o capítulo inicial para enquadrar a presente dissertação e apresentar os objectivos pretendidos.

No capítulo 2 é explicada a importância da composição espectral da radiação, bem como as principais propriedades dos envidraçados que afectam o comportamento térmico e o consumo energético de edifícios.

No capítulo 3 é feita uma abordagem ao tema desta dissertação, sobre a utilização de películas em envidraçados, em que se descreve brevemente o contexto em que surgiram, os diferentes tipos de películas e respectiva constituição e, por fim, é feito um levantamento de estudos anteriores sobre o tema.

No capítulo 4 descreve-se o caso de estudo onde decorreu a campanha experimental, com o objectivo de recolher dados para a avaliação do desempenho térmico e óptico dos sistemas envidraçados com películas de controlo solar aplicadas. É também descrito neste capítulo o procedimento para a realização da campanha experimental.

No capítulo 5 é descrito o processo de criação dos sistemas envidraçados do caso de estudo, bem como apresentadas as propriedades destes sistemas, com e sem a sua aplicação de películas, determinadas através de programas de simulação específicos.

No capítulo 6 são apresentados os resultados da campanha experimental realizada e é feita uma análise ao comportamento das películas em dias-tipo.

No capítulo 7 são elaboradas as principais conclusões deste trabalho e sugeridas algumas propostas de trabalho futuras.

2 Envidraçados em edifícios

2.1 Influência dos envidraçados no consumo de energia

O sector dos edifícios é responsável por cerca de 40% do total de energia consumida na União Europeia [4]. Por motivos diferentes, em países em vias de desenvolvimento, casos de China, Índia ou Brasil, ou em países com climas moderados a quentes, como por exemplo, Portugal, Espanha ou Itália, as necessidades energéticas relacionadas com edifícios são ligeiramente inferiores, sendo de 25% [5] no primeiro caso e de 30% no segundo [6]. Baixos consumos energéticos não são, só por si, indicadores de preocupação especial com os problemas ambientais e o desenvolvimento sustentável. Por exemplo, no caso de países em vias de desenvolvimento, os menores consumos energéticos em edifícios devem-se aos elevados níveis de pobreza. Por sua vez, em países com Invernos pouco rigorosos, como é o caso de Portugal, as necessidades de aquecimento são, regra geral, menores, o que se traduz também num menor consumo energético durante o período de Inverno. Devido, não só ao aumento do nível de vida, em particular nos países em vias de desenvolvimento, mas também ao aumento da temperatura terrestre como consequência das alterações climáticas, o consumo energético em edifícios terá tendência a aumentar, não só na Europa, mas sobretudo nos países em vias de desenvolvimento.

No que à Europa diz respeito, o Parlamento Europeu, através de Directivas específicas, tem procurado definir políticas estratégicas e planos de acção que visem uma maior racionalização e eficiência energética no sector dos edifícios. A União Europeia lançou a directiva 2010/31/EU “EU 20-20-20” [4] na qual impôs aos países membros os seguintes objetivos para atingir até 2020:

- 20% de redução das emissões de gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990;
- 20% de energia obtida a partir de fontes renováveis no cabaz energético da EU;
- 20% de melhoria da eficiência energética.

As medidas propostas não se direccionam apenas para novos edifícios, mas também para edifícios existentes a necessitar de reabilitação. Em Portugal, apesar do elevado ritmo de construção de habitação nova das últimas décadas (exceptuando os anos de crise), o parque habitacional ainda se encontra bastante envelhecido e degradado [7]. Com efeito, enquanto que os novos edifícios estão já enquadrados por uma regulamentação mais exigente e adaptada aos novos desafios ambientais, os edifícios mais antigos encontram-se desajustados face aos níveis de desempenho energético actualmente preconizados, devendo por isso ser objecto de uma preocupação especial. Por esta razão, as intervenções de reabilitação devem ser alvo de uma análise criteriosa no sentido de procurar soluções compatíveis com a construção existente e simultaneamente energeticamente eficientes.

A Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) elaborou um documento no âmbito da Iniciativa Pública sobre Eficiência Energética de Edifícios, sobre a reabilitação energética da envolvente de

edifícios residenciais [7], onde enumera algumas características dos edifícios que podem levar a uma redução do seu desempenho térmico e a elevados consumos de energia:

- isolamento térmico insuficiente nos elementos opacos;
- existência de pontes térmicas na envolvente;
- presença de humidade;
- baixo desempenho térmico de vãos envidraçados;
- falta de protecções solares adequadas nos vãos envidraçados, dando origem a sobreaquecimento no interior dos edifícios ou aumento das cargas térmicas e das necessidades energéticas no caso de habitações com sistemas de arrefecimento ambiente;
- ventilação não controlada.

Como se observa da listagem apresentada, os envidraçados são elementos que podem contribuir para o fraco desempenho térmico de um edifício, enquadrando-se, por isso, dentro dos elementos que devem ser alvo de medidas adequadas no sentido de incrementar esse desempenho. Efectivamente, os vãos envidraçados são reconhecidamente um dos componentes da construção que mais afecta o desempenho energético e luminoso dos edifícios e com um peso significativo no balanço térmico global dos edifícios, podendo ser responsáveis por 35 a 40% das perdas térmicas totais dos edifícios residenciais e por problemas de sobreaquecimento interior e elevadas necessidades de arrefecimento na estação quente [7].

Para o dimensionamento dos vãos envidraçados, no que toca ao número e tipo de vidros, material dos caixilhos e formas de protecção solar, deve ser tido em conta a orientação e a área que ocupam relativamente à parte opaca. O seu correcto dimensionamento contribui bastante para o conforto térmico e óptico nos espaços interiores dos edifícios. Além disso, permite reduzir os custos associados ao consumo de energia para arrefecimento/aquecimento e luz artificial. Em Portugal, sugere-se que a proporção de áreas envidraçadas relativamente à parte opaca não supere os 35% para fachadas orientadas a Sul [8]. Para além disso é ainda recomendada a utilização de sistemas de sombreamento pelo exterior para controlar a entrada de raios solares directos no edifício, bem como ajustar os níveis de luminosidade [8].

A tecnologia dos envidraçados, caixilhos incluídos, tem evoluído muito nas últimas décadas, dando lugar ao aparecimento de soluções de elevado desempenho, como por exemplo o vidro baixo emissivo (*low-e*) ou o vidro duplo preenchido com gases raros, como Árgon ou Xénon. No entanto, um inquérito realizado em Portugal em 2010 [9] sobre o consumo de energia no sector doméstico revelou que mais de 70% das habitações apresenta como solução de envidraçado o vidro simples, contribuindo desta forma para um pobre desempenho energético das habitações.

Os ganhos em eficiência, através de novos materiais e tecnologias, têm sido em parte contrariados pelo crescente aumento da área envidraçada nas fachadas, ditado não só por razões de ordem estética e arquitectónica, mas também por razões de optimização da utilização de luz natural, de forma a reduzir os custos de energia em iluminação artificial [10], [11]. Com efeito, o aumento da área envidraçada é uma forma de maximizar a entrada de luz solar e desta forma melhorar o conforto no ambiente de trabalho, reduzindo assim a quantidade de iluminação artificial necessária – que é cerca de 10 a 20% da energia consumida em países industrializados [12]. Por outro lado, tem a desvantagem de agravar o consumo energético para manter as condições térmicas ideais e de originar contrastes luminosos excessivos perturbadores de tarefas visuais [13]. Num estudo numérico realizado em Hong Kong, um país com um clima sub-tropical, verificou-se que mais de 80% da energia eléctrica consumida em edifícios de escritórios é destinada a sistemas de ar condicionado e iluminação artificial [14]. Portugal, não tendo o clima de Hong Kong, é caracterizado por Invernos amenos e chuvosos e por Verões quentes e longos, sendo por isso necessário conjugar os ganhos solares durante a estação fria, que contribuem para menores necessidades de aquecimento, com as necessidades de arrefecimento decorrentes de ganhos solares excessivos durante o período de Verão.

Devido às alterações climáticas é expectável que a temperatura média global da atmosfera terrestre aumente, tendo já várias publicações estudado o impacto que este aumento de temperatura poderá ter nas necessidades de arrefecimento e de aquecimento em diferentes regiões do globo. Num estudo realizado na Suíça sobre o impacto das alterações climáticas nas necessidades de aquecimento e arrefecimento [15], concluiu-se que as necessidades de aquecimento irão diminuir até cerca de 44% e 58% respectivamente em edifícios residenciais e comerciais, bem como também irá diminuir a duração da estação de aquecimento. No entanto, apesar de não se prever um aumento nas necessidades de arrefecimento em edifícios residenciais, no que toca a edifícios comerciais, estas irão aumentar em cerca de 1050%, assim como também irá aumentar a duração da estação de arrefecimento. Outros estudos, realizados para diferentes localizações, chegam também à conclusão que o aumento de temperatura dará origem a um aumento nas necessidades de arrefecimento, sobretudo em edifícios não-residenciais [16]–[18], pelo que se torna necessário implementar medidas que melhorem a eficiência energética destes edifícios.

No caso de países com climas semelhantes ao de Portugal, o impacto das alterações climáticas no consumo de energia para climatização será ainda maior, uma vez que se tratam de países em que a estação de arrefecimento é predominante. Num estudo realizado em Portugal sobre o aumento das necessidades energéticas em edifícios residenciais e comerciais provocado pelo aumento de temperatura [19], concluiu-se que o aumento das necessidades de arrefecimento irão suplantar, em larga medida, a diminuição das necessidades de aquecimento, pelo que se vai tornar necessário uma estratégia que permita aumentar a eficiência e diminuir o consumo energético destes edifícios.

2.2 Propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados

Antes de descrever as propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados que permitem analisar o seu desempenho, é importante perceber as características da radiação solar, nomeadamente no que respeita aos seus efeitos e composição espectral, por se tratar, juntamente com a temperatura, de um dos parâmetros mais importantes no que toca ao comportamento térmico de edifícios. Diferentes tipos de envidraçados apresentam diferentes tipos de comportamento espectral, como se verá mais adiante.

A luz do Sol é um elemento indispensável à vida na Terra e é a principal responsável pela dinâmica da atmosfera terrestre, bem como pelas características climáticas do planeta. Do total de luz solar que atinge a Terra, em média cerca de metade (51%) é absorvida pela terra e oceanos, 30% é reflectida pela superfície, atmosfera e nuvens para o espaço e 19% é absorvida pela atmosfera e nuvens.

Sobre a radiação global que atinge a superfície terrestre, pode fazer-se a distinção entre radiação directa e difusa. A radiação directa é, por definição, a parte da radiação que, não sofrendo nenhum desvio causado pela atmosfera, atinge directamente a terra a partir do Sol, ao passo que a radiação difusa é a parcela de radiação proveniente do Sol que é dispersada pelas moléculas e partículas presentes na atmosfera antes de atingir a terra, como se pode observar na Figura 2.1. Em dias com céu encoberto, a radiação é maioritariamente difusa, enquanto em dias de céu limpo a radiação é quase na sua totalidade directa.

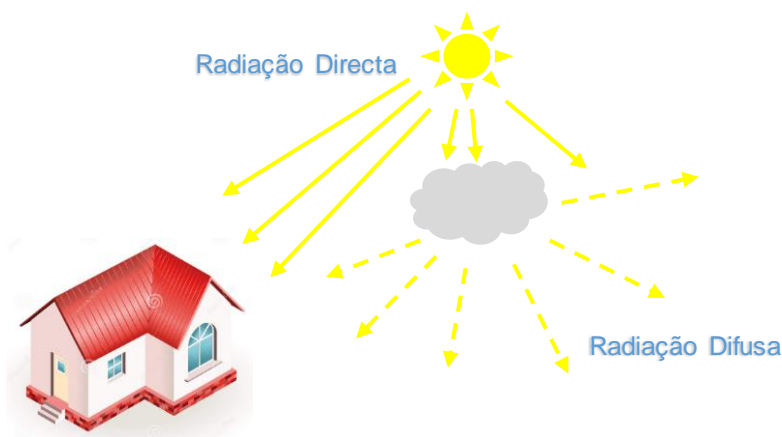


Figura 2.1 - Radiação directa e difusa.

A radiação emitida pelo Sol compreende todo o espectro de radiação electromagnética mas está maioritariamente concentrada nas faixas de comprimento de onda da luz ultravioleta (UV), luz visível e radiação infravermelha (IV), como se mostra na Figura 2.2. A radiação UV constitui apenas uma pequena parte da radiação solar, correspondendo em média a cerca de 8 a 9% do total de radiação solar que atinge a superfície terrestre; o espectro visível da radiação solar representa 46-47% do total de radiação ao passo que a restante parcela corresponde a radiação infravermelha (cerca de 45%) [20].

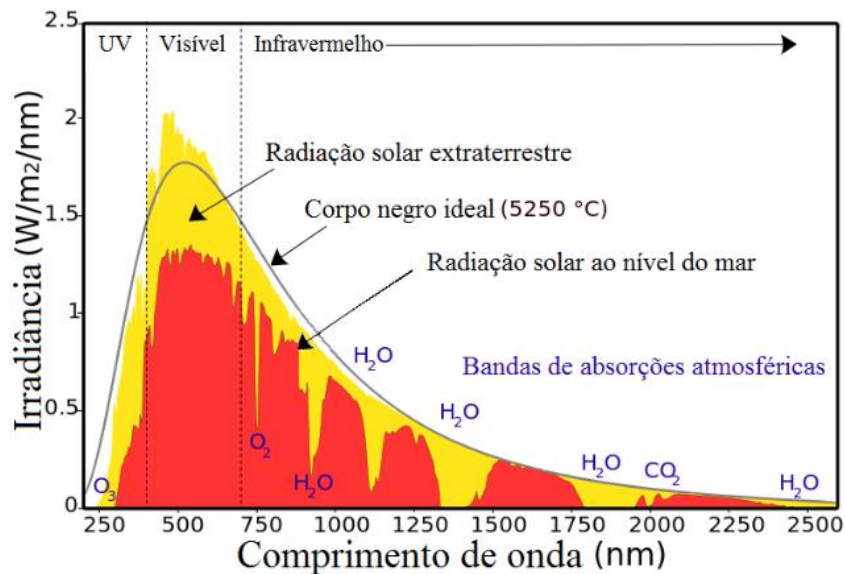


Figura 2.2 - Espectro da radiação solar [21].

A radiação UV é um tipo de radiação electromagnética que é invisível para o olho humano e é constituída por radiação com comprimento de onda entre 10 e 380 nm [22]. Representa apenas uma pequena parte da radiação solar, mas, devido ao facto de ter um comprimento de onda relativamente baixo, faz com que seja bastante energética. A radiação UV tem efeitos importantes na saúde humana, nas reacções foto-químicas atmosféricas e nos ecossistemas biológicos. A exposição moderada a este tipo de radiação tem um efeito benéfico na saúde geral das pessoas, no entanto, uma exposição excessiva pode, pelo contrário, ter um efeito muito prejudicial, sendo um factor de risco de cancro e de diminuição da eficácia do sistema imunitário [23]. Relativamente aos materiais, de uma forma geral, quando expostos a este tipo de radiação tendem a degradar-se mais rapidamente, em particular as madeiras e seus derivados e os materiais plásticos.

A radiação visível corresponde à radiação solar emitida pelo Sol com comprimento de onda entre 400 e 700 nm [24] e, ao contrário da radiação UV e IV, é o único tipo de radiação que o olho humano consegue ver. Dos três tipos de radiação que compõem a radiação solar, a visível, por se tratar essencialmente de luz natural, é a que está relacionada com as condições de iluminação natural no interior dos edifícios, as quais, se optimizadas, podem reduzir o consumo energético de iluminação eléctrica.

A radiação IV encontra-se do lado oposto à radiação UV, no espectro da radiação solar. O comprimento de onda da radiação IV varia desde 750 nm até 1 mm [25] e, apesar de ser invisível, é perceptível na forma de calor. Todos os corpos emitem radiação infravermelha consoante a sua temperatura.

A maior parte da radiação solar que incide num envidraçado e passa para o interior é absorvida pelas superfícies circundantes do espaço e pelos objectos nele presentes, aumentando a sua temperatura e, conseqüentemente, a radiação infravermelha que emitem, sobretudo nos comprimentos de onda longos [26]. Os envidraçados têm uma característica importante: são permeáveis à radiação solar de

onda curta (radiação visível e radiação infravermelha próxima da visível), mas impermeáveis à radiação com comprimentos de onda maiores, designada por radiação infravermelha longa, facto que pode dar origem a um aumento da temperatura interior e que se designa por efeito de estufa.

Como referido anteriormente, diferentes tipos de vidro têm diferentes comportamentos espectrais, ou seja, as suas propriedades, que serão descritas mais adiante, podem variar consoante o comprimento de onda da radiação. Como se pode observar na Figura 2.3, para o mesmo tipo de vidro, a espessura altera de forma significativa a “permeabilidade” à radiação infravermelha. Este efeito, ao afectar as condições de temperatura ambiente dos espaços pela maior ou menor retenção do calor no seu interior (efeito de estufa), pode ser utilizado para beneficiar o conforto térmico e diminuir as necessidades energéticas para climatização.

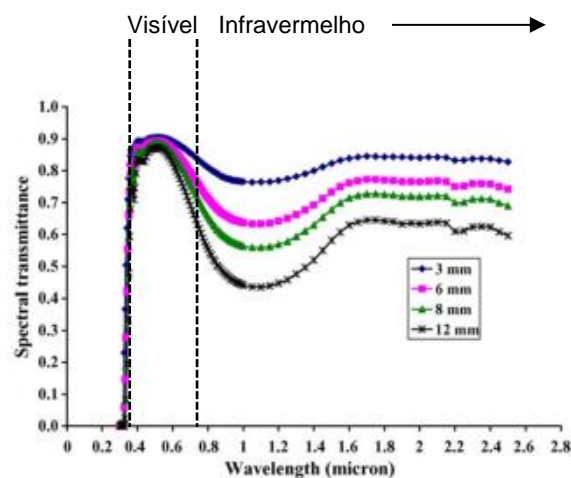


Figura 2.3 - Comportamento espectral do vidro simples com diferentes espessuras [27].

A radiação solar, juntamente com a temperatura, é um dos parâmetros mais importantes na avaliação do comportamento térmico dos edifícios. Atendendo ao tipo de acção que constitui a radiação solar e sendo os envidraçados os elementos que mais determinam o seu efeito nos edifícios, quer a nível do conforto térmico quer do conforto visual, as principais propriedades que classificam o desempenho térmico/energético de qualquer tipo de janela são, para além do coeficiente de transmissão térmica (U), o factor solar (g) ou SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient*) – esta nomenclatura é mais utilizada nos EUA –, a transmitância visível (τ_v) e o coeficiente de selectividade espectral (CSE) [28]. Nas secções seguintes é feita uma descrição resumida destas propriedades e do seu papel no comportamento de um envidraçado.

2.2.1 Coeficiente de transmissão térmica (U)

O coeficiente de transmissão térmica (U) é um parâmetro essencial no cálculo das necessidades energéticas de um edifício, dado que representa uma medida da energia térmica que atravessa um

elemento construtivo, por unidade de área, causada pela diferença de temperaturas entre o ambiente interior e o exterior. No caso de envidraçados, a expressão para o cálculo deste coeficiente é dada pela seguinte expressão [29]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \left(\frac{e_v}{\lambda_v} \right) + R_a + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{°K}] \quad (2.1)$$

onde: $1/h_i$ e $1/h_e$ são as resistências térmicas superficiais interior e exterior [$\text{m}^2 \cdot \text{°K/W}$], e_v é a espessura do vidro [m], λ_v é a condutibilidade térmica aparente do vidro ($1.1 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$) e R_a [$\text{m}^2 \cdot \text{°K/W}$] é a resistência térmica total do(s) espaço(s) de ar, ou de outro gás, entre vidros ($R_a=0$ para vidro simples).

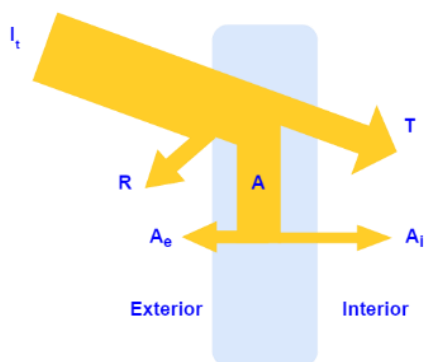
Este coeficiente considera os três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação e, em termos físicos, representa o fluxo de calor por hora e por metro quadrado de envidraçado, considerando uma diferença de temperatura de 1°C entre os ambientes interior e exterior, sendo expresso em $\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$ [30].

2.2.2 Factor solar (g)

O factor solar (g) ou *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) é um indicador da capacidade de um envidraçado em captar energia solar para o espaço interior. Define-se como a relação entre a quantidade total de radiação que passa para o espaço interior – transmitida quer directamente (T) quer depois de absorvida pelo(s) vidro(s) (A_i) – e a radiação solar total incidente no envidraçado (I_t) (Figura 2.4), e traduz-se pela seguinte expressão [31]:

$$g = \frac{T + A_i}{I_t} \quad [—] \quad (2.2)$$

O factor solar depende de vários factores, como por exemplo, o ângulo de incidência da radiação, as condições externas de convecção natural, a velocidade do vento ou a espessura do vidro [29].



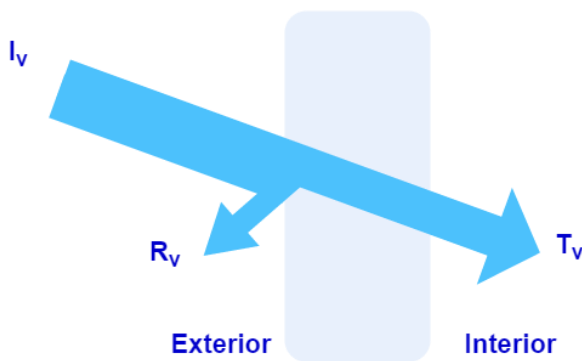
Onde:

- I_t é a radiação solar global incidente;
- R é a radiação solar reflectida;
- T é a radiação solar transmitida;
- A é a radiação solar absorvida;
- A_i é a radiação solar absorvida e que é irradiada para o interior;
- A_e é a radiação solar absorvida e que é irradiada para o exterior.

Figura 2.4 - Factor solar de um envidraçado.

2.2.3 Transmitância visível (τ_v)

A transmitância visível (τ_v) corresponde à percentagem de luz visível que atravessa um envidraçado [32], como se pode observar na Figura 2.5. Se o valor de τ_v de um envidraçado for alto, pode acontecer que os níveis de iluminação interior sejam superiores aos valores de referência e dar origem a problemas de encadeamento e desconforto visual. Por outro lado, se o valor de τ_v for baixo, pode ser necessário ter que recorrer a iluminação artificial, sobretudo em dias com baixos níveis de radiação solar, para manter os níveis mínimos de conforto, ocasionando, desta forma, um consumo de energia em iluminação artificial.



Onde:

- I_v é a radiação solar visível incidente;
- T_v é a radiação visível transmitida para o interior do envidraçado;
- R_v é a radiação visível reflectida para o exterior.

Figura 2.5 - Transmitância e reflectância visível de um envidraçado.

2.2.4 Coeficiente de selectividade espectral (CSE)

Como mencionado no subcapítulo 2.1, a radiação solar abrange diferentes gamas do espectro de radiação electromagnética. A selectividade espectral é uma propriedade que mede a forma como um envidraçado responde a diferentes tipos de radiação espectral, nomeadamente, a radiação UV, visível e IV [29] e define-se como o quociente entre a transmitância visível e o factor solar:

$$CSE = \frac{\tau_v}{g} \quad [—] \quad (2.3)$$

Idealmente, os envidraçados utilizados em climas quentes e com elevados níveis de radiação solar deveriam ser permeáveis à radiação visível e ao mesmo tempo rejeitar a radiação UV e IV, diminuindo desta forma os ganhos solares dos envidraçados. Valores de CSE acima de 1.2 indicam tratar-se de um vidro com um comportamento espectralmente selectivo [29].

Os envidraçados são, regra geral, os elementos que mais trocas de calor por unidade de área ocasionam entre o interior e o exterior de um edifício. Por outro lado, tem-se assistido, como referido anteriormente, a um aumento da área envidraçada nas fachadas dos edifícios, quer de escritórios quer de habitação. Este facto coloca uma exigência maior no desempenho dos envidraçados, quer no Inverno de forma a limitar as perdas de calor, quer no Verão de forma a impedir ganhos de calor excessivos. Se este cuidado em incrementar a eficiência dos envidraçados não for devidamente levado

em conta, são de esperar aumentos do consumo de energia para assegurar o conforto térmico e situações de desconforto visual motivadas por excesso de luz natural.

Se, no caso de construção nova, é possível entrar em conta logo na fase do projecto com todas as variáveis que condicionam o desempenho do envidraçado quer no domínio da térmica quer no domínio da iluminação natural, como sejam a orientação solar do edifício, a proporção entre área opaca e área envidraçada e a escolha do tipo e número de vidros, no caso de edifícios já construídos o mesmo não se pode aplicar. Quer seja por custos demasiado elevados, por impossibilidades de ordem técnica ou por imposições regulamentares, a troca de envidraçados, que à luz actual sejam considerados energeticamente ineficientes, nem sempre é possível.

Uma das soluções para ultrapassar esta dificuldade, e que será estudada na presente dissertação, é a utilização de películas adesivas poliméricas que alterem as propriedades dos envidraçados, nomeadamente as propriedades solar-ópticas mencionadas anteriormente, como o factor solar e a transmitância visível. Desta forma é possível contribuir para um menor consumo energético no sector da construção, em particular aquele que diz respeito a sistemas de ar condicionado e iluminação artificial, durante a fase operacional de um edifício.

3 Películas adhesivas poliméricas para envidraçados

3.1 Contexto histórico

A aplicação de películas adhesivas poliméricas em envidraçados é uma tecnologia que data do início dos anos 60, sendo que inicialmente o seu objectivo principal seria o de controlar os desequilíbrios entre aquecimento e arrefecimento resultantes das cargas solares. O que se veio a observar foi que estas películas iniciais tinham tendência para reflectir a radiação solar, impedindo dessa maneira o aquecimento excessivo do interior dos locais, mas que não afectavam significativamente as suas condições de luz natural em contraste com o que acontecia com os dispositivos de sombreamento [33].

À medida que a tecnologia se foi desenvolvendo, surgiu uma maior procura de variantes coloridas de películas adhesivas de maneira a complementar a arquitectura dos edifícios, ao mesmo tempo que se melhorava a eficiência energética dos envidraçados [33]. Com a crise petrolífera do século passado, surgiu um novo interesse por este tipo de material: a redução de perdas de calor para o exterior. As películas com poliéster tendem a absorver e a reflectir radiação infravermelha longa que é emitida no interior da habitação. Estas películas melhoraram bastante a retenção de calor no interior de um edifício [33] aumentando desta forma a eficiência energética dos envidraçados, sobretudo em climas em que a estação fria é predominante.

3.2 Constituição de películas adhesivas poliméricas

A constituição das películas adhesivas poliméricas tem sofrido muitas alterações e melhorias tecnológicas ao longo dos anos. Segundo a Associação Europeia de Películas (*European Window Film Association*) [33], estas passaram de “plástico reforçado” para um material complexo e de alto desempenho, que envolve tecnologia bastante inovadora e que pode ser constituído por até 230 camadas.

Para a película aderir a um envidraçado podem ser utilizados dois tipos de adesivos: adesivos sensíveis à pressão e adesivos activados com água. Como o nome indica, as películas com adesivos sensíveis à pressão formam uma ligação com o vidro através da aplicação de forças de pressão, não necessitando de qualquer tipo de solvente, água ou calor para ligar as duas superfícies [34]. Os adesivos activados com água formam a sua ligação ao vidro através de reacções químicas fortes entre o adesivo e a água, garantido uma grande durabilidade, um aspecto mais transparente e, sobretudo, uma grande aderência [34].

Na Figura 3.1 é possível observar a constituição típica de uma película adesiva polimérica de acordo com a EN 15752-1. As películas podem ser mais simples ou mais complexas que o exemplo mostrado,

dependendo da inovação tecnológica do fabricante e do objectivo para o qual são aplicadas. De uma maneira geral, as películas são constituídas pelas seguintes camadas [34], [35]:

- a) Revestimento resistente à abrasão e a riscos;
- b) Camadas revestidas por películas de poliéster;
- c) Adesivo de laminação;
- d) Película de poliéster com protecção UV embebida na película;
- e) Resina de UV de alto desempenho;
- f) Protecção descartável;
- g) Vidro;
- h) A camada f) é removida imediatamente antes da instalação da película.

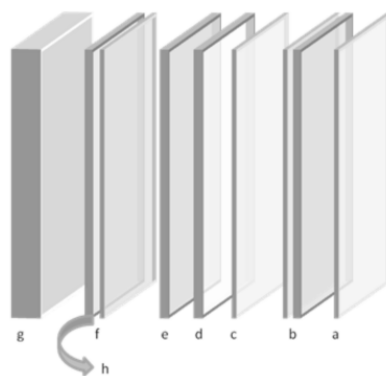


Figura 3.1 - Constituição típica de uma película adesiva polimérica [35].

3.3 Propriedades de películas adesivas poliméricas

Os fabricantes de películas adesivas poliméricas para vidros têm vindo a utilizar as normas europeias de segurança relacionadas com os envidraçados – a EN 12600, a EN 356 e a norma internacional ISO 16933 [33] – para caracterizar as propriedades das películas. Estas normas não são específicas para películas, mas sim para vidros. No entanto, têm sido utilizadas pelos fabricantes de películas para testar, sobretudo, as características de segurança de envidraçados com películas.

Em 2015 começaram a ser introduzidas normas específicas para os tipos de películas existentes no mercado, mais concretamente a EN 15752-1 [35] e, para envidraçados com películas aplicadas, a EN 15755-1 [36]. De acordo com a EN 15752, as películas para envidraçados são definidas em função das suas propriedades de reflectância (nos dois lados da película) e de transmitância e para cada espectro de radiação (UV, visível, solar e térmica, em que, de acordo com a EN 12898, a radiação térmica engloba a radiação IV de grande comprimento de onda até à radiação UV).

A norma EN 15752 [35] refere ainda que as principais propriedades solares-ópticas de películas são definidas através de uma outra norma específica para envidraçados, a EN 460 (*Glass in building* –

Determination of luminous and solar characteristics of glazing), e consistem na transmitância à luz visível (τ_v) e no factor solar (g). Além destas, são ainda definidas as seguintes propriedades para películas:

- transmitância solar directa (τ_e);
- reflectância solar directa (ρ_e);
- absortância solar directa (α_e);
- reflectância exterior à luz visível ($\rho_{v,e}$);
- reflectância interior à luz visível ($\rho_{v,i}$);
- transmitância à radiação UV (τ_{UV});
- coeficiente de sombreamento (SC);
- índice de reprodução cromática (R_a).

3.4 Tipos de películas adesivas poliméricas

As películas adesivas poliméricas são constituídas por diferentes tipos de materiais, o que por sua vez faz com que tenham diferentes funções, podendo ser utilizadas tanto em edifícios como em automóveis.

Segundo a EN 15752-1 [35] as películas existentes podem ser divididas em diferentes tipos:

- **Películas de controlo solar:** têm como objectivo reduzir o factor solar, diminuindo desta forma os ganhos solares através do envidraçado e contribuindo para menores necessidades energéticas.
- **Películas transparentes:** são usadas sobretudo em automóveis e, em contraste com as películas escurecidas, permitem reduzir os ganhos solares e a transmissão de radiação UV, sem alterar a aparência do envidraçado.
- **Películas de protecção e segurança:** apesar da norma fazer distinção entre protecção (*safety*) e segurança (*security*), o objectivo destas películas é alterar as características de quebra do vidro, tornando os estilhaços mais seguros para as pessoas. No caso de películas de segurança (*security film*), o seu objectivo prende-se mais com garantir a segurança de um envidraçado a ataques explosivos e balísticos.
- **Películas decorativas:** têm como objectivo alterar a aparência e estética do envidraçado.
- **Películas anti-graffiti:** este tipo de película é utilizado como camada de sacrifício, protegendo desta forma o envidraçado de acções acidentais ou propositadas que o possam danificar.
- **Películas de protecção aos raios Ultravioleta:** como o nome indica, a principal característica deste tipo de películas é reduzir a transmissão de radiação UV através do envidraçado.
- **Películas de baixa emissividade:** têm como propósito reduzir o coeficiente de transmissão térmica do envidraçado (U) como forma de diminuir as trocas de energia entre o interior e o exterior.

- **Películas que conferem privacidade:** têm como objectivo aumentar a privacidade no interior dos edifícios através da modificação de uma ou mais características: reduzindo a transmitância à luz visível do vidro, aumentando a reflectância à luz visível do lado exterior ou usando uma película especial (*optically diffusing film*) de maneira a tornar o vidro mais opaco.
- **Películas de protecção a radiofrequência e a frequência electromagnética:** têm como objectivo atenuar a transmissão de frequências electromagnéticas acima de 30 MHz e até 15 GHz.

Na presente dissertação apenas irão ser abordadas as películas de controlo solar, uma vez que estas são as únicas que alteram de forma significativa as propriedades solares e ópticas dos envidraçados, e que deste modo têm repercussão na eficiência energética.

3.5 Estudos anteriores

Apesar de ser uma tecnologia que existe desde os anos 60, só num passado recente é que tem surgido um maior interesse na utilização deste material no âmbito da reabilitação e eficiência energética de edifícios. Associado a este interesse, tem vindo a existir cada vez mais informação sobre o desempenho das películas de controlo solar, tanto no comportamento térmico e energético, como no comportamento óptico de envidraçados existentes. No entanto, os principais estudos realizados nesta área ou são de natureza numérica, através de programas que simulam o comportamento térmico das películas mas que descurem muitas vezes a componente óptica, ou então de natureza laboratorial, não havendo, por norma, informação prática a partir de ensaios de campo sobre as características e o desempenho térmico e óptico dos vários tipos de películas comerciais existentes, nem sobre o seu potencial de poupança energética.

No que concerne à reabilitação energética de edifícios, as películas de controlo solar apresentam algumas vantagens relativamente a outras soluções construtivas ou materiais como, por exemplo, o preço ou a facilidade de instalação (na maior parte dos casos). Quer colocadas no exterior ou no interior dos envidraçados, as películas podem reduzir os custos com arrefecimento em 30% e ter desempenhos energéticos semelhantes aos vidros de baixa emissividade [37].

A Associação Internacional de Películas para Envidraçados (International Window Film Association – IWFA na sigla em inglês) estima que o custo de instalação de películas em envidraçados seja inferior a 10% do custo de instalação de janelas novas, para além de que o retorno financeiro, através das poupanças energéticas, possa ser inferior a 3 anos [37]. Apesar das películas poderem ser aplicadas em envidraçados novos para melhorar as suas propriedades, prevê-se que, quer por opção quer por imposição regulamentar, o seu potencial mercado se venha a situar nas operações de reabilitação energética de edifícios existentes. Esta previsão resulta do facto de, em relação a outras técnicas de reabilitação, a aplicação de películas apresentar por norma um custo menor e, regra geral, maior facilidade de implementação, além de que o impacto ambiental da simples aplicação de uma película

a uma janela é significativamente menor do que substituir as janelas existentes por outras mais eficientes.

Como se referiu, o factor solar dos envidraçados é uma das propriedades que maior impacto tem na dimensão dos ganhos solares de um edifício e, como tal, deve ser devidamente controlado de forma a limitar os consumos de energia em climatização. Idealmente, o factor solar do envidraçado deve ficar estabelecido na fase de projecto. No entanto, não é raro acontecerem desajustes entre o projectado e o realizado e, quando tal acontece, devem ser realizadas correcções. Historicamente, tem havido tentativas de reduzir o factor solar dos envidraçados através da aplicação de tintas e revestimentos. No entanto, estas técnicas originam também uma redução da transmissão visível [32], o que é contraproducente. As películas de controlo solar, à semelhança de outras tecnologias, têm como objectivo reduzir o factor solar, mas, neste caso, sem que haja uma diminuição proporcional da transmitância visível. Como tal, são desenhadas para reflectir e/ou absorver radiação solar sobretudo na gama do infravermelho, permitindo desta forma reduzir os ganhos solares dos envidraçados (Figura 3.2).

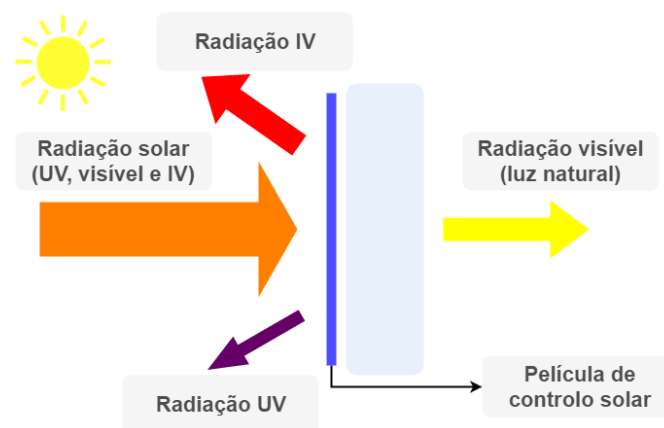


Figura 3.2 - Efeito das películas em envidraçados.

As películas têm como função alterar as propriedades dos envidraçados, diminuindo substancialmente o factor solar do vidro sem diminuir demasiado a transmitância de luz visível para o interior, permitindo desta forma minimizar os custos associados a sistemas de arrefecimento, sem aumentar em demasia os custos devidos a iluminação artificial, sendo aconselhadas em edifícios que apresentem graves problemas de aquecimento excessivo.

Foram já realizados alguns estudos sobre películas de controlo solar e sobre o seu efeito nas necessidades energéticas de um edifício, tanto experimentalmente como numericamente e que estão resumidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Estudos anteriores sobre películas de controlo solar.

Autores	Tipo de edifício	Local	Tipo de estudo	Principais conclusões
Yin <i>et al.</i> [5]	Edifício de serviços (museu)	Shangai, China	Numérico (programa utilizado: eQuest)	<p>Efeito da película é mais significativo num sistema de vidro duplo normal, em relação a um sistema de vidro duplo <i>low-e</i>.</p> <p>A redução no factor solar é maior quando a película é aplicada pelo exterior do envidraçado.</p> <p>As necessidades de arrefecimento devido aos ganhos solares foram reduzidas em 56% e 44% quando a película foi colocada pelo interior e exterior, respectivamente. O facto de a redução ter sido maior no caso da película interior, deve-se ao facto de o sistema envidraçado ser constituído por vidro duplo <i>low-e</i>.</p> <p>Foi possível reduzir os custos energéticos totais associados à estação de arrefecimento em 8%.</p>
Xamán <i>et al.</i> [38]	Não se aplica	Zonas de climas quentes	Analítico	<p>Redução da quantidade de energia do exterior para o interior de 52% em climas quentes e com sistema de envidraçado com película.</p> <p>Para climas frios é recomendado o sistema de envidraçado sem película.</p> <p>Em zonas que possuam climas quentes e frios é recomendado o uso de janelas reversíveis com películas.</p>
Noh-Pat <i>et al.</i> [39]	Não se aplica	Zonas de climas quentes e frios	Analítico	<p>Ganhos solares através de um envidraçado com película foram 55% inferiores a um envidraçado sem película.</p>
Li <i>et al.</i> [40]	Células de teste localizadas numa câmara experimental exterior	Hong Kong	Experimental e numérico (programa utilizado: eQuest)	<p>Poupanças em edifícios de escritórios podem ser da ordem de 77 a 90 kWh/ano por unidade de área de película.</p>
Li <i>et al.</i> [41]	Edifício de serviços (escritórios)	Hong Kong	Experimental	<p>Concluiu-se que as películas reduzem sobretudo os picos de radiação interior.</p>
Moretti e Belloni [42]	Edifício de serviços (universidade)	Itália	Experimental	<p>Redução de radiação solar num escritório com película foi de 58% em relação a um gabinete semelhante sem película.</p> <p>Redução da iluminância interior entre 48 e 60%.</p> <p>Poupanças com as necessidades de arrefecimento na ordem de 30%.</p>

Yin *et al.* [5] realizaram a simulação de um edifício de serviços (museu) com grandes áreas envidraçadas constituídas por vidro duplo com preenchimento de ar e com um revestimento *low-e* na face interior do vidro exterior. Para obter as propriedades dos envidraçados com e sem películas recorreram aos programas *Optics5* e *Window6*. Tanto os consumos energéticos como a geometria do edifício foram modelados e posteriormente calibrados, tendo sido calculadas as necessidades energéticas para três tipos de sistemas de envidraçados: *i)* o sistema original constituído por vidro duplo com revestimento *low-e*; *ii)* aplicando uma película de controlo solar na parte interior do envidraçado; *iii)* aplicando uma película de controlo solar no exterior do envidraçado. Concluiu-se que as necessidades de arrefecimento, devido à diminuição dos ganhos solares através dos envidraçados, foram reduzidas em 56% e 44% para o sistema com película pelo interior e exterior respectivamente, devido, sobretudo, à redução da transmitância solar provocada pelas películas. No entanto, para o sistema com película interior, houve uma maior necessidade de arrefecimento devido ao aumento da temperatura superficial interior nos envidraçados, contrabalançando a diminuição nos ganhos solares. Em relação ao sistema com película pelo exterior, manteve-se quase inalterada a necessidade de arrefecimento mencionada anteriormente, pelo que as necessidades energéticas globais anuais diminuíram, traduzindo-se numa redução de 8% nos custos de electricidade (em média, cerca de \$2044 por mês).

Neste estudo, foi ainda simulado um outro caso com as mesmas características que o original mas com o sistema de envidraçado constituído por dois panos de vidro simples com preenchimento de ar, sem qualquer camada de revestimento *low-e*. Foi possível chegar à conclusão que a aplicação de película, tanto pelo exterior como pelo interior diminui de forma considerável as necessidades energéticas globais, sendo que, no caso em que a aplicação de película foi pelo exterior, estas foram ligeiramente inferiores em relação ao caso em que a película foi aplicada pelo interior. Esta conclusão permite demonstrar que a aplicação de películas tem maior interesse em envidraçados menos eficientes do ponto de vista energético.

Num trabalho analítico realizado por Xamán *et al.* [38] foi feita uma análise térmica matemática a um sistema envidraçado duplo com e sem película de controlo solar em climas quentes e em climas frios. Para climas quentes, foi concluído que a película de controlo solar, aplicada na face interior do vidro exterior, reduz a quantidade de energia do exterior para o interior em 52%, quando comparada com o mesmo sistema envidraçado sem película. Para climas frios, a película aplicada na face exterior do vidro interior reduz a quantidade de energia do exterior para o interior em 10%, quando comparada com o mesmo sistema sem película, pelo que foi concluído que o vidro sem película é a melhor solução uma vez que permitirá maiores ganhos solares durante a estação de aquecimento. No entanto, é recomendado que, em zonas de climas quentes e frios, se recorra a janelas reversíveis com película de controlo solar porque a redução de energia é bastante mais significativa para climas quentes do que para climas frios, sendo que a quantidade de energia que é reduzida quando as temperaturas são elevadas compensa as perdas existentes na estação de aquecimento.

Numa outra análise semelhante, também para um sistema de envidraçado duplo, mas agora apenas para climas quentes, pretendeu-se estudar, não só o efeito da película, mas também a distância óptima entre os dois panos de vidro. Noh-Pat *et al.* [39] concluíram que o ganho de energia associado a um sistema de envidraçado duplo com película foi 55% inferior a um sistema de envidraçado sem película, para uma distância óptima de 6 cm entre os dois panos de vidro, apesar de neste estudo não ter sido considerado o aumento de energia proveniente do efeito de absorção de radiação solar pela película. Foi ainda concluído que houve uma redução bastante significativa do factor solar em comparação com outras soluções existentes, o que demonstra que o sistema utilizado apresenta um melhor desempenho térmico.

Em Hong Kong foi realizado um estudo em laboratório onde Li *et al.* [40] mediram as temperaturas superficiais em células de teste numa câmara experimental exterior, bem como os níveis de radiação exterior global. Foi concluído no estudo que as películas são eficazes em reduzir os ganhos solares e o excesso de iluminação natural. Foram testadas várias combinações de películas e envidraçados. Verificou-se que, para os vários tipos de vidro simples testados, o desempenho dos envidraçados com películas foi superior quando comparado com vidros coloridos na massa ou laminados. Concluiu-se também que as temperaturas superficiais nos envidraçados com películas foram superiores, o que é um indicador das propriedades de absorção das películas. Com os resultados obtidos experimentalmente foram desenvolvidos modelos computacionais, através do programa de simulação EnergyPlus, em que foi simulado o consumo eléctrico em equipamentos de refrigeração para três tipos de situações: escritórios, centros comerciais e quartos de hotel. Verificou-se que os melhores resultados obtidos foram para o caso de escritórios, com poupanças anuais entre 77 e 90 kWh por metro quadrado de película aplicada a um vidro simples de 12 mm. Para os restantes casos as poupanças foram na ordem de 44 a 57 kWh/m² por ano.

Foi realizado um outro trabalho, na mesma cidade, com o objectivo de comparar as diferenças registadas no que toca aos ganhos de calor e aos níveis de iluminância em dois escritórios semelhantes, mas em que num deles foi colocada uma película de controlo solar. Li *et al.* [41] demonstraram neste estudo que, em relação ao desempenho térmico, a redução nos ganhos solares é cerca de 30% para a radiação difusa, ao passo que quando se trata de radiação directa, esta redução é cerca de 50%, o que revela que o desempenho térmico das películas varia consoante o tipo de radiação solar recebida. Em relação à transmitância da luz visível, a redução no gabinete com película foi de 76% em relação ao gabinete sem película, não se registando qualquer diferença para a radiação directa ou difusa. É ainda referido que as poupanças eléctricas globais, onde se incluem tanto a climatização como a iluminação artificial, devido à película utilizada no caso de estudo, foram na ordem dos 55 Wh, por metro quadrado de área de escritório localizado na fachada Oeste. Contudo, não foram especificadas as propriedades da película de controlo solar utilizada.

Num trabalho semelhante ao realizado na presente dissertação, mas localizado em Itália, Moretti e Belloni [42] conduziram um estudo experimental de caracterização das propriedades térmicas, solares e ópticas de películas de controlo solar e do seu desempenho ao nível do consumo energético em dois

gabinetes idênticos (um com película e outro sem). Foi concluído que a redução na radiação solar transmitida para o interior foi cerca de 60% e independente do tipo de radiação solar exterior, ou seja, não se verificando diferenças entre radiação solar directa ou difusa (ao contrário do estudo anterior). Verificou-se, também, que houve uma redução de 2-3 °C, em dias de céu limpo, na temperatura ambiente interior no gabinete com película. Em relação aos níveis de iluminação interior, a redução diária média foi de 59%, tanto em dias de céu limpo como em dias de céu encoberto. Através do programa de simulação *EnergyPlus*, concluiu-se que as necessidades de arrefecimento no gabinete com película foram 30% inferiores em relação ao gabinete sem película. No entanto, também se verificou um aumento das necessidades de aquecimento em cerca de 15% no gabinete com película, pelo que é necessário uma análise cuidada quando se aplica esta solução a climas temperados, como é o caso do clima em Portugal.

De uma maneira geral, conclui-se através destes estudos que a melhoria do desempenho térmico de um envidraçado através da aplicação de películas de controlo solar é conseguida através da redução da transmitância solar, o que implica também uma redução da transmitância visível. A redução da transmitância visível conduz à diminuição de luz natural no interior dos edifícios, o que pode levar a um aumento das necessidades energéticas destinadas a iluminação artificial, pelo que a aplicação de películas só fará sentido quando essas necessidades forem inferiores às necessidades energéticas de climatização, razão pela qual, a maior parte dos estudos actuais foram realizados em países com climas sub-tropicais, em que a estação de arrefecimento é predominante, ou seja, onde as necessidades de arrefecimento são bastante mais elevadas as necessidades de iluminação artificial. Idealmente, uma película de controlo solar deverá ter um factor solar inferior à transmitância visível, de modo a otimizar a entrada de luz natural sem comprometer a eficiência térmica do envidraçado.

Pinheiro [34] realizou uma análise numérica a vários tipos de envidraçados com e sem películas, onde avaliou as necessidades energéticas dos diferentes sistemas envidraçados para o clima português. No seguimento desse estudo, e uma vez que são ainda escassos os estudos experimentais sobre o desempenho de películas de controlo solar em clima Mediterrâneo como é o de Portugal, considerou-se pertinente a condução de uma campanha experimental que permita avaliar, de uma maneira geral, o desempenho térmico e óptico de envidraçados com e sem películas, tanto pelo interior como pelo exterior. De forma a poder relacionar os resultados obtidos com as características das películas e dos envidraçados estudados, foram também determinadas de forma numérica as principais propriedades dos envidraçados monitorizados, com e sem películas, tal como mencionado no subcapítulo 2.2. No capítulo seguinte será feita uma breve descrição do caso de estudo, das películas utilizadas e do procedimento experimental adoptado.

4 Caso de Estudo

4.1 Descrição do caso de estudo

Para cumprir os objectivos propostos neste trabalho foi necessário, numa primeira fase, encontrar um caso de estudo onde se pudesse aplicar uma ou mais películas de controlo solar, que tivesse dois ou mais gabinetes/escritórios com dimensões, características, utilizações e equipamentos semelhantes e que, preferencialmente, fosse de fácil acesso, uma vez que iria ser necessário visitas regulares para a recolha de dados. Uma vez obtidas as necessárias autorizações, optou-se por realizar a campanha experimental [43] no pavilhão de Mecânica III do Instituto Superior Técnico situado no *campus* da Alameda, em Lisboa (Figura 4.1a). Este edifício foi construído no ano 2000, tem 2 pisos acima do solo e grandes áreas de envidraçado nas fachadas e é destinado, sobretudo, a gabinetes individuais para o corpo docente e investigadores, sendo que no piso subterrâneo estão dois laboratórios para auxílio à investigação.

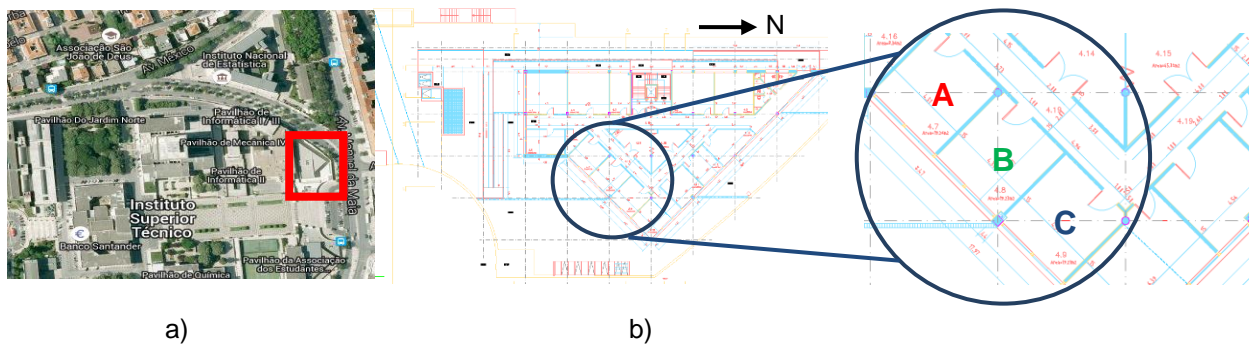


Figura 4.1 - Localização do caso de estudo: a) localização do pavilhão dentro do IST; b) planta do pavilhão.

Para tentar resolver alguns problemas de desconforto térmico e visual causados pela elevada exposição solar e deficiente protecção solar, foi instalada uma película de controlo solar pelo interior dos envidraçados dos gabinetes em 2006. Para a realização do presente estudo, foram seleccionados três gabinetes adjacentes (gabinetes A, B e C da Figura 4.1b) com geometria, orientação solar e características de ocupação idênticas. Para se avaliar o efeito da colocação de películas de controlo solar nos envidraçados, no gabinete C foi retirada a película existente, no gabinete A foi aplicada uma película pelo exterior (RHE20 SI ER HPR) e no gabinete B foi mantida a película existente, aplicada pelo interior (R35 SI SR HPR).

Os três gabinetes são individuais, com ocupação esporádica de mais pessoas, e têm a sua fachada exterior orientada a Sudeste, pelo que a radiação solar incide directamente na fachada assim que o Sol nasce, atingindo o pico cerca das 11h. No entanto, devido à configuração do edifício, e em particular à obstrução da fachada exterior dos gabinetes criada pelo corpo do edifício mais saliente (criando um efeito de pala horizontal), os gabinetes começam a ficar sombreados cerca das 12h. Este efeito de sombreamento faz-se sentir em primeiro lugar no gabinete A e depois, de forma gradual, nos outros

dois gabinetes, tomando maior expressão no período de Inverno uma vez que o Sol nesta estação se encontra numa posição mais baixa em relação ao período de Verão.

Os gabinetes têm uma área útil de 19 m², um pé-direito de 2.95 m e a fachada exterior é totalmente envidraçada com uma área aproximada de 6.72 m² (a área efectiva de vidro, sem contar com a caixilharia, é cerca de 5.98 m²). Na Figura 4.2 é possível observar uma planta esquemática do gabinete de referência (Figura 4.2a) juntamente com a disposição da secretária e do armário onde foram colocados os vários sensores e termopares (Figura 4.2b), bem como as dimensões do envidraçado. Em termos de equipamento, todos os gabinetes dispõem de um ou dois computadores pessoais, um candeeiro de secretária, uma lâmpada para iluminação do gabinete e ainda um sistema de ar condicionado.

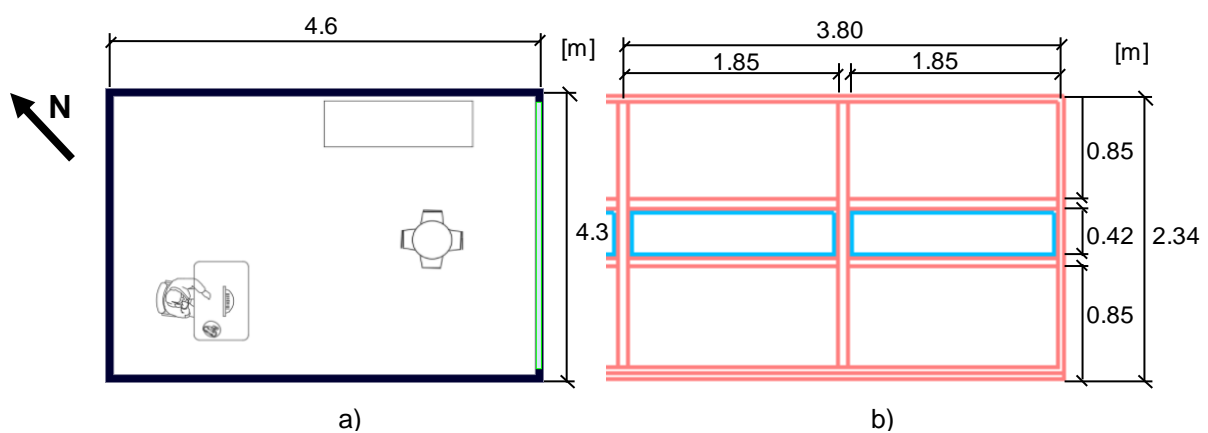


Figura 4.2 - Gabinete de referência: a) planta esquemática; b) dimensões da área envidraçada (m).

O envidraçado do gabinete de referência sem película é constituído por dois panos de vidro incolor (*float*) Planilux da *Saint Gobain Glass* e está dividido em 6 painéis, como se pode observar na Figura 4.2b. O vidro exterior tem uma espessura de 6 mm e o vidro interior tem uma espessura de 4 mm. A caixa de ar é preenchida com ar e tem uma espessura de 12 mm, como se pode observar na Figura 4.3a. A caixilharia é em alumínio de cor verde (não tendo sido possível averiguar a existência de corte térmico) e os dispositivos de sombreamento são estores venezianos interiores de lâminas metálicas horizontais de cor clara. Na Figura 4.3b é possível observar o envidraçado do gabinete de referência, bem como a protecção solar mencionada acima.

A laje de cobertura é em betão armado com 32 cm de espessura e uma camada de poliestireno extrudido tipo "*roofmate sl*" com 3 cm de espessura. Os restantes elementos estruturais são em betão armado sem isolamento térmico. À excepção da parede exterior e cobertura, os restantes elementos da envolvente podem ser considerados adiabáticos, isto é, sem trocas de calor significativas através deles.

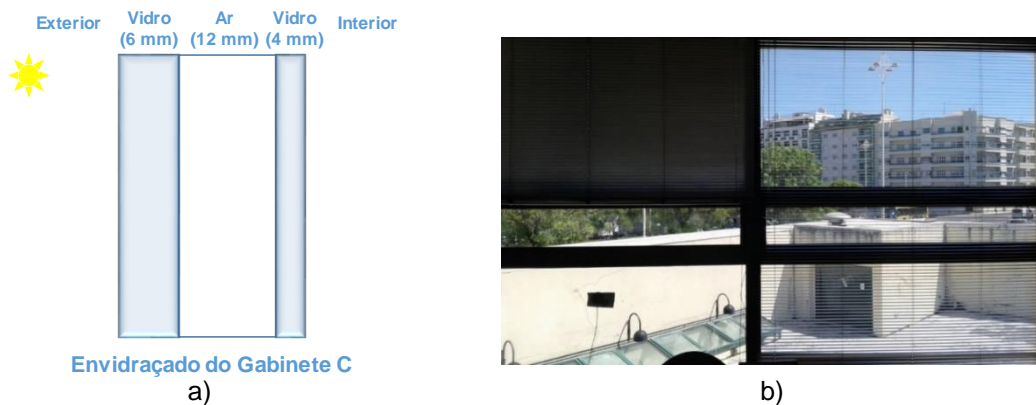


Figura 4.3 - Envidraçado do gabinete de referência: a) configuração do sistema envidraçado; vista interior da fachada envidraçada e do sistema de protecção solar.

A cobertura é apenas acessível para fins de manutenção, sendo constituída por uma camada de forma por cima da laje, a que se segue uma camada de *roofmate*, uma camada impermeabilizante de feltro geotêxtil e uma camada de protecção em brita. A cobertura é rodeada em todo o seu perímetro por um muro de platibanda. Na Figura 4.4 é possível observar a fachada Sul do edifício, bem como a localização dos gabinetes. É também visível a platibanda, bem como o corpo saliente mencionado anteriormente, por onde se entra para o edifício, e que produz um efeito de sombreamento nos gabinetes cerca do meio-dia.

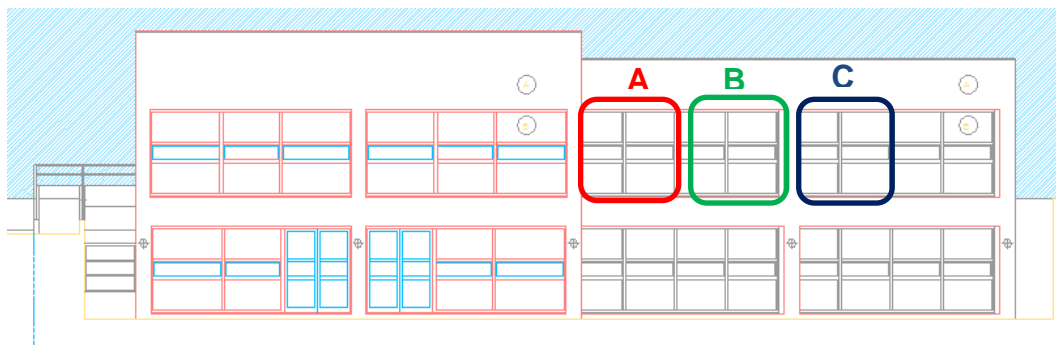


Figura 4.4 - Esquema do alçado Sul e localização dos gabinetes.

A escolha de qual a película a colocar em cada gabinete foi completamente aleatória, até porque, como referido anteriormente, os gabinetes são idênticos variando apenas na utilização dada por cada ocupante, o que não foi de todo possível controlar. De facto, como se pode observar na Figura 5.6, um dos gabinetes está com a janela aberta, algo que se tornou recorrente durante toda a campanha experimental. Tentou-se, ao falar com os ocupantes, que todos os gabinetes apresentassem sempre a mesma configuração relativamente ao grau de abertura das janelas e posição dos estores, mas por razões compreensíveis não foi possível assegurar esta condição, uma vez que o conceito de conforto é bastante subjectivo e varia de pessoa para pessoa.

Por outro lado, as películas utilizadas na campanha experimental não foram propriamente objecto de escolha, uma vez que uma delas – a película interior – tinha sido previamente aplicada e a película a

instalar pelo exterior foi fornecida através de uma empresa, que garantiu tratar-se de uma película com um desempenho térmico bastante acima da média.

4.2 Películas utilizadas no caso de estudo

Após a selecção dos três gabinetes no pavilhão de Mecânica III que cumpriam os requisitos mencionados anteriormente, foi possível proceder à instalação da película pelo exterior no gabinete A e remoção da película interior no gabinete C, sendo que estes gabinetes, como atrás referido, já possuíam uma película instalada pelo interior. Na Figura 4.5 é possível observar a remoção da película interior e a aplicação da película pelo exterior.



Figura 4.5 - Remoção (a) e aplicação pelo exterior (b) das películas.

Foi necessário ter alguns cuidados na instalação das películas. Por um lado, não convinha que estivesse a chover, uma vez que iria afectar a aplicação das películas pelo exterior, e por outro lado não convinha que as temperaturas fossem muito elevadas porque as películas são aplicadas recorrendo a uma solução de água com um sabão específico e as altas temperaturas podem afectar o desempenho dessa solução, o que se iria traduzir numa incorrecta aplicação das películas e que poderia, eventualmente, afectar o seu desempenho futuro.

Na Figura 4.6 é possível observar um esquema dos envidraçados utilizados na campanha experimental. No gabinete A foi aplicada a película RHE20 SI ER HPR (a vermelho) pelo exterior ao passo que no gabinete B foi mantida a película R35 SI SR HPR (a verde) previamente instalada pelo interior. A designação das películas corresponde a um código universal, mas não oficial, em que a(s) primeira(s) letra(s) corresponde(m) ao tipo de película e o número corresponde à transmitância visível da película. A restante informação diz respeito à cor da película, à localização da camada de protecção anti-risco e ao tipo de adesivo.

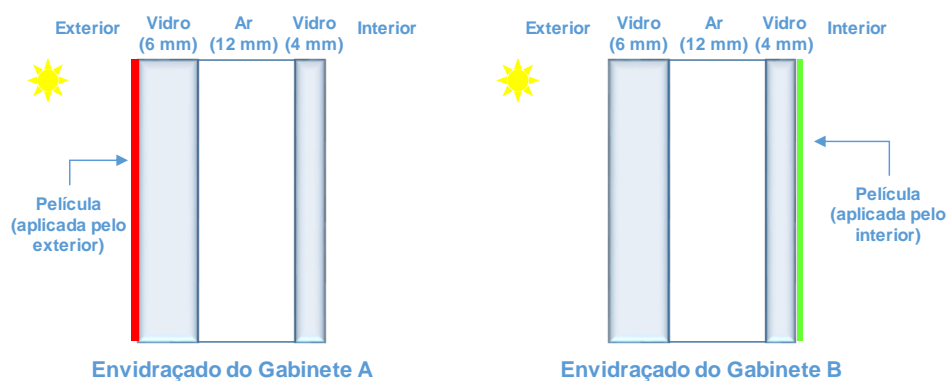


Figura 4.6 - Configuração dos envidraçados A e B.

Para a película A, RHE20 SI ER HPR significa que se trata de uma película reflectiva de aplicação pelo exterior com 20% de transmitância visível, cor prateada, camada de protecção anti-risco pelo exterior e adesivo de alta resistência ao calor e para a película B, R35 SI SR HPR significa que se trata de uma película reflectiva com 35% de transmitância visível, cor prateada, camada de protecção anti-risco pelo interior e adesivo de alta resistência ao calor.

Pinheiro, J. *et al* [34] estudaram analiticamente as propriedades térmicas e ópticas de vários tipos de películas (sem qualquer tipo de vidro), incluindo as duas utilizadas na campanha experimental, e cujas propriedades estão resumidas na Tabela 4.1. Salienta-se o facto do valor da transmitância visível das películas não ser igual ao valor da transmitância visível na designação comercial das películas.

Tabela 4.1 - Propriedades das películas utilizadas na campanha experimental [34].

	Transmissão [%]	Reflexão [%]	Absorção [%]	Emissividade	U [W/m ² K]	g	τ_v [%]	Redução do encadeamento [%]	Redução total de radiação solar [%]
RHE20 SI ER HPR [44] (gab. A)	10	62	28	0.87	5.7	0.17	14	85	83
R35 SI SR HPR [45] (gab. B)	21	41	38	0.71	5.3	0.30	28	68	70

4.3 Procedimento experimental

A campanha experimental de monitorização foi realizada *in-situ* simultaneamente nos três gabinetes A, B e C representados na Figura 4.1b. O gabinete C é considerado no presente estudo como de referência por não ter película. Como referido anteriormente, os gabinetes A e B têm películas de controlo solar aplicadas respectivamente pelo exterior e interior dos envidraçados.

Para determinar o desempenho térmico e visual dos vãos envidraçados, com e sem películas de controlo solar, foram monitorizadas em cada um dos três gabinetes e em contínuo as seguintes grandezas:

- i. temperatura superficial exterior e interior do envidraçado;
- ii. temperatura superficial das lâminas metálicas dos estores venezianos;
- iii. temperatura dos ambientes exterior e interior;
- iv. fluxo de calor no envidraçado;
- v. radiação solar interior normal à fachada e exterior em plano horizontal (medida na cobertura) e vertical normal à fachada (medida na cobertura e na fachada exterior dos gabinetes);
- vi. iluminância exterior em plano horizontal (medida na cobertura) e interior em plano vertical normal à fachada e em plano horizontal (plano de trabalho).

Antes de se iniciar a campanha experimental, os estores cobriam apenas a parte superior do envidraçado com as lâminas dispostas a 90° (posição vertical), de maneira a permitir que as variações de temperatura na metade inferior do envidraçado fossem devidas apenas ao efeito da película. Por este motivo, os termopares superficiais foram colocados na metade inferior do envidraçado, como se pode observar na Figura 4.3b. No entanto, por questões de conforto interior o estore do lado direito foi todo corrido com as lâminas colocadas a 0° (posição horizontal), como se pode observar na Figura 4.3b, pelo que foram descartados os registos de temperatura do lado direito do envidraçado.

Na Figura 4.7 é visível a posição dos termopares, fluxímetro e piranómetro colados na superfície exterior do envidraçado do gabinete C. Uma vez que o número de piranómetros era reduzido, optou-se por colocar apenas um no gabinete C, assumindo-se que os níveis de radiação solar incidente serão semelhantes nos três gabinetes, devido à proximidade destes.

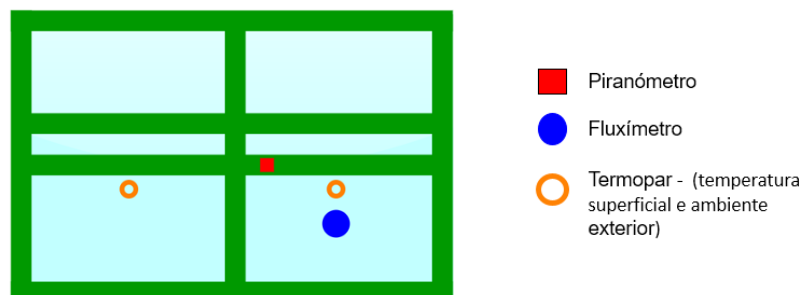


Figura 4.7 -Esquema da colocação dos sensores na fachada exterior.

Em cada gabinete foram utilizados 9 termopares tipo T com 0.2 mm de espessura (Figura 4.8) para medição de temperaturas superficiais no envidraçado e no dispositivo de sombreamento e ainda de temperatura ambiente interior e exterior. Devido ao facto de existirem dois painéis de vidro em cada fachada, decidiu-se colocar termopares em ambos os painéis de vidro, esquerdo e direito. Na Figura 4a é possível observar a posição de um termopar para a medição da temperatura ambiente interior num dos gabinetes, na Figura 4b é possível observar a posição dos termopares para medição das temperaturas superficiais interiores e exteriores num dos gabinetes e na Figura 4.9 é apresentado um esquema com a colocação dos termopares para medição das temperaturas superficiais do envidraçado, bem como das temperaturas ambiente.



Figura 4.8 - Termopares utilizados na campanha experimental: a) termopares para medição da temperatura ambiente interior; b) medição da temperatura superficial interior e exterior.

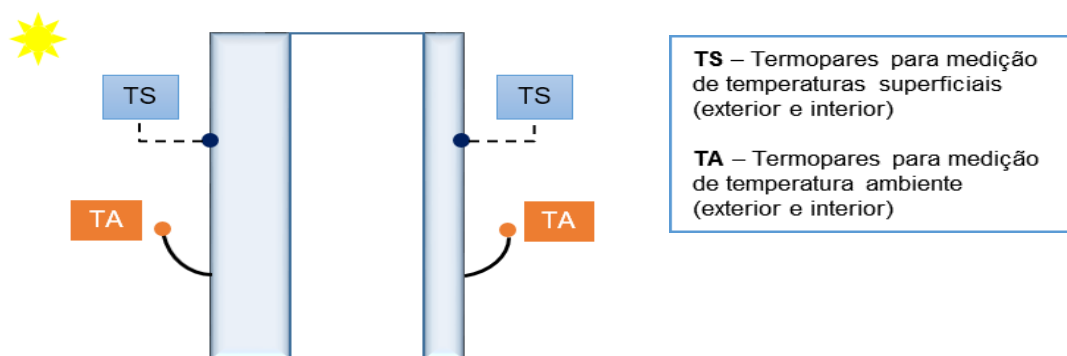


Figura 4.9 - Colocação dos termopares para medição das temperaturas superficiais e ambiente interior e exterior.

Para a medição do fluxo de calor no envidraçado, foi colocado um fluxímetro Hukseflux na superfície interior do envidraçado de cada gabinete, como se pode observar na Figura 4.10, tendo-se admitido como positivo o sentido do fluxo do interior para o exterior.

Para a obtenção dos valores da radiação solar e da iluminância interior foram utilizados piranómetros LI-COR LI200 (Figura 4.11a) nos gabinetes A e C e Kipp&Zonen CMP6 (Figura 4.11b) no gabinete B e luxímetros LI-COR 210R (Figura 4.11a) em todos os gabinetes.

Foi medida a radiação vertical no interior dos gabinetes – com o cuidado de colocar, dentro do possível, os sensores na mesma posição – bem como a radiação vertical exterior no gabinete C, assumindo-se que a radiação vertical exterior será semelhante em toda a fachada. Também foi medida a iluminância

vertical interior em todos os gabinetes, ao passo que a iluminância exterior foi medida na cobertura em plano horizontal.



Figura 4.10 - Fluxímetro: a) vista interior; b) vista exterior.

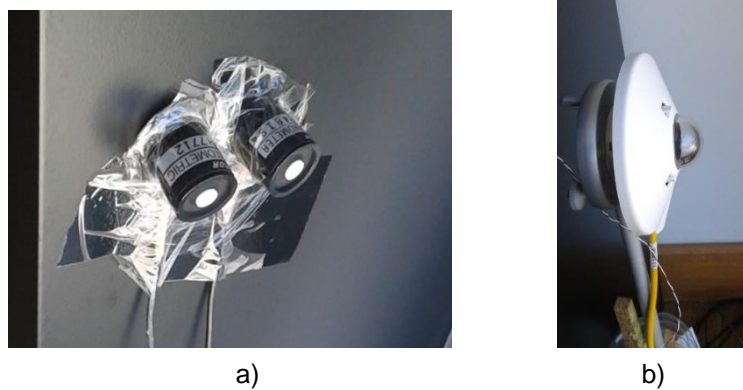


Figura 4.11 - Piranómetros utilizados para medição da radiação e da iluminância: a) piranómetros LI-COR (gabinetes A e C); b) piranómetro Kipp&Zonen CMP6 (gabinete B).

Na cobertura, como se pode ver na Figura 4.12, foi utilizado um piranómetro BF5 da Delta T (círculo azul claro) para medir a radiação global e difusa em plano horizontal. Para além deste equipamento, foi ainda usado outro piranómetro da Kipp&Zonen CMP6 (círculo vermelho) para medição da radiação solar global em plano vertical e um luxímetro LI-COR 210R para medição da iluminância em plano horizontal.

Devido ao número limitado de luxímetros, optou-se por não colocar nenhum na superfície exterior dos envidraçados e obter a iluminância exterior vertical ao nível dos gabinetes a partir da iluminância exterior horizontal medida na cobertura utilizando a relação entre os registos de radiação vertical e horizontal obtidos com os respectivos piranómetros na cobertura (Figura 4.12). Como se explicará no capítulo 6, esta estratégia não foi bem sucedida porque se verificou, ao contrário do que à partida se esperaria, um desajuste entre os valores de radiação vertical exterior medidos na cobertura e no envidraçado.



Figura 4.12 - Sensores utilizados na cobertura (a vermelho o piranómetro vertical da Kipp&Zonen CMP6 e a azul o piranómetro horizontal BF5).

Todos sensores foram conectados a diferentes sistemas de aquisição de dados, respectivamente Campbell CR10X (gabinete C – Figura 4.13a), Delta-T DL2e (gabinete B – Figura 4.13b) e DataTaker DT85 (gabinete A). Na cobertura, todos os equipamentos foram conectados a um sistema de aquisição de dados DL2e da Delta T, acoplado a uma bateria externa (Figura 4.12).

Foram ainda utilizados três sensores da HOBO (Figura 4.13c) para medir a temperatura do ar e humidade relativa interior e a iluminância no plano de trabalho, tendo sido colocados, um por cada gabinete, sobre a mesa de trabalho do seu ocupante. No entanto, devido a problemas técnicos, só foi possível obter os dados destes sensores durante a campanha de Inverno.



a)



b)



c)

Figura 4.13 - Sistemas de aquisição de dados: a) Campbell CR10X (gabinete C); b) Delta-T DL2e (gabinete B); c) sensor HOBO.

Finalmente, na Figura 4.14 é possível observar um corte esquemático com a posição de todos os sensores utilizados tanto nos gabinetes como na cobertura (à excepção dos termopares). A altura do plano de trabalho é cerca de 50 a 80 cm, pelo que foi a esse nível, sempre que possível, que se colocaram todos os sensores nos gabinetes. Por outro lado, como a disposição dos gabinetes não era igual para todos, a posição dos sensores não pôde ser exactamente a mesma em todos os gabinetes, tendo-se, no entanto, procurado que fosse a mais idêntica possível dentro dos condicionamentos existentes.

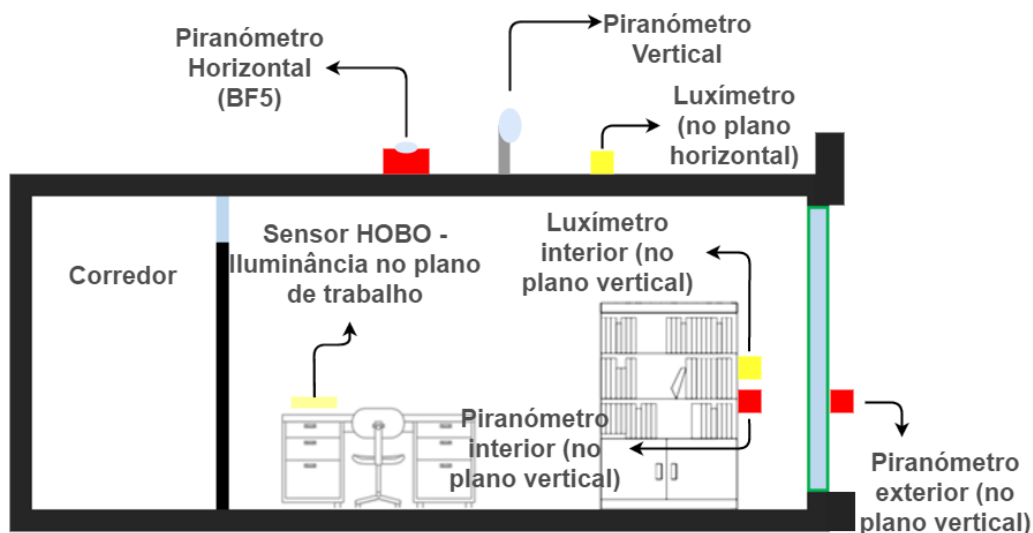


Figura 4.14 - Corte esquemático com a posição dos sensores no interior do gabinete de referência e na cobertura.

Na Tabela 4.2 encontra-se de forma resumida os detalhes dos equipamentos utilizados durante a campanha experimental.

Tabela 4.2 - Detalhes dos equipamentos utilizados.

Equipamento	Modelo	Variável medida	Precisão	Localização
Termopares	Tipo-T	Temperatura	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ a 100°C	Superfície do vidro e interior e exterior dos gabinetes
Fluxímetros	Hukseflux HFP01	Fluxo de calor	$\pm 5\%$	Superfície interior do vidro
Piranómetros	LI-200R	Radiação global	$\pm 3\%$	Gabinetes
	Kipp&Zonen		5 a $20 \mu\text{W}/\text{m}^2$	
	BF5	Radiação global	$\pm 5 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 12\%$	Cobertura
	Radiação difusa	$\pm 20 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 15\%$		
Luxímetros	LI-210R	Iluminância	$\pm 5\%$	Cobertura e gabinetes

Após a montagem de todos os sensores, tanto nos gabinetes como na cobertura, foi possível passar à recolha de dados, por forma a avaliar o desempenho térmico e óptico dos diferentes envidraçados. Antes da apresentação e análise dos resultados da campanha experimental, é feita no capítulo seguinte uma breve descrição das propriedades obtidas para cada sistema de envidraçado, A, B e C, e dos programas numéricos utilizados para esse efeito.

5 Criação dos sistemas envidraçados com película

5.1 *Optics6* e *Window7.3*

Para a determinação das propriedades dos três sistemas envidraçados, A, B e C, correspondentes aos três gabinetes do caso de estudo, recorreu-se a dois programas de simulação: o *Optics6* e o *Window7.3* [46]. O *Optics* permitiu criar um tipo de vidro “virtual”, constituído pelo vidro original e a película utilizada, e determinar as respectivas propriedades térmicas e ópticas. Por sua vez, o *Window* permitiu obter as propriedades térmicas e ópticas dos sistemas envidraçados dos gabinetes, constituídos por dois panos de vidro separados por uma caixa-de-ar e em que, nos casos de aplicação de película, o pano com película correspondeu ao vidro “virtual” criado no *Optics*. Na Figura 5.1 é apresentado um algoritmo que mostra os passos para a obtenção das características de um sistema envidraçado com inclusão de películas.

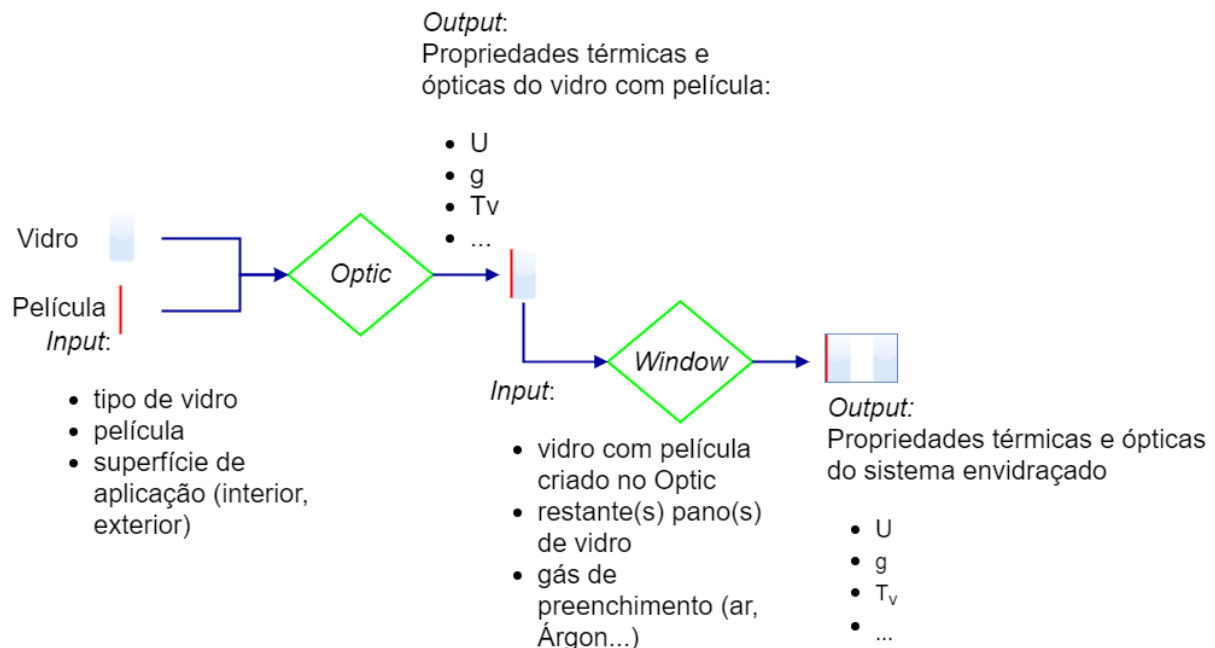


Figura 5.1 - Algoritmo para determinar as propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados.

O *Optics* permite criar um vidro “virtual”, englobando o vidro original e a película, e determinar as propriedades térmicas e ópticas que resultam para o conjunto. Uma vez criado este pano de vidro “virtual”, é possível exportá-lo para a base de dados do *Window* e passar a considerá-lo como mais um tipo de vidro passível de ser utilizado na formação de sistemas envidraçados multicamada. Foi este o processo utilizado para a criação dos sistemas envidraçados dos gabinetes. Depois de criado cada sistema de envidraçado, o programa *Window* permite calcular as propriedades térmicas e ópticas relativas ao centro do envidraçado e com a radiação solar a incidir na horizontal. De salientar que não foram tidas em conta as propriedades da caixilharia, uma vez que a sua área na fachada em comparação com a área envidraçada é bastante reduzida.

Para criar o pano de vidro com película no *Optics*, é necessário, em primeiro lugar, mudar o ficheiro de dados de *database* para *UserDatabase*, que é o local onde são guardados os vidros criados pelo utilizador. Depois, no separador *monolithic* (Figura 5.2 – passo 1), deve-se escolher o tipo de vidro que se pretende usar como suporte da película. No presente estudo foram utilizados dois tipos de películas em dois tipos de vidro diferentes, ambos da Saint Gobain Glass: num caso o vidro de suporte da película foi o vidro exterior, que é do tipo PLANILUX com uma espessura de 6 mm, enquanto que no outro caso o vidro de suporte da película foi o vidro interior, que é do mesmo tipo do anterior, mas com uma espessura de 4 mm.

Após a escolha do vidro, no separador da *layer #1*, como se mostra na Figura 5.2 (passo 2), selecciona-se com o botão direito do rato a opção *Add film* (passo 3). Na janela que se abre com o nome *Change Glazing*, do lado esquerdo estão as características do tipo de vidro escolhido para suporte, como o nome do tipo de vidro e o respectivo ID. No lado direito da referida janela, selecciona-se o campo *Film Name* (passo 4), escolhe-se a película pretendida e indica-se a superfície a aplicar, interior ou exterior. Finalmente, deve-se renomear o novo tipo de vidro com película criado para não se confundir com os vidros existentes.

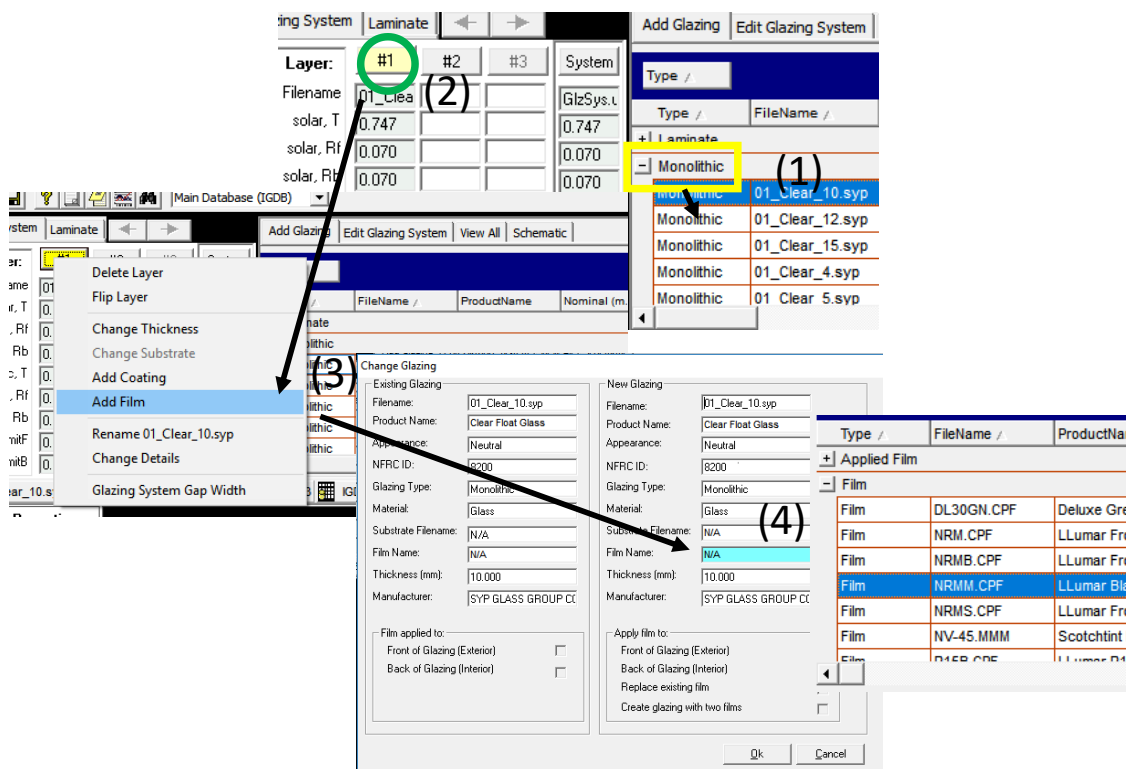


Figura 5.2 - Passos para criar um tipo de vidro com película.

Depois de criado o vidro com película no *Optics*, é possível determinar as características térmicas e ópticas dos envidraçados em questão. Para tal, no *Window* é necessário ligar a base de dados à *UserDatabase* criada no *Optics*, o que é feito a partir do separador *File* → *Preferences*, seleccionando a opção *UserDatabase* na aba *Optical Data* (Figura 5.3).

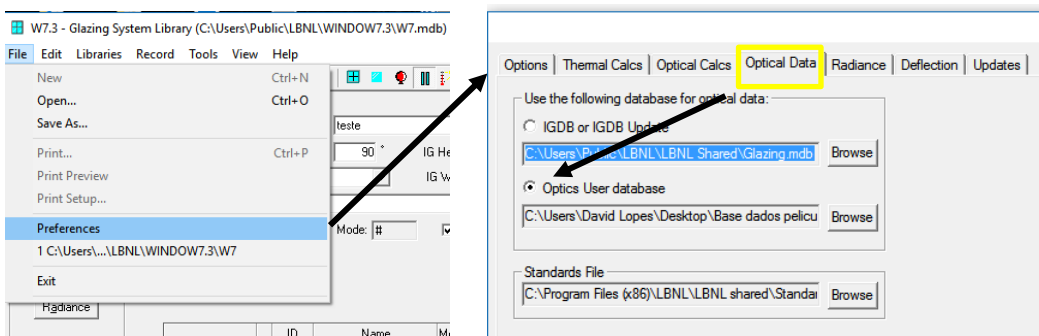


Figura 5.3 - Ligação entre a base de dados do *Optics* e a do *Window*.

Para importar a base de dados do *Optics*, é necessário clicar na aba *Glass Library*→*Import* e escolher a opção *IGDB or Optics User Database* (Figura 5.4).

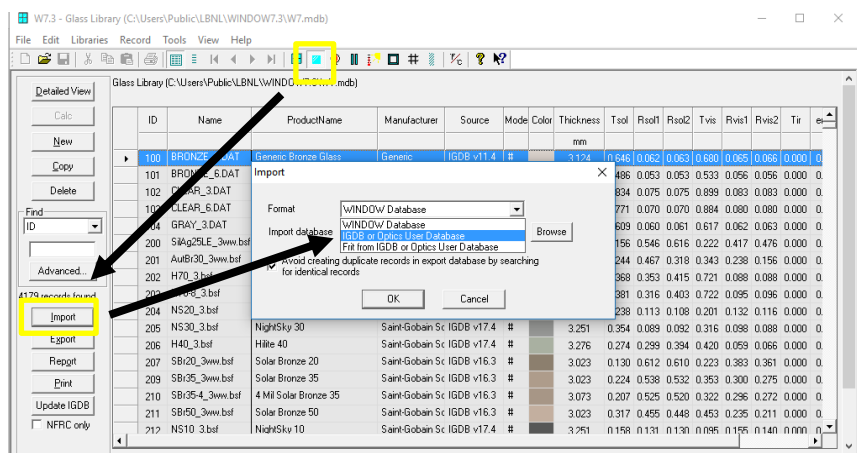


Figura 5.4 - Importar a base de dados criada no *Optics* para o *Window*.

Finalmente, é possível criar vários tipos de envidraçados utilizando os vidros com películas criados no *Optics* (Figura 5.5). Para tal, na aba *Glazing System Library* deve-se seleccionar o número de camadas do envidraçado, as condições ambientais, a espessura da camada de ar, o tipo de gás de preenchimento e o vidro criado no *Optics*. Uma vez criado o sistema de envidraçado pretendido, a função *Calc* (F9) efectua a determinação das propriedades térmicas e ópticas desse sistema.

No subcapítulo seguinte, juntamente com as propriedades térmicas e ópticas do sistema envidraçado duplo (com o espaço entre panos preenchido com ar) do gabinete C de referência (6mm+12mm+4mm), que foram determinadas unicamente com o *Window* (uma vez que neste caso não foi utilizada película), são apresentadas as propriedades térmicas e ópticas dos sistemas envidraçados com película dos gabinetes A e B, determinadas com os programas *Optics* e *Window*, e que constituem um primeiro indicador do comportamento térmico e óptico desses sistemas, com película, face ao sistema de referência, sem película.

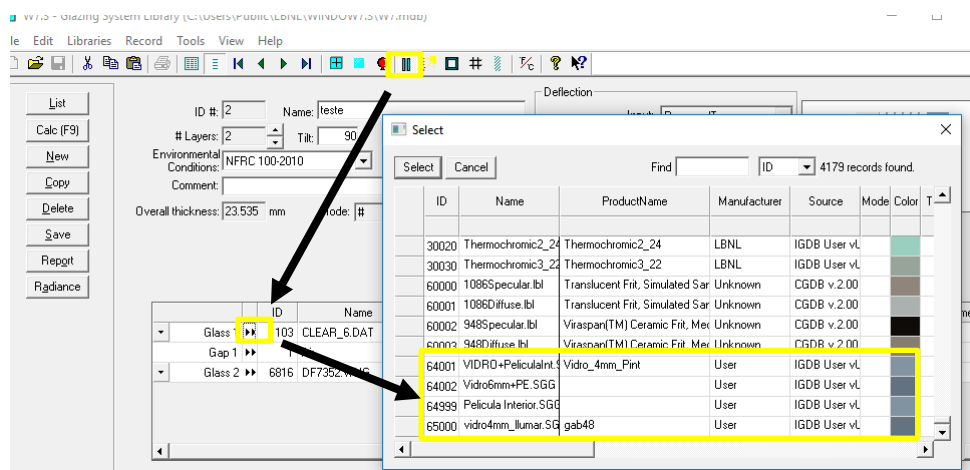


Figura 5.5 - Escolha do tipo de envidraçado a calcular.

5.2 Propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados do caso de estudo

O conhecimento das propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados permite antever, de certa forma, o desempenho esperado dos três envidraçados. Na Tabela 5.1 apresentam-se as principais propriedades térmicas e ópticas do envidraçado sem película (gabinete C), do envidraçado com a película R35 SR HPR pelo interior (gabinete B) e do envidraçado com a película RHE20 SI ER HPR pelo exterior (gabinete A), obtidas através dos programas mencionados no subcapítulo anterior. Estas propriedades consistem no factor solar (g), na transmitância visível (τ_{vis}), na transmitância solar (τ_{sol}), na transmitância à radiação UV (τ_{UV}), na reflectância frontal visível ($\rho_{f,vis}$), na reflectância de tardoz visível ($\rho_{b,vis}$), na reflectância frontal solar ($\rho_{f,sol}$), na reflectância de tardoz solar ($\rho_{b,sol}$), na absorptância do pano de vidro exterior (α_1), na absorptância do pano de vidro interior (α_2) e no coeficiente de selectividade espectral (CSE). De salientar que, como referido anteriormente, devido à espessura muito reduzida das películas, o coeficiente de transmissão térmica (U) não sofreu alterações significativas, tendo sido idêntico nos três casos.

Como já foi referido anteriormente, as principais propriedades solares e ópticas de envidraçados são especificadas pela EN 460 e consistem na transmitância e reflectância em diferentes espectros da radiação electromagnética (UV, visível, solar e térmica de acordo com a EN 12898) e na absorptância.

É possível observar na Tabela 5.1 que existe uma redução significativa no factor solar (g) e na transmitância visível (τ_{vis}), tanto no gabinete A como no gabinete B. Os valores do factor solar foram respectivamente de 0.18, 0.4 e 0.74, nos envidraçados A, B e C. Recordando o conceito de factor solar, no envidraçado A apenas 18% da radiação solar incidente é transmitida para o interior, sendo 40% no envidraçado B e 74% no envidraçado de referência.

Tabela 5.1 - Propriedades dos envidraçados dos gabinetes.

Propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados	Gabinete A (película RHE20 SI ER [44])	Gabinete B (película R35 SR HPR [45])	Gabinete C (sem película)
U [W/°K.m ²]	2.82	2.82	2.82
g	0.18	0.40	0.74
τ_{vis}	0.15	0.26	0.80
τ_{sol}	0.10	0.17	0.66
τ_{UV}	<0.01	<0.01	0.49
$\rho_{f,vis}$	0.60	0.45	0.14
$\rho_{b,vis}$	0.56	0.46	0.15
$\rho_{f,sol}$	0.62	0.34	0.12
$\rho_{b,sol}$	0.41	0.50	0.12
α_1	0.27	0.19	0.15
α_2	0.01	0.31	0.07
CSE	0.83	0.65	1.08

Se se compararem estes valores com os da ficha técnica das películas utilizadas, chega-se à conclusão que são bastante parecidos, e que as diferenças entre eles se devem ao facto de o sistema envidraçado indicado pelo fabricante ser constituído por dois vidros de 4 mm e com uma camada de ar de 12 mm. De acordo com as fichas técnicas o factor solar é de 0.13 para a película A e de 0.39 para a película B (com vidro duplo 4+12+4mm). Para a transmitância visível os valores fornecidos pelo fabricante são respectivamente 0.13 e 0.26 para as películas A e B, ao passo que os valores calculados foram 0.15 e 0.26, respectivamente.

A redução foi cerca de 75% e 46% para o factor solar e de 74% e 68% para a transmitância visível, respectivamente para os envidraçados com as películas A e B, comparativamente ao gabinete de referência. Esta diferença faz desde logo antever que a película A, tendo uma melhor relação entre estes dois coeficientes, seja mais eficiente. Apesar do sistema com a película A apresentar uma redução do factor solar muito significativa, a sua transmitância visível sofre também uma redução semelhante, o que é um efeito que penaliza o desempenho global. No caso da película B, a redução da transmitância visível é superior à redução do factor solar, o que poderá levar a aumentos energéticos associados à iluminação eléctrica em dias mais encobertos e a uma menor eficiência térmica quando comparada com a película A.

É também possível observar que a película A é bastante mais reflectiva do que a película B, sendo que a reflectância das duas é bastante superior à reflectância do envidraçado C. De facto, estas diferenças podem ser confirmadas visualmente na Figura 5.6: o gabinete A, mais à esquerda na referida figura, apresenta uma superfície bastante mais espelhada que os restantes gabinetes, sendo que no gabinete C, onde não foi aplicada qualquer película, até é possível observar o interior do gabinete.

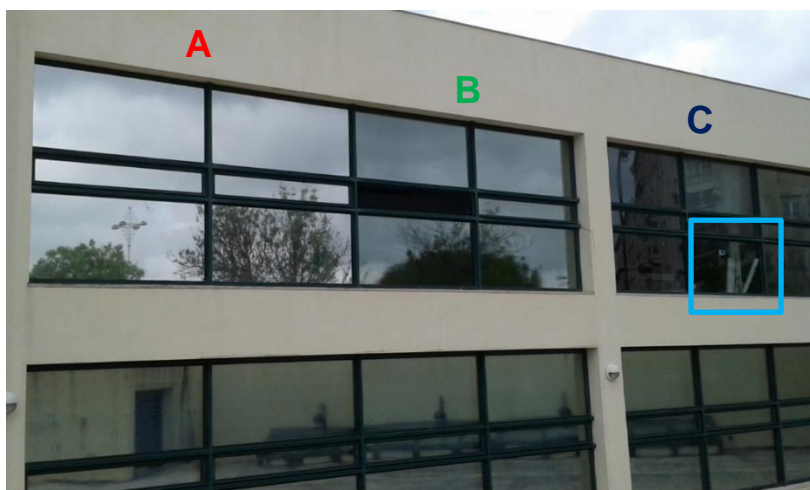


Figura 5.6 - Fachada exterior do edifício (a azul claro é possível observar o interior do gabinete C).

No gabinete A, 60% da radiação visível incidente é reflectida para o exterior e, se for considerada a totalidade da radiação solar, este valor aumenta para 62%, ao passo que no gabinete B a radiação solar reflectida é cerca de metade (34%).

A reflectância de tardoz (ρ_b) corresponde à reflexão da radiação proveniente do interior do espaço. É uma propriedade importante, uma vez que contribui para o efeito de estufa provocado pelo sistema de envidraçado. Por ter a película colada na face interior do envidraçado, o gabinete B é aquele que apresenta a maior reflectância de tardoz solar ($\rho_{b,sol}$), 50% contra 41% da película A e somente 12% do envidraçado de referência. Esta propriedade faz antever que os sistemas envidraçados com película aumentem a reflexão de radiação proveniente do interior, podendo, eventualmente, provocar um aumento da temperatura interior devido ao efeito de estufa provocado pelo sistema envidraçado. No que respeita à reflectância de tardoz visível ($\rho_{b,vis}$), os valores calculados foram 56%, 46% e 15% respectivamente para os sistemas envidraçados A, B e C.

No espectro da radiação UV, ambas as películas apresentam uma transmitância (τ_{UV}) inferior a 1%, o que quando comparada com a transmitância UV do envidraçado de referência, que é cerca de 50%, revela uma excelente eficácia na redução da transmissão de raios UV. Esta redução é não só benéfica para a saúde humana, mas também para a durabilidade dos materiais, uma vez que a exposição prolongada a este tipo de radiação pode ter consequências negativas, como foi explicado no capítulo 2.1. Na verdade, no curto espaço temporal da campanha experimental, foi possível observar alguma degradação na zona onde o sol incidia directamente no pavimento de madeira do gabinete C (sem película), o que atesta a capacidade de protecção à radiação UV das películas de controlo solar utilizadas nos gabinetes A e B.

Outra propriedade que diferencia os envidraçados dos gabinetes, é a absorptância dos panos de vidro exterior (α_1) e interior (α_2). Como seria expectável à partida, tendo em conta as características absorptantes das películas, esta propriedade terá um valor mais alto no pano de vidro onde está

instalada a película e, em ambos os casos, superior ao valor do envidraçado de referência. Como tal, a absorptância do pano exterior no gabinete A é de 27%, no gabinete B é de 19% e no gabinete de referência é de 15%. No que concerne à absorptância do pano interior, esta tem o valor mais elevado no gabinete B, 31%, enquanto que nos gabinetes A e C o seu valor é de apenas 1% e 7%, respectivamente. Como mencionado no capítulo anterior, o factor solar vai depender, não só da radiação que é transmitida, como também da parcela de radiação que é absorvida e transmitida para o interior, ou seja, quanto maior for a absorptância do pano interior, maior será o factor solar (para a mesma parcela de energia transmitida). É por esta razão que as películas aplicadas pelo interior apresentam, de uma maneira geral, um desempenho térmico menos bom quando comparadas com películas semelhantes aplicadas pelo exterior.

O coeficiente de selectividade espectral (CSE) vem demonstrar que estas películas não apresentam um bom comportamento à selectividade espectral, sendo em todos os casos inferior a 1.2. Aliás, dos três sistemas envidraçados, aquele que apresenta o maior valor de CSE, e por conseguinte melhor comportamento espectral, é o envidraçado de referência (com um CSE igual a 1.08), o que, tendo por base apenas este coeficiente, seria a solução preferida. No entanto, a opção por esta solução não seria a mais aconselhável, uma vez que, apesar da transmitância visível ser a mais elevada das três soluções, também o factor solar é o mais elevado, do que resulta um desempenho térmico fraco e condições de conforto térmico insatisfatórias (tendo mesmo determinado a necessidade de colocar películas pelo interior antes da realização deste estudo).

Ter presente estas propriedades solar-ópticas, e sobretudo compreender o efeito que têm no comportamento dos envidraçados é importante na fase da análise de resultados, pois não só facilita a detecção de eventuais erros nos registos obtidos durante a campanha experimental, como também permite uma análise crítica aos resultados obtidos.

6 Análise e discussão de resultados

A campanha experimental realizou-se em dois períodos distintos: numa primeira fase, os gabinetes foram monitorizados durante o período de Inverno e numa fase posterior, durante o período de Verão. No presente capítulo apresentam-se e discutem-se os principais resultados obtidos em cada um dos períodos da campanha experimental.

6.1 Campanha de Inverno

A campanha de Inverno decorreu entre os dias 11 de Março e 16 de Abril. Refira-se que devido a problemas logísticos não foi possível realizar a campanha de Inverno no período mais rigoroso, entre Dezembro e Janeiro, pelo que os dados obtidos nesta campanha correspondem ao período final de Inverno e início da meia-estação. Uma vez que o volume de medições foi muito extenso, optou-se por analisar apenas alguns dias representativos, sendo eles o dia com a temperatura exterior média mais baixa – Dia Mais Frio (DMF) – e o dia com a radiação solar média (no período de insolação) mais baixa – Dia de menor Radiação (DmR). Na Tabela 6.1 apresentam-se as médias da temperatura do ar exterior (T_e), da radiação global vertical exterior medida nos gabinetes ($Rad_{V,gab}$) e na cobertura ($Rad_{V,cob}$) e da radiação global horizontal exterior (Rad_H) nos dias representativos de Inverno (a média das radiações foi calculada apenas para o período de insolação). É de referir que no dia DMF, apesar da temperatura do ar exterior ser baixa, os níveis de radiação solar foram bastante elevados, indicando tratar-se de um dia frio mas sem nuvens, ao passo que no dia DmR ocorre precisamente o contrário, isto é, a temperatura apresenta um valor relativamente alto enquanto que o valor da radiação solar é baixo, revelando tratar-se de um dia com céu encoberto.

Tabela 6.1 - Valores médios diários de temperatura exterior (T_e), de radiação global vertical exterior medida nos gabinetes ($Rad_{V,gab}$) e na cobertura ($Rad_{V,cob}$) e de radiação global horizontal exterior (Rad_H) medida na cobertura, nos DMF e DmR.

	T_e [°C]	$Rad_{V,gab}$ [W/m ²]	$Rad_{V,cob}$ [W/m ²]	Rad_H [W/m ²]
DMF: 31 de Março	12.7	93.0	135.4	298.6
DmR: 14 de Abril	15.1	11.4	32.8	65.6

6.1.1 Temperatura

Na Tabelas 6.2 e 6.3 é possível observar os valores médios de temperatura exterior (T_e) e de radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$) medida na fachada dos gabinetes (tendo o gabinete C sido tomado como representativo do conjunto dos três) nos dias DMF e DmR, respectivamente. Por sua vez, na Figura 6.1 são apresentados os registos de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), temperaturas superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}), bem como de radiação global exterior ($Rad_{V,e}$) medida no plano vertical das fachadas dos gabinetes para o dia mais frio (DMF) e para o dia de menor radiação (DmR).

Para o dia DMF é possível observar o efeito da radiação solar no aumento de todas as temperaturas (Figura 6.1a). De facto, e como mencionado anteriormente, o dia com a temperatura média mais baixa coincidiu com um dia de céu limpo com elevado nível de radiação solar incidente, o que justifica o valor mais elevado das temperaturas superficiais e interior relativamente à temperatura exterior.

Tabela 6.2 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$), no DMF.

	T_e [°C]	T_{se} [°C]			T_{si} [°C]			T_i [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Média	12.7	16.1	16.9	16.0	18.7	21.6	21.2	21.0	20.8	22.5	93
Máximo	20.5	31.4	30.5	29.5	27.0	39.7	35.4	23.3	25.5	30.2	235
Mínimo	8.3	9.2	10.1	9.5	14.6	14.6	14.8	19.3	18.6	19.1	0

Tabela 6.3 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$), no DmR.

	T_e [°C]	T_{se} [°C]			T_{si} [°C]			T_i [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Média	15.1	16.0	16.1	16.2	18.3	18.3	18.8	20.7	20.3	20.8	11
Máximo	16.4	18.0	18.1	18.1	19.5	20.8	20.7	21.2	21.0	25.5	46
Mínimo	14.2	14.5	14.9	14.8	17.7	17.4	18.1	20.3	18.9	18.6	0

Analisando a Figura 6.1, com os valores de temperaturas e radiação solar registados nos dias DMF e DmR verifica-se que, de uma maneira geral, a temperatura superficial exterior (T_{se}) é idêntica nos três gabinetes, sendo no gabinete B ligeiramente superior à do gabinete A quando seria expectável o contrário, uma vez que a absorptância da superfície exterior (0.27) é maior no envidraçado do gabinete A do que no do B (0.19). Este resultado vem comprovar que a película instalada no gabinete A é bastante reflectora (ver Tabela 5.1), diminuindo a quantidade de radiação solar que atravessa o envidraçado e reduzindo desta forma a temperatura superficial exterior do vidro. Além disso, no gabinete B, a película aplicada no pano de vidro interior reflecte parte da radiação para o exterior, e logo também para o pano de vidro exterior, conduzindo a um eventual aumento de T_{se} .

Por outro lado, também as temperaturas superficiais interiores (T_{si}) estão de acordo com as propriedades calculadas anteriormente com os programas *Optics* e *Window* (ver Tabela 5.1). Como evidencia a Tabela 6.2 para o dia DMF, os valores de T_{si} no gabinete B são em média mais elevados que os verificados nos outros dois gabinetes. Tal deve-se ao facto de nesse gabinete a película estar instalada na superfície interior do sistema envidraçado. Ao contrário, os valores de T_{si} no gabinete A são em média menores que os verificados nos outros dois gabinetes, facto que se deve à maior

capacidade reflectora do sistema envidraçado – por efeito da aplicação da película na superfície exterior – e consequentemente menor transmissão da radiação solar para o interior. O gabinete C, por sua vez, apresenta valores de T_{si} que se situam, em média, entre os valores de T_{si} atingidos nos outros dois gabinetes.

No que toca à temperatura ambiente interior (T_i), uma vez mais os resultados estão em concordância com o desempenho expectável dos sistemas envidraçados em função das suas propriedades calculadas no subcapítulo 5.2. De todos os gabinetes, aquele que apresenta valores de T_i mais elevados é o gabinete C, seguido do B e por fim do gabinete A. De salientar, ainda, que a principal diferença registada foi no valor máximo de temperatura ambiente interior, que foi cerca de 30.2 °C, 25.5 °C e 23.3 °C respectivamente para os gabinetes C, B e A (Tabela 6.2).

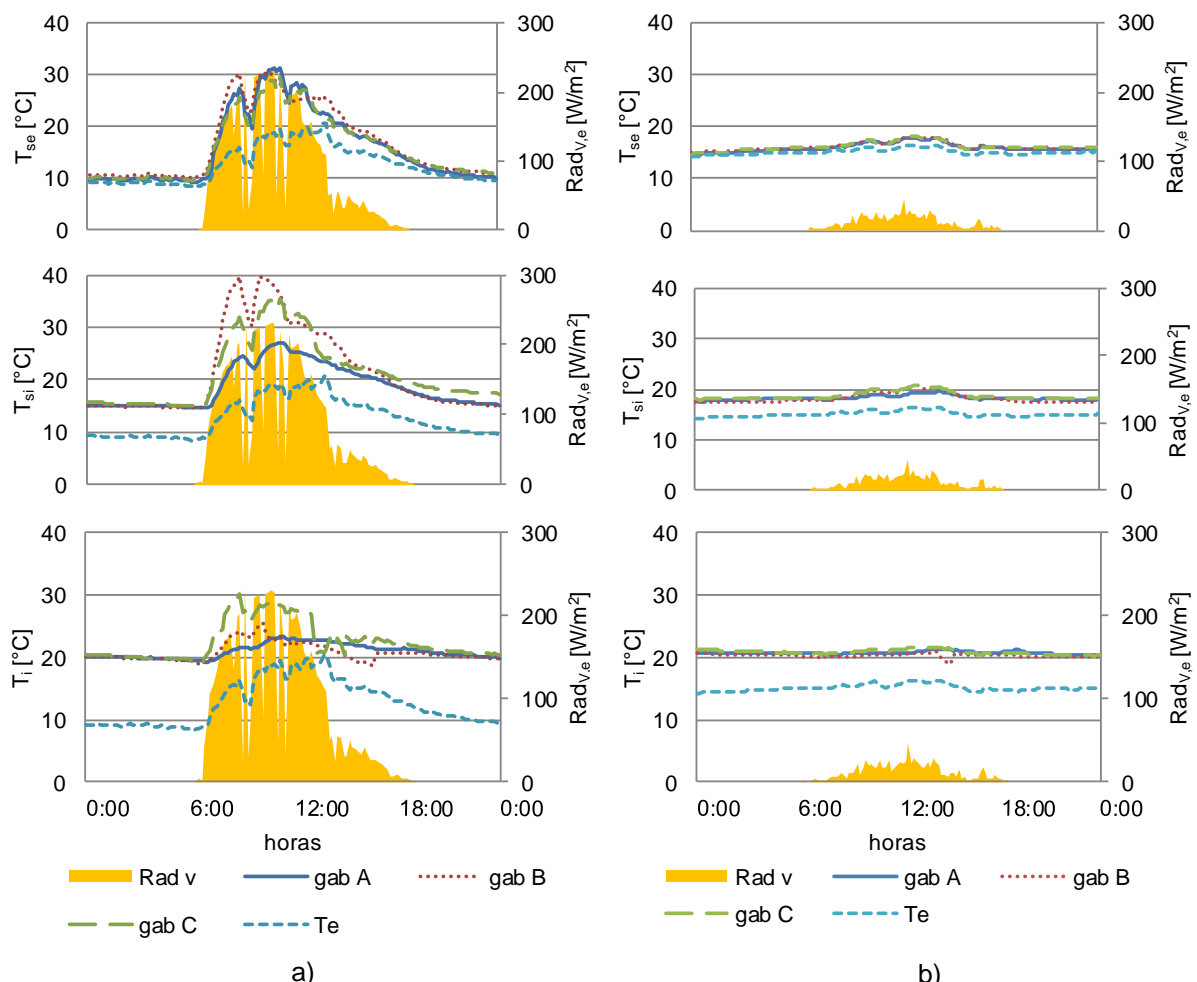


Figura 6.1 - Temperaturas superficial exterior (T_{se}), superficial interior (T_{si}), interior (T_i) e exterior (T_e) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) no DMF (a) e DmR (b).

Para o dia DmR (Tabela 6.3 e Figura 6.1b), as diferenças entre temperaturas dos gabinetes não foram tão expressivas como no dia DMF, o que vem comprovar o facto de a eficácia das películas ser tanto maior quanto maior for o nível de radiação solar [5], [38].

Apesar dos dados recolhidos corresponderem ao final da estação de aquecimento é, ainda assim, interessante verificar que, devido à elevada área envidraçada, o gabinete C apresenta valores de temperatura interior acima do actualmente recomendado – $T_i > 25\text{ °C}$ [47] –, pelo que é de esperar que, mesmo durante o período de Inverno, em dias com elevada radiação solar, isto é, sem nebulosidade, seja necessário arrefecer o ambiente interior para assegurar as condições de conforto térmico.

Também é possível observar que a película do gabinete A apresenta um desempenho superior à do gabinete B, em particular nas alturas de maior radiação, conduzindo a uma menor temperatura máxima interior, a qual é correntemente a temperatura tomada como referência para o cálculo da capacidade dos sistemas de arrefecimento [41]. Todavia, esta melhoria de desempenho não deve ser completamente atribuída à posição da película (superfície exterior), uma vez que o sistema envidraçado A apresenta melhores propriedades solares e ópticas (Tabela 5.1) relativamente ao sistema B.

Na Figura 6.2 estão representados os perfis de temperaturas (exterior, superficiais e interiores) dos gabinetes B e C no dia DMF. Da análise da Figura 6.2 conclui-se que durante o período de insolação T_{si} é maior do que T_i e que a diferença entre estas duas temperaturas é mais acentuada no gabinete B do que no C. Este facto deixa antever que os fluxos de calor por convecção entre a superfície interior do vidro e o ar interior sejam maiores no gabinete B, com película, do que no gabinete C, sem película, como se irá comprovar no subcapítulo seguinte.

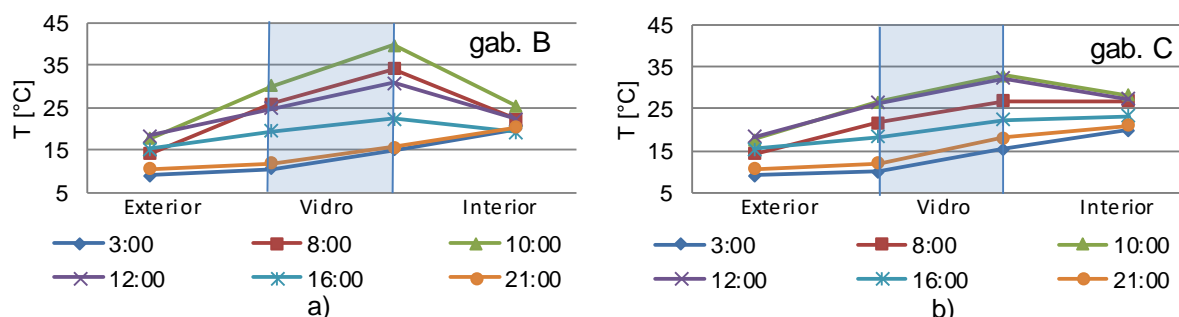


Figura 6.2 - Perfil de temperaturas no gabinete B (a) e gabinete C (b) para o DMF.

6.1.2 Fluxos de calor

Na Figura 6.3 são apresentados os valores do fluxo de calor medidos na superfície interior do envidraçado, para os dias DMF e DmR, bem como os valores de radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) nos gabinetes B e C. Pela forma como o fluxímetro foi instalado (Figura 4.10), o fluxo de calor medido é o que envolve a superfície interior do vidro e o ar interior do gabinete, tendo sido considerado positivo o sentido do interior para o exterior. Não foi possível obter o fluxo no gabinete A devido a problemas no sensor, mas atendendo ao facto de o fluxo de calor ser uma função da diferença entre T_{si} e T_i , e que o gabinete A é o que apresenta menores diferenças entre estas temperaturas, é possível afirmar que o valor do fluxo no gabinete A deverá ser inferior ao fluxo medido nos restantes gabinetes.

É possível observar que no dia DMF o fluxo de calor do gabinete B, nas horas de maior radiação, é superior ao do gabinete C, uma vez que a diferença entre a temperatura superficial interior e a temperatura interior é maior no primeiro caso do que no segundo (como se pode verificar na Figura 6.1b e Figura 6.2b).

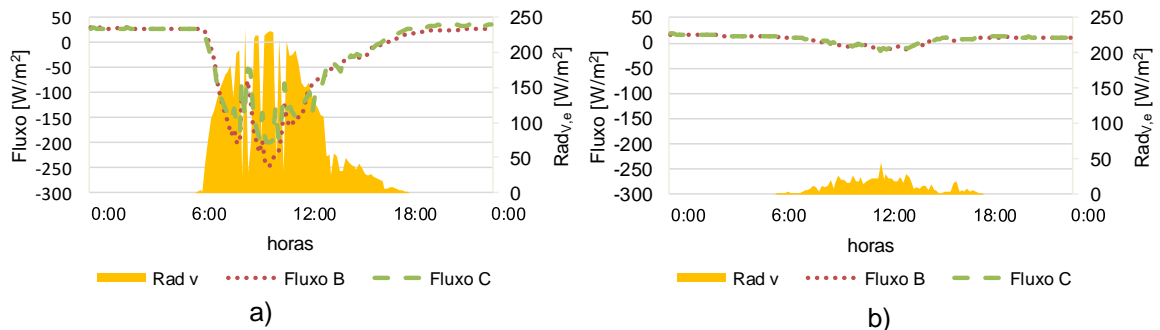


Figura 6.3 - Fluxos de calor nos gabinetes B e C no DMF (a) e DmR (b).

Relativamente ao dia DmR, os fluxos de calor têm um andamento praticamente constante próximo de zero e idêntico nos dois gabinetes. Tal deve-se ao facto de a temperatura superficial interior e a temperatura interior serem semelhantes em ambos os gabinetes e também entre si.

6.1.3 Radiação Solar

Na Figura 6.4 são apresentados os valores da radiação global vertical interior ($Rad_{v,i}$) medida no interior de cada gabinete bem como os valores de radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$), nos dias DMF e DmR.

Para o dia DMF e, ao contrário dos registos de temperatura, os valores medidos da radiação que chega ao interior não estiveram de acordo com o que seria esperado tendo em conta os valores de transmitância solar calculados (Tabela 5.1). Uma vez que os valores de transmitância solar dos sistemas envidraçados A, B e C foram respectivamente 0.10, 0.17 e 0.66, os valores de radiação interior registados no gabinete C deveriam ser superiores aos registados nos gabinetes A e B, o que não foi o caso. No dia DmR, devido aos baixos níveis de radiação solar exterior, praticamente não se registaram diferenças entre as radiações interiores registadas nos gabinetes.

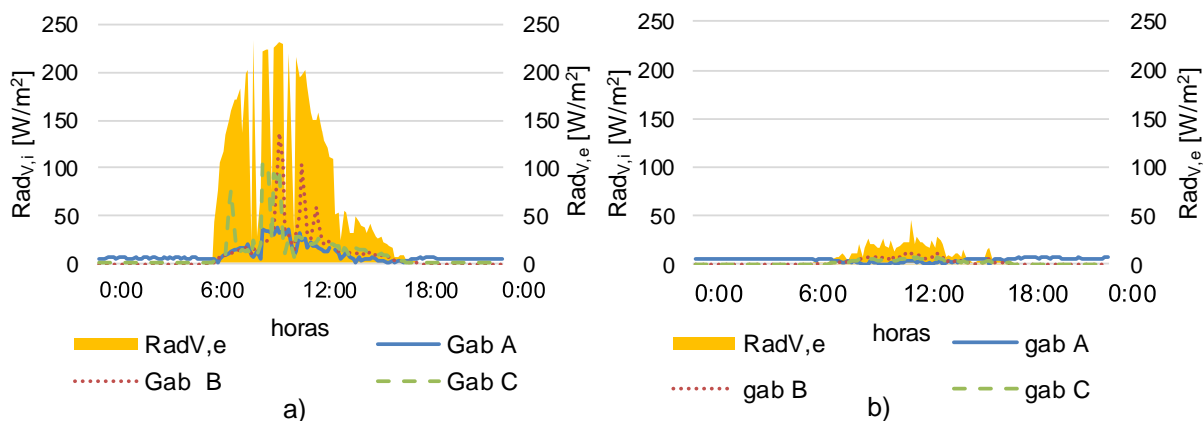


Figura 6.4 - Radiação global vertical interior ($Rad_{V,i}$) e radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$), no DMF (a) e no DmR (b).

Na Figura 6.5 são apresentados os registos obtidos de radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$) medida no plano vertical na fachada exterior dos gabinetes ($Rad_{V,gab}$) e na cobertura ($Rad_{V,cob}$), para os dias DMF e DmR. A Figura 6.6 mostra, por seu turno, os valores de radiação global (Rad_G) e difusa (Rad_d) medidos na cobertura no plano horizontal também para os dois dias tipo (DMF e DmR).

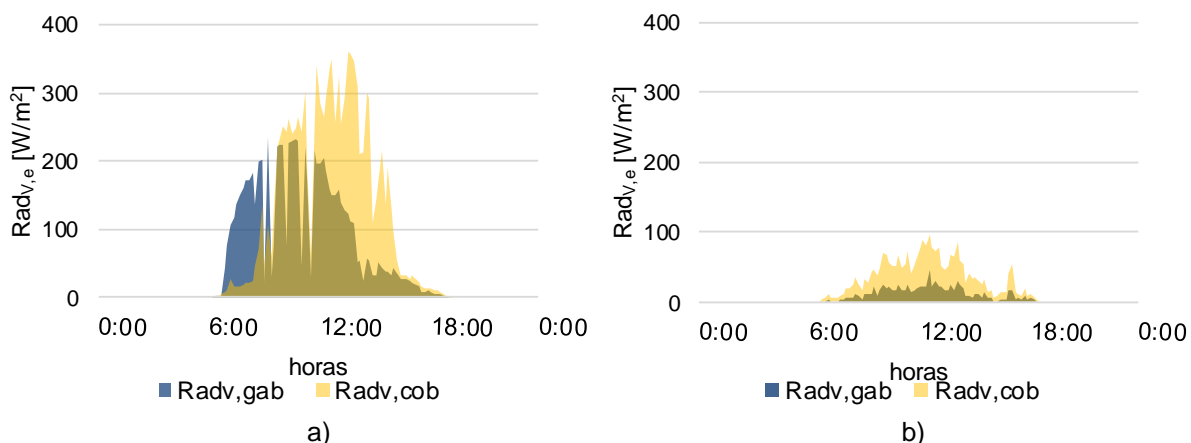


Figura 6.5 - Radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$) medida no gabinete ($Rad_{V,gab}$) e na cobertura ($Rad_{V,cob}$) no DMF (a) e no DmR (b).

Como seria expectável, os valores tanto de $Rad_{V,gab}$ como de $Rad_{V,cob}$ foram no dia DmR bastante inferiores aos do dia DMF (Figura 6.5). É possível também desde logo observar na Figura 6.5a que, para o dia DMF, o aumento de radiação solar ocorre primeiro no piranómetro colocado no exterior do gabinete. Tal deve-se à presença do muro de platibanda na cobertura que produz sombra sobre o piranómetro aí instalado logo que o Sol nasce, começando o piranómetro apenas a receber radiação quando a posição do Sol é superior à altura da platibanda. O mesmo não ocorre para o dia DmR (Figura 6.5b), uma vez que a radiação recebida é na sua totalidade difusa, como se pode observar na Figura 6.6.

Outra diferença bastante notória na Figura 6.5 é o facto de os picos ocorrerem a horas diferentes no gabinete e na cobertura, sendo que o nível máximo de radiação, tanto para o dia DMF como para o dia

DmR, foi registado na cobertura. Fazendo uma comparação entre a radiação global medida no plano vertical ($Rad_{V, cob}$, Figura 6.5) e no plano horizontal ($Rad_{H, e}$ na Figura 6.6), conclui-se que na cobertura $Rad_{V, cob}$ é cerca de 50% de $Rad_{H, e}$, o que pode ser explicado pelo factor de forma de 0.5 entre as duas superfícies. No entanto, o mesmo não ocorre na radiação global vertical exterior medida na fachada dos gabinetes. Efectivamente, a existência de um corpo saliente à fachada provoca um fenómeno de sombreamento nos gabinetes, o que explica o facto de existir uma diferença, tanto na hora como no valor do pico de radiação, entre os gabinetes e a cobertura.

Um outro aspecto importante a referir na Figura 6.5 é o aumento de radiação reflectida (difusa) pela camada de brita da cobertura (Figura 4.12) – com um albedo de cerca de 0.10 calculado como o quociente entre as irradiancias reflectida e incidente com um piranómetro direccionado respectivamente para o pavimento e para o céu – o qual, por sua vez, origina um aumento da radiação global vertical exterior registada na cobertura. Para minorar este efeito, colocou-se um saco de plástico preto sobre a brita numa área adjacente ao sensor. No entanto, devido a condições meteorológicas adversas, o saco não se manteve fixo no mesmo local durante toda a campanha.

Finalmente, na Figura 6.6 são apresentados os valores de radiação exterior horizontal global (Rad_G) e difusa (Rad_d) obtidos na cobertura nos dois dias tipo. No dia DmR é notório que o sensor apenas registou radiação difusa, o que indica ter-se tratado de um dia de céu bastante encoberto e provavelmente chuvoso.

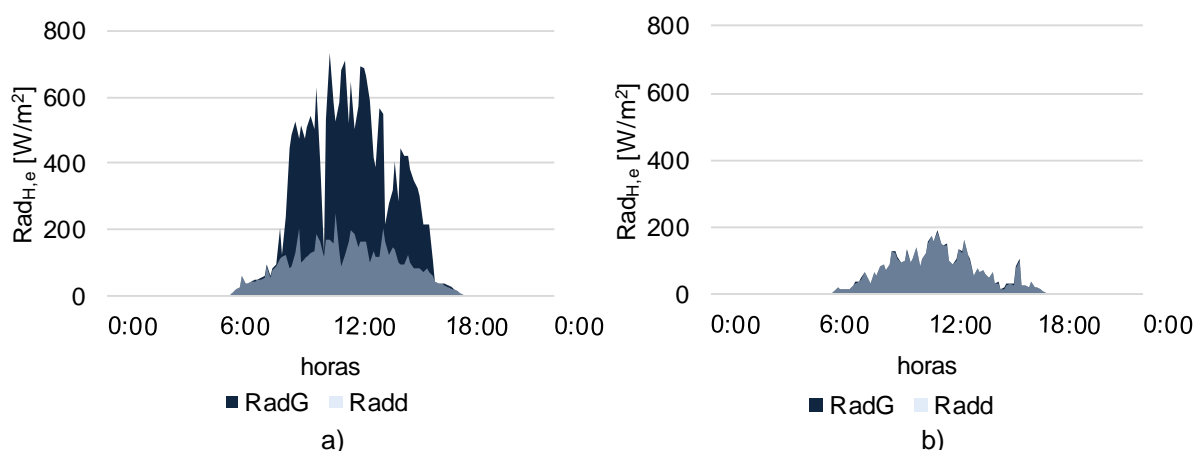


Figura 6.6 – Radiação horizontal exterior global (Rad_G) e difusa (Rad_d) no plano horizontal, no DMF (a) e no DmR (b).

Em relação ao dia DMF, o facto de inicialmente se ter registado apenas radiação difusa foi devido à platibanda na cobertura, mencionada anteriormente. É interessante notar que o aumento da radiação exterior horizontal global (Rad_G) ocorre, sensivelmente, à mesma hora que se verifica um grande incremento de radiação global vertical exterior ($Rad_{V, cob}$), como se pode concluir da análise da Figura 6.5 e da Figura 6.6. Tal significa que só a partir dessa hora (7h30m) o Sol começou a incidir directamente na cobertura, enquanto que na fachada exterior a incidência começou bastante mais cedo, cerca das 6h.

6.1.4 Iluminância

Na Figura 6.7 são apresentados os valores da iluminância vertical ($E_{int,v}$) e horizontal ($E_{int,h}$) no interior de cada gabinete. É também apresentado o valor da iluminância horizontal exterior ($E_{ext,h}$) medido na cobertura e o valor calculado de iluminância vertical exterior ($E_{ext,v\text{ calc}}$). De facto, apesar de não ter sido possível medir directamente a iluminância exterior no plano vertical, utilizou-se a mesma relação entre as irradiâncias horizontais e verticais medidas na cobertura (registadas na Figura 6.5 e na Figura 6.6) para estimar a iluminância vertical exterior ($E_{ext,v\text{ calc}}$) a partir da iluminância horizontal exterior medida na cobertura ($E_{ext,h}$).

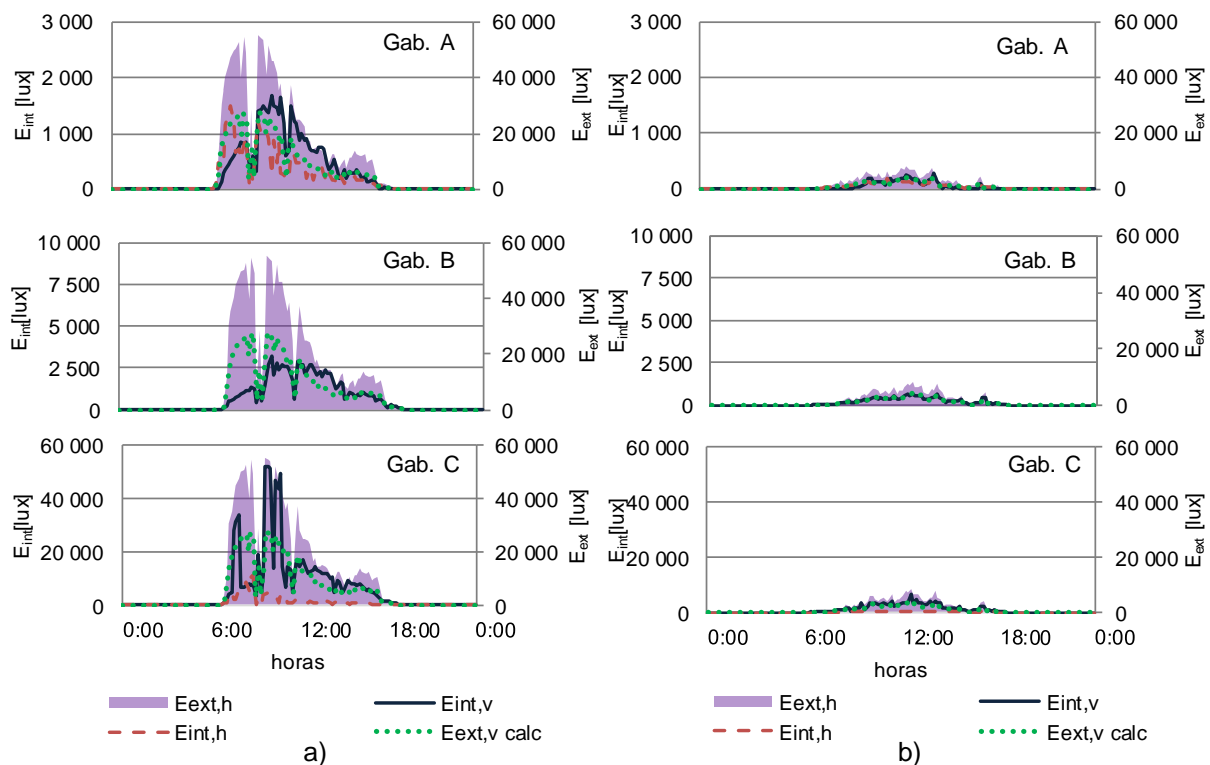


Figura 6.7 - Iluminâncias exteriores horizontal ($E_{ext,h}$) e vertical calculada ($E_{ext,v\text{ calc}}$) e interiores horizontal ($E_{int,h}$) e vertical ($E_{int,v}$), no DMF (a) e no DmR (b).

A Figura 6.7 mostra que existe uma diferença bastante considerável entre a iluminância vertical interior do gabinete de referência (gabinete C) em relação aos restantes gabinetes, o que pode ser explicado pelas características de transmitância visível dos sistemas envidraçados, uma vez que as películas utilizadas induzem a uma quebra do nível de iluminância nos gabinetes onde estão aplicadas. De forma a verificar se este resultado poderia estar associado a algum problema de medição dos luxímetros foram realizados ensaios pontuais e em tempo real, tendo-se obtido valores semelhantes aos registados nos dias-tipo, pelo que a grande diferença registada possivelmente fica a dever-se ao efeito das películas, acrescido eventualmente do efeito resultante de deficientes condições de limpeza (no entanto, este efeito é semelhante em todos os envidraçados).

No gabinete C existe uma grande diferença entre a iluminância vertical interior e a iluminância horizontal interior (Figura 6.7a e b). Essa diferença pode dever-se ao facto de o sensor estar localizado na secretária do ocupante do gabinete e este, por questões de conforto, ter baixado o estore, diminuindo desta forma a luminosidade no plano de trabalho. Os valores médios diários (no período de insolação) de iluminância horizontal interior registados no plano de trabalho foram, respectivamente nos dias DMF e DmR: 405 lx e 69 lx no gabinete A e 2043 lx e 268 lx no gabinete C.

Com base nos valores de transmitância visível calculados no subcapítulo 5.2, de 0.15, 0.26 e 0.8 para os sistemas de envidraçados A, B e C respectivamente, seria expectável que houvesse uma redução de 85%, 74% e 20% entre as iluminâncias exterior e interior no plano vertical. No entanto, os registos foram inferiores ao que seria previsível com base nas propriedades calculadas. A razão pela qual houve uma maior redução na iluminância vertical interior deve-se ao facto de a iluminância exterior vertical ter sido calculada com base na iluminância exterior medida na cobertura e não ao nível dos gabinetes. Como se viu no subcapítulo anterior, existe uma diferença bastante considerável entre a radiação vertical exterior medida na cobertura ($Rad_{V, cob}$) e no exterior dos gabinetes ($Rad_{V, gab}$), pelo que era previsível acontecer o mesmo entre as iluminâncias.

Além disso, o cálculo das propriedades dos envidraçados foi realizado para o centro do vidro, admitindo que a radiação incide normalmente ao envidraçado, e não entrou em conta com o efeito da caixilharia nem com as condições de limpeza reais do vidro. Dado que as condições de cálculo são teóricas, pode admitir-se que os valores de transmitância visível dos envidraçados com película obtidos numericamente possam ter ficado um pouco exagerados em relação à realidade.

A Figura 6.7 mostra também que em ambos os dias tipo (DMF e DmR) a iluminação natural registada no interior do gabinete A foi menor do que nos outros dois gabinetes, em particular em relação ao gabinete de referência, pelo facto de o sistema envidraçado A apresentar uma reflectância exterior superior à dos outros dois sistemas envidraçados (ver as propriedades dos sistemas envidraçados no subcapítulo 5.2). No entanto, verificou-se que esta diminuição não levou necessariamente à utilização de iluminação eléctrica por parte do ocupante, uma vez que não se verificou o aumento repentino do nível de iluminância interior nos registos efetuados, decorrente do acionamento de iluminação eléctrica. Este resultado está de acordo com os resultados de um estudo de caracterização *in situ* das condições de iluminação natural dos edifícios [48], no qual se concluiu que os utilizadores tendem a ser mais resilientes a baixos níveis de iluminação quando se trata de iluminação natural.

6.2 Campanha de Verão

Apesar da recolha de registos ter sido realizada de forma contínua desde o início da campanha experimental, considerou-se para efeitos práticos que a campanha de Verão começou no dia 28 de Maio e terminou no dia 26 de Junho. Os resultados são expressos para os dias com temperatura exterior (T_e) média mais elevada – Dia Mais Quente (DMQ) – e maior radiação global vertical exterior média (calculada apenas no período de insolação) medida na fachada dos gabinetes – Dia de Maior

Radiação (DMR). Uma vez que, para fazer face às temperaturas elevadas desses dias, o sistema de climatização dos gabinetes foi accionado – afectando as temperaturas interiores –, para complementar a análise realizada houve necessidade de procurar um dia igualmente quente e com elevados níveis de radiação solar onde não tivesse sido utilizado o sistema de climatização – Dia Sem Climatização (DSC).

Na Tabela 6.4 são apresentados os valores médios diários de temperatura exterior (T_e), de radiação global vertical exterior medida na fachada dos gabinetes ($Rad_{V,gab}$), de radiação global vertical exterior medida na cobertura ($Rad_{V,cob}$) e de radiação global horizontal exterior ($Rad_{H,e}$) nos dias-tipo durante a campanha de Verão (as médias diárias das radiações foram calculadas apenas para o período de insolação). Houve uma diferença considerável de 2.5°C entre os valores médios de T_e do dia DMQ e do dia DMR, enquanto a diferença entre os valores médios de radiação exterior foi cerca de 15 W/m². Devido a problemas nos sensores não foi possível obter os valores médios de Rad_H nos dias DMQ e DSC e de $Rad_{V,cob}$ no dia DMR.

Tabela 6.4 - Valores médios diários de temperatura exterior (T_e), de radiação global vertical exterior medida na fachada dos gabinetes ($Rad_{V,gab}$) e na cobertura ($Rad_{V,cob}$) e de radiação global horizontal exterior ($Rad_{H,e}$) medida na cobertura, nos DMQ, DMR e DSC.

	T_e [°C]	$Rad_{V,gab}$ [W/m ²]	$Rad_{V,cob}$ [W/m ²]	$Rad_{H,e}$ [W/m ²]
DMQ: 8 de Junho	27.4	67.5	176.9	—
DMR: 26 de Junho	24.9	82.5	—	384.8
DSC: 12 de Junho	24.2	65.3	188.8	—

6.2.1 Temperatura

Nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 é possível observar os valores médios diários das temperaturas ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), temperaturas superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{se}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{V,e}$) na fachada exterior dos gabinetes para os dias DMQ, DMR e DSC, respectivamente. Verifica-se uma vez mais que os valores médios de T_{se} são bastante aproximados nos gabinetes B e C, sendo que é novamente no dia com maior radiação que essas diferenças são mais significativas. Ao contrário do ocorrido durante a campanha de Inverno, o valor máximo de temperatura foi registado no gabinete C e não no gabinete B.

Para o dia DSC (dia sem influência do sistema de climatização – Tabela 6.7), observou-se um aumento de 3°C no valor médio de T_{se} no gabinete A relativamente aos restantes gabinetes, pelo que os valores médios de T_{se} nos dias DMQ e DMR foram influenciados pela utilização do sistema de climatização. Este aumento deve-se às características absortantes do pano exterior (onde foi aplicada a película) e que são superiores no sistema envidraçado A (Tabela 5.1).

Tabela 6.5 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$), no DMQ.

	T_e [°C]	T_{se} [°C]			T_{si} [°C]			T_i [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Média	27.4	28.4	29.2	29.2	26.8	29.2	29.4	25.5	26.2	28.3	67
Máximo	37.2	42.1	40.0	45.4	32.4	42.8	41.3	26.7	31.4	33.4	166
Mínimo	19.5	19.7	20.6	20.7	22.8	23.2	23.9	24.2	22.3	22.5	0

Tabela 6.6 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$), no DMR.

	T_e [°C]	T_{se} [°C]			T_{si} [°C]			T_i [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Média	24.9	26.6	28.3	27.5	25.6	30.9	30.0	24.8	29.9	30.2	83
Máximo	34.4	39.9	40.2	38.1	30.7	41.8	40.5	27.6	34.2	33.9	210
Mínimo	16.8	17.3	18.4	18.3	21.1	22.3	22.8	23.1	26.6	26.7	0

Tabela 6.7 - Valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$), no DSC.

	T_e [°C]	T_{se} [°C]			T_{si} [°C]			T_i [°C]			$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Média	24.2	27.3	27.9	27.2	28.4	31.0	29.9	29.4	30.3	30.2	65
Máximo	33.5	41.5	38.4	38.5	35.7	42.5	40.7	31.7	34.3	34.0	167
Mínimo	17.8	18.7	19.5	19.3	23.1	23.2	23.3	27.3	27.3	27.1	0

Na Figura 6.8 são apresentados os valores das temperaturas ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), das temperaturas superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}), bem como da radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) medida na fachada exterior dos gabinetes para o dia mais quente (DMQ) e para o dia de maior radiação (DMR).

Por se terem tratado de dias com elevadas temperaturas, por questões de conforto os ocupantes ligaram o sistema de ar-condicionado, o que afectou significativamente os valores de T_i , e consequentemente de T_{si} e de T_{se} , pelo que as temperaturas registadas não se deveram única e exclusivamente ao efeito das películas.

Em relação ao gabinete A, é notória a utilização do sistema de ar-condicionado nos dois dias (DMQ e DMR), uma vez que o valor de T_i é praticamente constante ao longo do tempo. O mesmo não acontece nos outros dois gabinetes. No dia DMQ (Figura 6.8a) é perceptível o momento em que os sistemas de

ar-condicionado foram ligados. No gabinete B, esse momento ocorreu cerca das 8h, enquanto que no gabinete C cerca das 12h, tendo-se verificado uma queda acentuada de T_i em ambos os gabinetes a partir desses instantes.

Para o dia DMQ (Figura 6.8a) é também possível observar a influência de T_i sobre T_{si} . Inicialmente os valores de T_{si} registados no gabinete B foram superiores aos do gabinete C, o que está de acordo com os registados obtidos na campanha de Inverno, bem como com as propriedades dos sistemas envidraçados calculadas no subcapítulo 5.2. Mas, pouco tempo após o acionamento do sistema de climatização, é visível uma redução de T_{si} no gabinete B, em paralelo com uma redução de T_i , não tendo havido nesse período qualquer redução da radiação solar incidente que pudesse explicar o comportamento observado. Já no gabinete C, ocorre uma ligeira redução do valor de T_{si} provocada pela diminuição da radiação solar cerca das 11h, e pelas 12h observa-se uma redução mais acentuada de T_{si} provocada pela diminuição de T_i devido à entrada em funcionamento do sistema de climatização. Cerca das 16h verifica-se que o sistema de climatização foi desligado nos gabinetes B e C, ocorrendo uma subida repentina da temperatura ambiente interior (T_i).

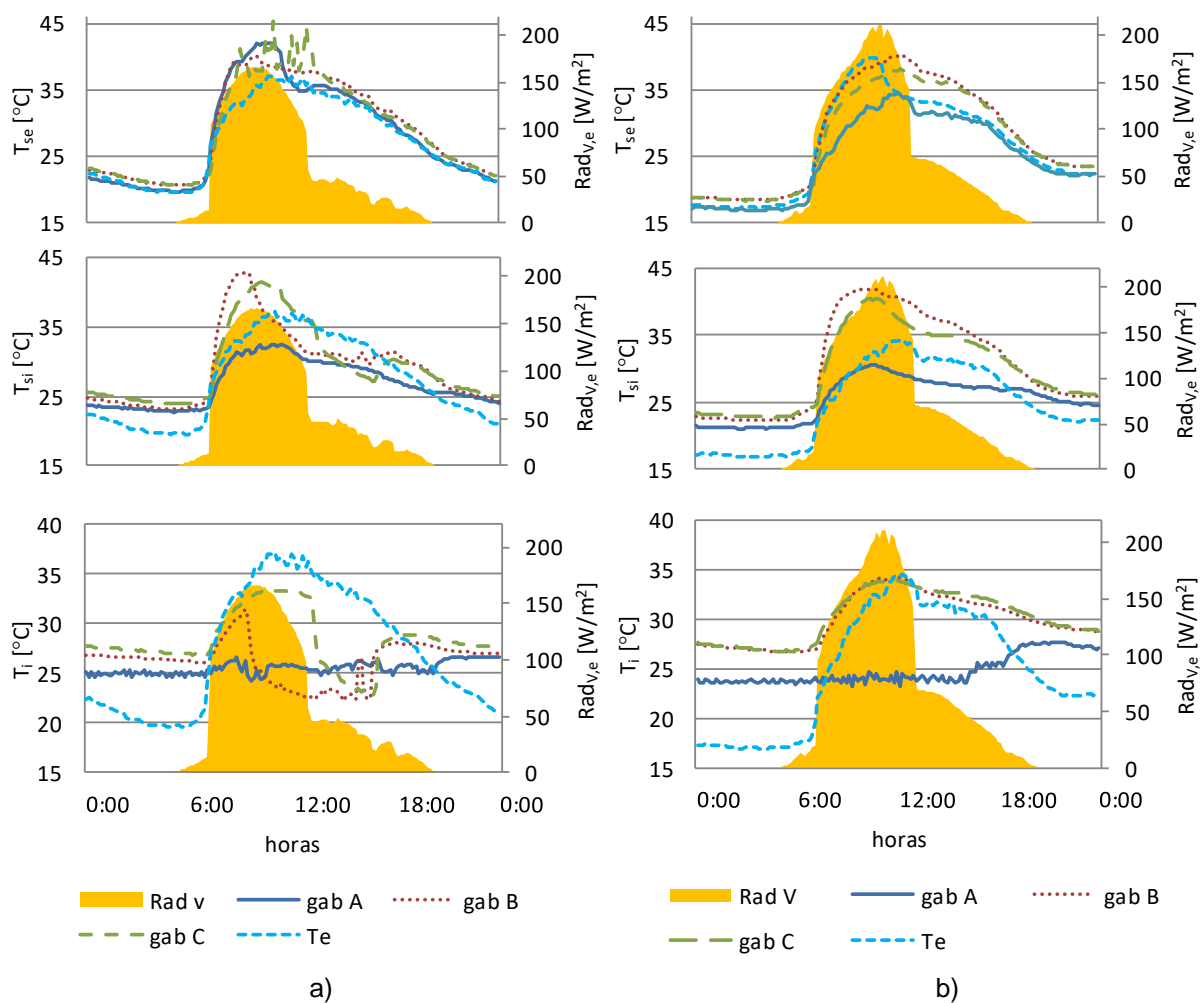


Figura 6.8 - Temperaturas superficial exterior (T_{se}), superficial interior (T_{si}), interior (T_i) e exterior (T_e) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) no DMQ (a) e no DMR (b).

No dia DMR (Figura 6.8b), tanto no gabinete B como no gabinete C verifica-se que não foi ligado o ar-condicionado, podendo ser visível o efeito da película interior nesse dia. De facto, o valor médio de T_i nos gabinetes B e C foi bastante semelhante, tendo sido o valor máximo registado no gabinete B (Tabela 6.6), o que vem demonstrar que a utilização de películas pelo interior, devido às suas características absorvantes, pode levar ao aumento de temperatura na superfície interior do vidro, o que também foi demonstrado em [5].

Na Figura 6.8b é possível observar que T_i toma valores praticamente iguais nos gabinetes B e C, ao passo que T_{si} apresenta no gabinete B (com película pelo interior) valores ligeiramente superiores aos do gabinete C (sem película) devido à maior parcela de radiação absorvida pela superfície interior do sistema envidraçado, por efeito da presença duma película com capacidade absorvante nessa superfície.

Em relação às temperaturas superficiais exteriores (T_{se}) é interessante verificar que, para o dia DMR (Figura 6.8b), os seus valores diminuem significativamente com a redução da radiação solar, não desempenhando a temperatura exterior (que ocorre num instante anterior à redução de radiação) um papel importante nesse efeito. Também se verifica que os valores de T_{se} no gabinete A são inferiores aos valores da temperatura exterior, o que reforça a influência de temperatura interior (T_i) do gabinete A, climatizado, nas temperaturas superficiais do envidraçado.

Uma vez que nos dias DMQ e DMR houve uma clara influência do sistema de climatização nas temperaturas dos gabinetes, que não permitiu analisar o desempenho térmico das películas, optou-se por analisar um dia em que a média da temperatura exterior e os níveis de radiação solar fossem igualmente elevados, mas onde não existisse aquela influência. Na Figura 6.9 são apresentados os valores das temperaturas ambiente exterior (T_e) e interior (T_i), das temperaturas superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}), bem como da radiação global exterior medida no plano vertical (Rad_v) das fachadas dos gabinetes para o dia sem climatização (DSC).

É possível observar na Figura 6.9 que a superfície exterior do sistema envidraçado A é aquela que apresenta os valores de T_{se} mais elevados, o que se justifica pela presença da película A na superfície exterior do envidraçado, aumentando a absorvância do pano de vidro exterior, e que os valores de temperatura no sistema envidraçado do gabinete C são inferiores aos do gabinete B. As diferenças registadas estão de acordo com as absorvâncias calculadas na Tabela 5.1.

Em relação às temperaturas superficiais interiores (T_{si}), os valores de temperatura registados estão de acordo com os registados na campanha de Inverno e com as propriedades dos sistemas envidraçados calculadas no subcapítulo 5.2.

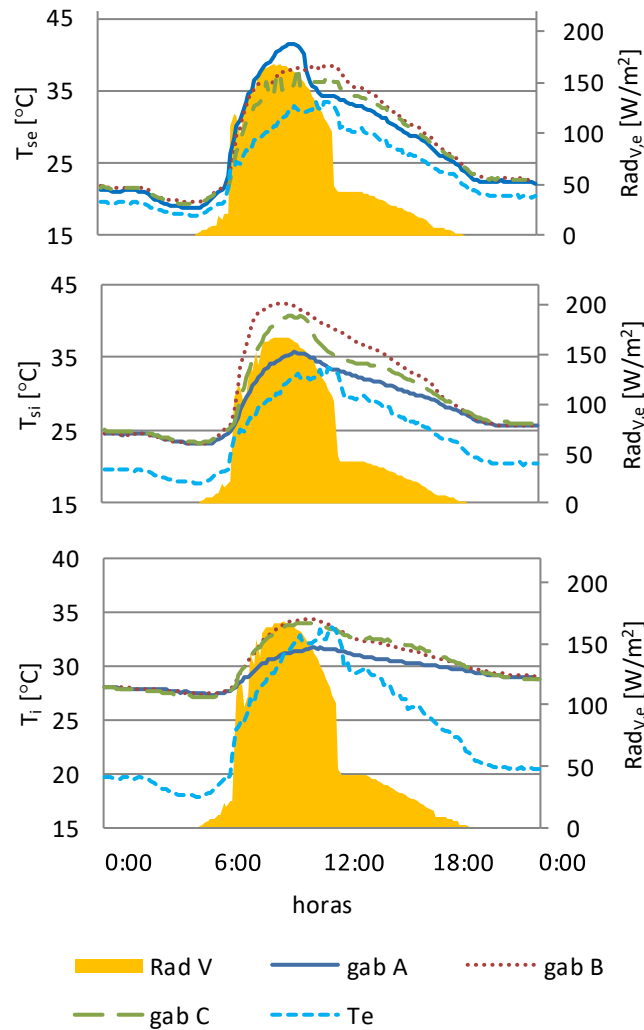


Figura 6.9 - Temperaturas superficial exterior (T_{se}), superficial interior (T_{si}), interior (T_i) e exterior (T_e) e radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) no DSC.

É possível observar na Figura 6.9 que os valores de T_i dos gabinetes B e C são praticamente iguais (as temperaturas médias diárias foram respectivamente 30.3 e 30.2°C e as temperaturas máximas foram 34.3 e 34°C, como se pode observar na Tabela 6.7), o que demonstra que a aplicação da película pelo interior (anteriormente a este estudo) possa não ter sido a melhor solução. Por outro lado, o sistema envidraçado do gabinete A, apresentou melhores propriedades térmicas (calculadas no subcapítulo 5.2) do que as dos sistemas envidraçados B e C, conduz a uma menor temperatura interior, tanto em termos de valor médio como de valor máximo, respectivamente 29.4 e 31.7°C, como se pode observar na Tabela 6.7.

Na Figura 6.10 estão representados os perfis de temperaturas nos sistemas envidraçados dos gabinetes B e C para o dia DMR, durante o qual não se registou a activação do sistema de climatização, tendo a temperatura interior evoluído naturalmente em função das condições climáticas exteriores.

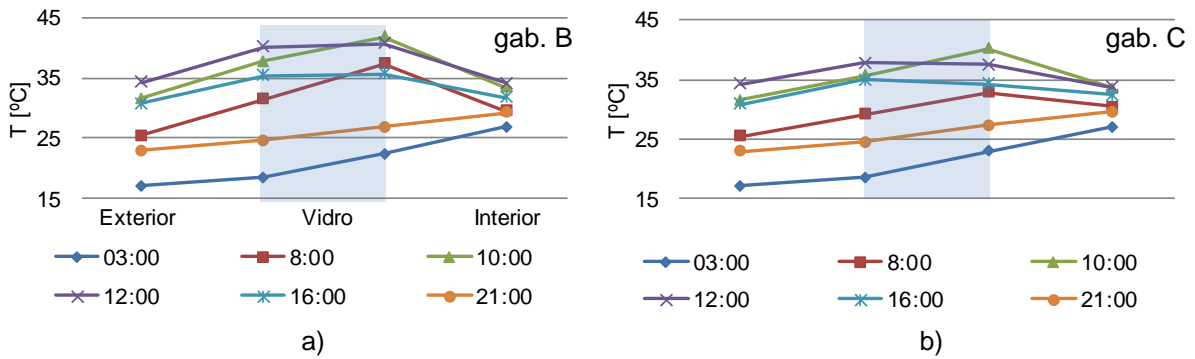


Figura 6.10 - Perfil de temperaturas no DMR nos gabinetes B (a) e C (b).

É possível observar que a temperatura interior (T_i) se encontra acima de 25°C , que é o valor de temperatura de conforto de referência para a estação de Verão indicada na regulamentação [47], chegando inclusive a estar próxima de 35°C . Este valor elevado de T_i obrigaria a um consumo elevado de energia em climatização para manter T_i no valor de conforto.

É novamente notório (como tinha sido na campanha de Inverno) que as temperaturas superficiais interiores (T_{si}) do envidraçado do gabinete B são superiores às registadas no envidraçado do gabinete C, assim como a diferença entre T_{si} e T_i , e que é devido ao facto de a película aplicada pelo interior absorver radiação solar que, por sua vez, é convertida num aumento de temperatura superficial e num consequente aumento das trocas térmicas por convecção e radiação de onda longa com o ar e superfícies interiores do gabinete, respectivamente.

É também interessante observar na Figura 6.10 que, entre as 10h e as 16h, a temperatura interior é praticamente idêntica à temperatura exterior, donde resultaria num fluxo de calor que, teoricamente, deveria estar próximo de zero entre os ambientes interior e exterior. No entanto, os fluxos registados não são nulos, pois dizem respeito às trocas térmicas envolvidas entre a superfície interior do envidraçado e o ar ambiente interior e esta diferença, ao contrário da que envolve T_i e T_e , não é nula.

6.2.2 Fluxos de calor

Na Figura 6.11 estão representados os valores do fluxo de calor obtidos nos três gabinetes bem como a radiação global vertical exterior ($\text{Rad}_{v,e}$) para os dias DMQ e DMR. Convém lembrar que, devido à utilização do sistema de ar-condicionado, as diferenças obtidas não se devem apenas ao efeito das películas de controlo solar. Aliás, como mencionado anteriormente, apenas no dia DMR e para os gabinetes B e C é possível observar o efeito das películas de controlo solar no fluxo de calor, dado que nesse dia não foi ligado o sistema de climatização. À semelhança do que aconteceu na campanha de Verão, também se verificou que o fluxo de calor no gabinete B é superior ao registado no gabinete C no dia DMR. O fluxo no gabinete A é o que apresenta menores valores tanto no dia DMQ como no dia

DMR, mas como mencionado anteriormente este efeito não é só provocado pela película, uma vez que a temperatura interior do gabinete A foi influenciada pelo sistema de climatização em ambos os dias.

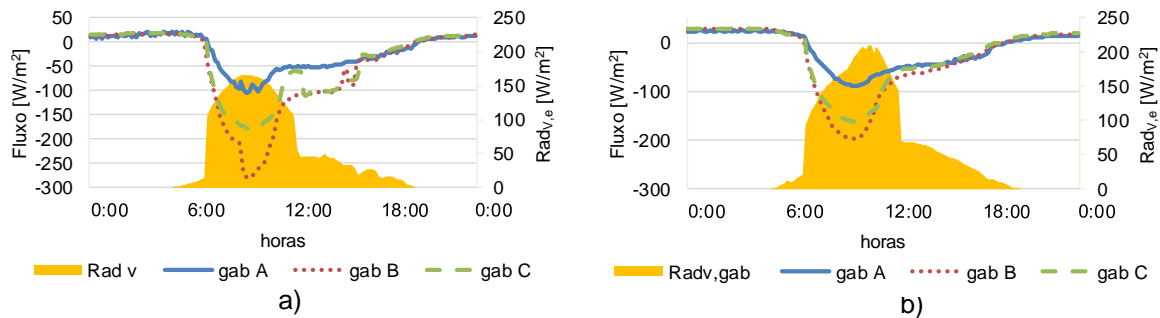


Figura 6.11 - Fluxos de calor no DMQ (a) e no DMR (b).

6.2.3 Radiação Solar

Na Figura 6.12 são apresentados os valores da radiação global vertical interior ($Rad_{v,i}$) medida no interior de cada gabinete, nos dias DMQ e DMR, bem como os valores de radiação global vertical exterior ($Rad_{v,e}$) medida na fachada exterior dos gabinetes.

À semelhança do que ocorreu durante a campanha de Inverno, os valores de radiação obtidos no interior dos gabinetes são semelhantes, o que não seria expectável por observação dos valores de transmitância solar calculados no subcapítulo 5.2, e que são respectivamente 0.10, 0.17 e 0.66 para os sistemas envidraçados A, B e C.

É possível reparar na Figura 6.12, tanto no gabinete B como no gabinete C, a ocorrência de um pico de radiação interior, algo que não acontece no gabinete A. Além disso, é também visível que esse pico ocorre a horas diferentes nos dois gabinetes.

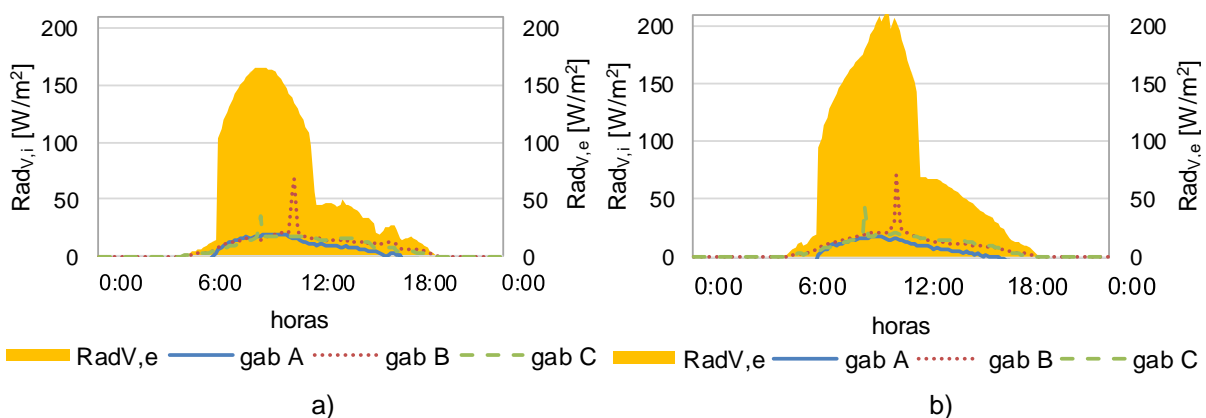


Figura 6.12 - Radiação global vertical interior ($Rad_{v,i}$) e exterior ($Rad_{v,e}$) no DMQ (a) e no DMR (b).

Na Figura 6.13 são apresentados os valores registados de radiação global vertical exterior medida na fachada dos gabinetes ($Rad_{v,gab}$) e na cobertura ($Rad_{v,cob}$), para os dias DMQ (Figura 6.13a) e DMR (Figura 6.13b). Não foi possível obter os valores de radiação na cobertura ($Rad_{v,cob}$) no dia DMR devido ao facto de ter sido objecto de trabalhos de impermeabilização nos últimos dois dias da campanha experimental, o que afectou a posição do piranómetro vertical.

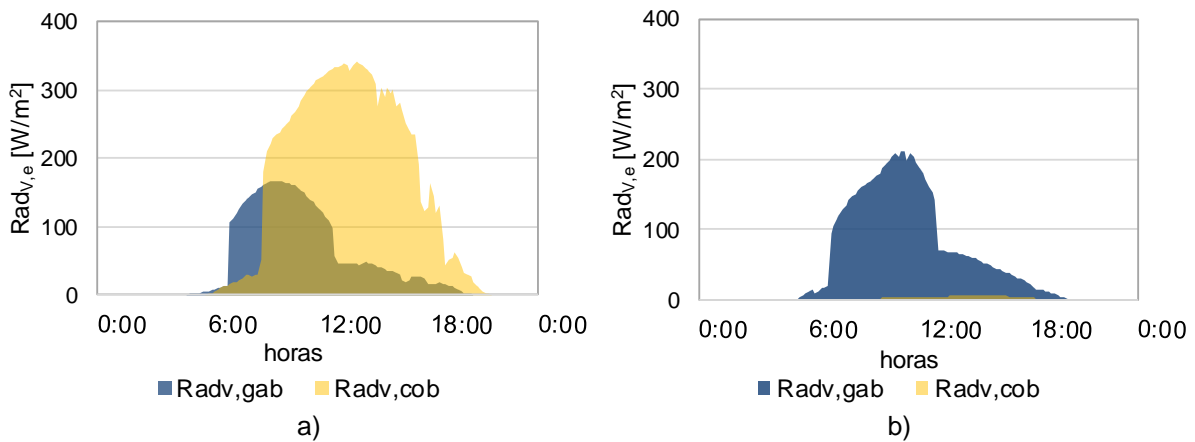


Figura 6.13 - Radiação global vertical exterior medida no gabinete ($Rad_{v,gab}$) e na cobertura ($Rad_{v,cob}$), no DMQ (a) e no DMR (b).

No dia DMQ (Figura 6.13a) é possível verificar novamente uma diferença significativa entre $Rad_{v,gab}$ e $Rad_{v,cob}$. Por um lado, devido à existência da platibanda, os raios solares começam a incidir primeiro na fachada exterior e só aproximadamente a partir das 7h na cobertura. Por outro lado, o pico máximo de radiação nos gabinetes ocorre cerca das 11h, enquanto que na cobertura esse pico ocorre cerca das 12h30, quando a posição do Sol se encontra no ponto mais elevado. Nos gabinetes, devido à existência de um corpo saliente das fachadas (com efeito de pala horizontal), ocorre uma queda acentuada do valor da radiação global a partir de cerca das 12h, ao passo que na cobertura essa queda ocorre a partir de cerca das 17h.

Finalmente, na Figura 6.14 são apresentados os valores de radiação horizontal exterior ($Rad_{H,e}$) global (Rad_e) e difusa (Rad_d) obtidos na cobertura nos dias DMQ (Figura 6.14a) e DMR (Figura 6.14b). Devido às fortes chuvadas que ocorreram no início do mês de Junho de 2016, o sensor BF5 ficou algo danificado, medindo valores irrealistas durante os períodos de menor radiação, como se pode observar na Figura 6.14 a amarelo. Se, para a o período da manhã, é possível eliminar esses valores antes do nascer do sol, o mesmo não acontece quando o Sol se põe.

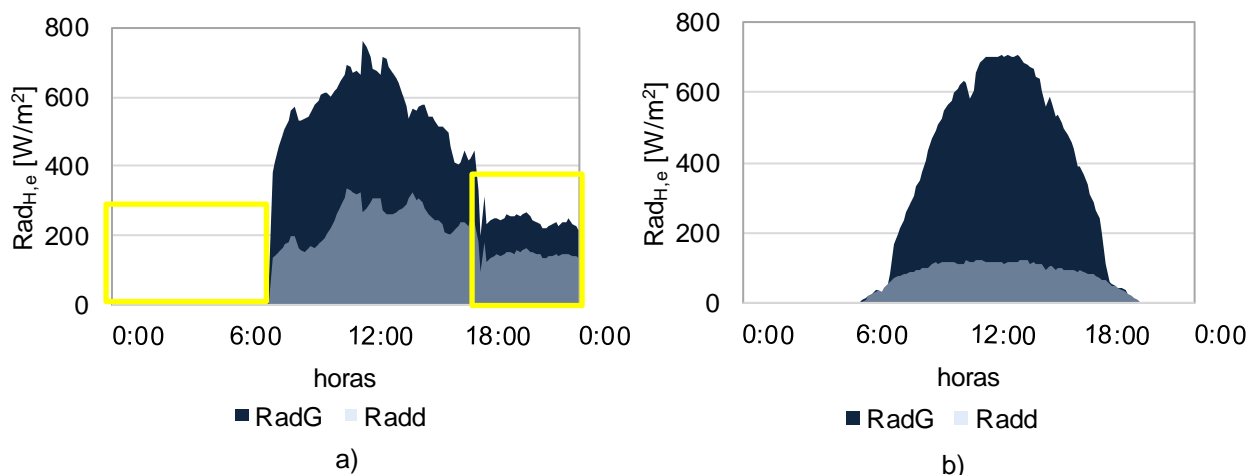


Figura 6.14 - Radiação horizontal exterior global (Rad_G) e difusa (Rad_d) no plano horizontal, no DMQ (a) e no DMR (b).

6.2.4 Iluminância

Na Figura 6.15 são apresentados os valores de iluminância vertical interior ($E_{int,v}$) em cada gabinete e os valores de iluminância horizontal exterior ($E_{ext,h}$). Tal como na campanha de Inverno, a iluminância exterior no plano vertical ($E_{ext,v,calc}$) foi estimada a partir da iluminância horizontal exterior ($E_{ext,h}$) medida na cobertura, multiplicando $E_{ext,h}$ por 0.5, que foi aproximadamente o factor obtido pelo quociente entre as irradiâncias medidas com os piranómetros nessas posições.

Comparando o gráfico da iluminância horizontal exterior ($E_{ext,h}$) da Figura 6.15 com o gráfico de radiação global horizontal exterior (Rad_G) da Figura 6.14, verifica-se que o seu andamento não é idêntico. De facto, existe um aumento bastante significativo cerca das 6h30, tanto de radiação como de iluminância. No entanto, existe também uma diminuição brusca da iluminância horizontal cerca das 12h30 nos dois dias (DMQ e DMR) e que não é acompanhado por uma redução correspondente de radiação horizontal.

Em relação às iluminâncias interiores verticais ($E_{int,v}$), a ordem crescente de resultados do gabinete A para o C está de acordo os registos obtidos na campanha de Inverno. Os valores médios de iluminância foram, respectivamente, de 525 lx, 1324 lx e 6212 lx para os gabinetes A, B e C, no dia DMQ (Figura 6.15a) e de 514 lx, 1351 lx e 6575 lx, na mesma ordem, no dia DMR (Figura 6.15b).

Uma vez mais se confirma que o gabinete C apresenta problemas de desconforto visual, em particular no período da manhã, durante o qual o Sol incide directamente no interior do gabinete, sendo notória a ocorrência de um pico de iluminância, sensivelmente à mesma hora (10h) nos dois dias, e coincidente com os picos de radiação vertical interior da Figura 6.12. No entanto, para o gabinete B não foram registados quaisquer picos de iluminância, ao contrário da radiação interior vertical, que registou picos como a Figura 6.12 evidencia.

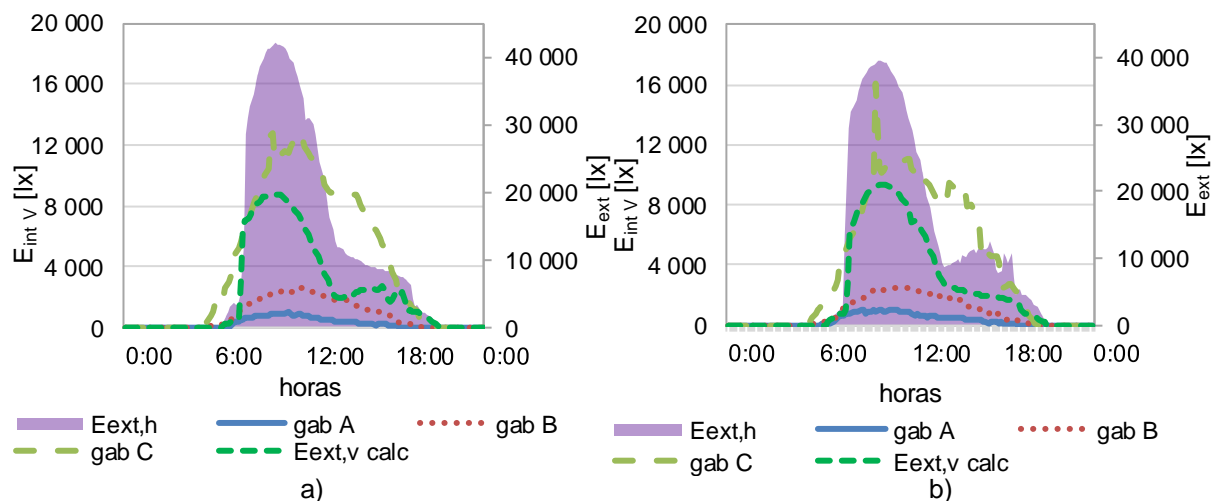


Figura 6.15 - Iluminâncias interiores verticais ($E_{int,v}$) e iluminância exterior horizontal ($E_{ext,h}$) e iluminância exterior vertical calculada ($E_{ext,v,calc}$), no DMQ (a) e no DMR (b).

Salienta-se que os registos de iluminância interior nos gabinetes A e B são inferiores ao que seria de esperar face às propriedades calculadas no subcapítulo 5.2, nomeadamente a transmitância visível. A razão prende-se com o facto de a iluminância vertical exterior ($E_{ext,v,calc}$) ter sido calculada com base nos valores de iluminância exterior horizontal ($E_{ext,h}$) obtidos ao nível da cobertura. Como se observou na Figura 6.12a, existe uma diferença considerável entre a radiação vertical exterior medida ao nível da cobertura ($Rad_{v,cob}$) e a radiação vertical exterior medida ao nível da fachada exterior dos gabinetes ($Rad_{v,gab}$), pelo que a iluminância vertical exterior calculada ($E_{ext,v,calc}$) não corresponde à iluminância vertical efectiva na fachada exterior dos gabinetes, daí a razão dos valores de iluminância vertical interior nos gabinetes serem inferiores ao inicialmente previsto.

6.3 Mapas de iluminâncias no plano de trabalho

Para aprofundar o conhecimento sobre a distribuição da iluminação natural interior no plano de trabalho ($E_{int,v}$) realizou-se um levantamento num dia de céu limpo dos valores de iluminância a uma cota de 0.7m (cota do plano de trabalho) sobre uma grelha de pontos – Figura 6.16 – idêntica em todos os gabinetes em três horários distintos: 9h, 12h e 16h. Idealmente, as medições com os luxímetros LICOR 210R deveriam ter sido efectuadas exactamente ao mesmo tempo nos três gabinetes, mas tal não foi possível. Além dos pontos representados na Figura 6.16, foram ainda registados os valores de iluminância nos pontos intermédios do eixo central (a tracejado na Figura 6.16), por forma a detalhar melhor a variação das iluminâncias ao longo desse eixo.

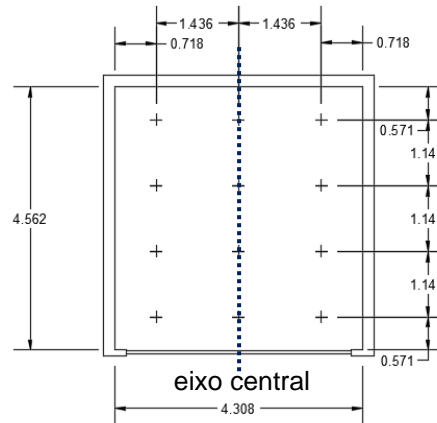


Figura 6.16 - Mapa de pontos de medição.

A partir do conhecimento dos valores das iluminâncias nos gabinetes e recorrendo ao programa *Surfer* 7 [49], foi possível efectuar o mapeamento das iluminâncias no interior dos três gabinetes para esses três horários: 9h, 12h e 16h.

6.3.1 Mapeamento às 9 horas

Na Figura 6.17 estão representados os valores de iluminância medidos às 9h no eixo central dos gabinetes e na Figura 6.18 estão representados os mapas de iluminância no plano de trabalho, bem como a localização dos postos de trabalho (secretárias) no interior dos gabinetes, para essa mesma hora. Como já referido anteriormente, a radiação solar incide directamente nos três gabinetes durante a maior parte da manhã, sendo este facto bem visível nos três mapas. O gabinete C, pelo facto de o sistema envidraçado possuir a transmitância visível mais alta, é o que apresenta maiores iluminâncias no plano de trabalho, tal como já se tinha observado nas Figuras 6.7 e 6.15 (campanha de Inverno e Verão, respectivamente). O gabinete A, por seu turno, por possuir o menor valor de transmitância visível, é o que apresenta os menores valores de iluminância horizontal.

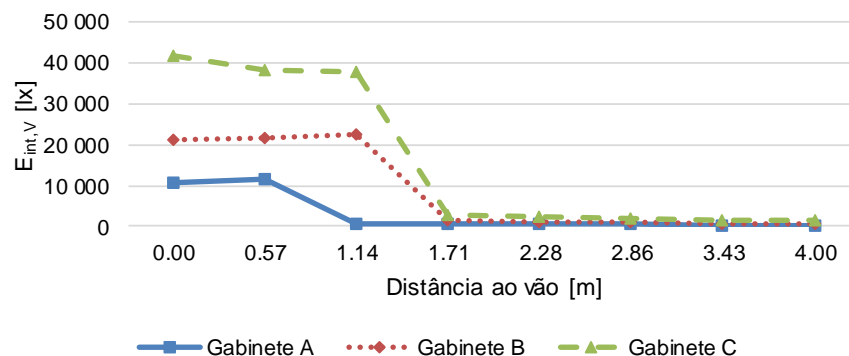


Figura 6.17 - Perfil vertical das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,V}$) às 9h.

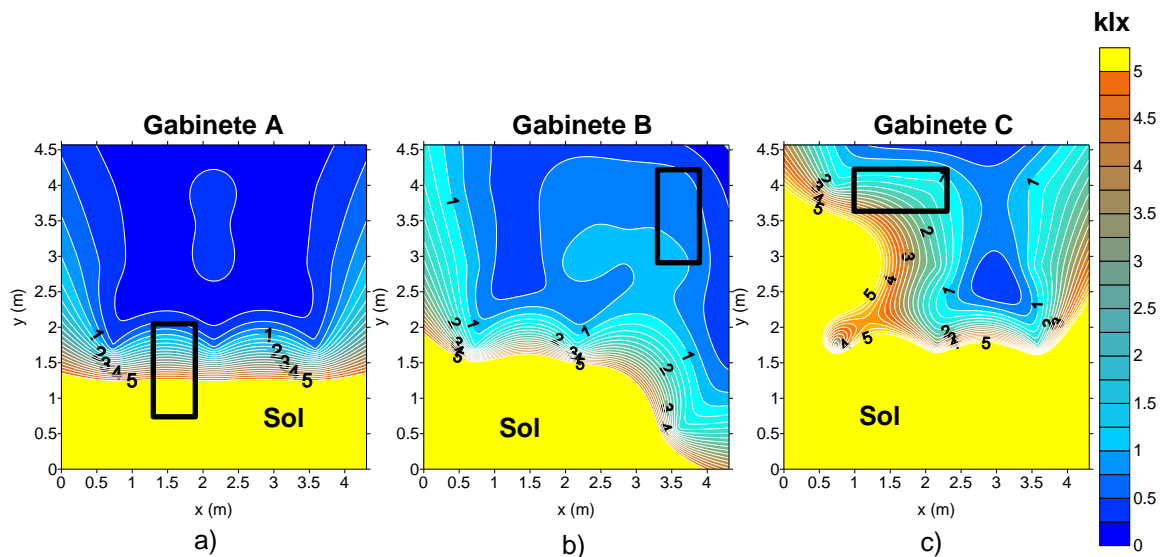


Figura 6.18 - Mapa das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) obtidas às 9h no gabinete A (a), gabinete B (b) e gabinete C (c), com a localização dos postos de trabalho.

Com base na análise da Figura 6.18 conclui-se que a radiação solar incide directamente em todos os gabinetes. No entanto, o gabinete C de referência é o que apresenta valores mais elevados de iluminância no plano horizontal, bem como uma maior área irradiada directamente. Pelo facto de o sistema envidraçado A ter uma transmitância visível menor que a do envidraçado B, o gabinete A apresenta valores mais baixos de iluminância, como já tinha, aliás, sido observado nas campanhas de Inverno (Figura 6.7) e de Verão (Figura 6.15).

6.3.2 Mapeamento às 12 horas

Na Figura 6.19 estão representados os valores de iluminância no plano de trabalho no eixo central dos gabinetes registados às 12h. Destaca-se o valor bastante elevado de iluminância junto ao envidraçado do gabinete A, quando comparado com os valores nos restantes gabinetes. Esta diferença resulta do facto de as medições não terem sido realizadas exactamente à mesma hora nos três gabinetes, pelo que quando se efectuou a medição das iluminâncias interiores no gabinete A o Sol ainda aí incidia directamente, enquanto que nos outros gabinetes isso já não se verificou.

Como se pode observar na Figura 6.20, o gabinete A apresenta os menores valores de iluminância, não alcançando 1000 lx junto do envidraçado e abaixo de 250 lx na ponta oposta. O gabinete B, por sua vez, apresenta iluminâncias ligeiramente superiores, sendo de 1500 lx junto ao envidraçado e inferior a 500 lx na ponta oposta. Por outro lado, o gabinete C, por não apresentar qualquer película aplicada, apresenta valores de iluminância bastante superiores, em relação aos restantes gabinetes, atingindo o máximo de 3250 lx e o mínimo de 1250 lx.

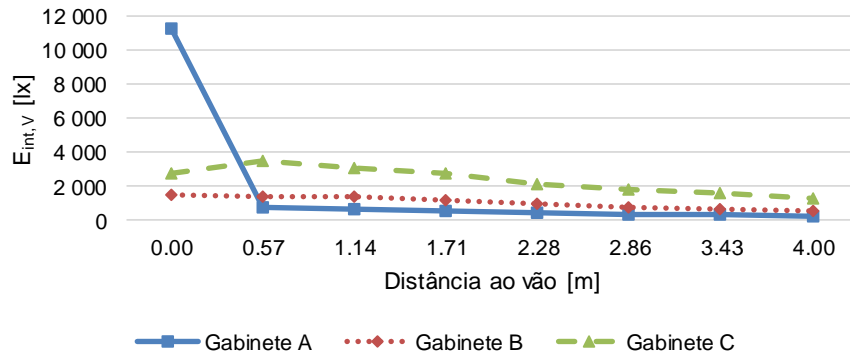


Figura 6.19 - Perfil vertical das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) às 12h.

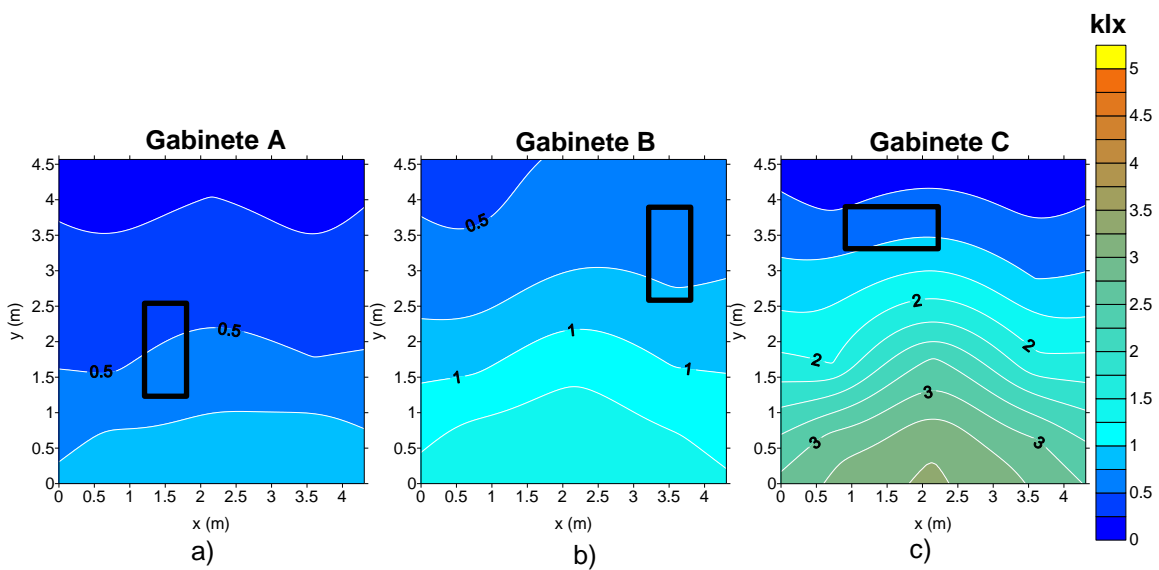


Figura 6.20 - Mapa das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) obtidas às 12h no gabinete A (a), gabinete B (b) e gabinete C (c), com a localização dos postos de trabalho.

6.3.3 Mapeamento às 16 horas

Na Figura 6.21 apresentam-se os perfis verticais de iluminância no plano de horizontal ao longo do eixo médio dos gabinetes e na Figura 6.22 os mapas de iluminância no plano de trabalho referentes às 16 horas. Observa-se que para o gabinete C os valores registados foram em todos os pontos superiores a 1000 lx, enquanto que no gabinete B os valores de iluminância no plano de trabalho situaram-se entre 500 lx e 1000 lx. O gabinete A foi, uma vez mais, aquele que apresentou menores valores de iluminância, não tendo sido registados valores acima de 500 lx.

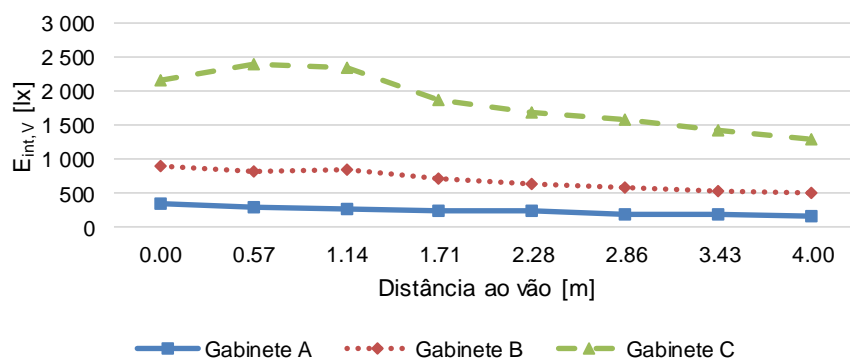


Figura 6.21 - Perfil vertical das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) às 16h.

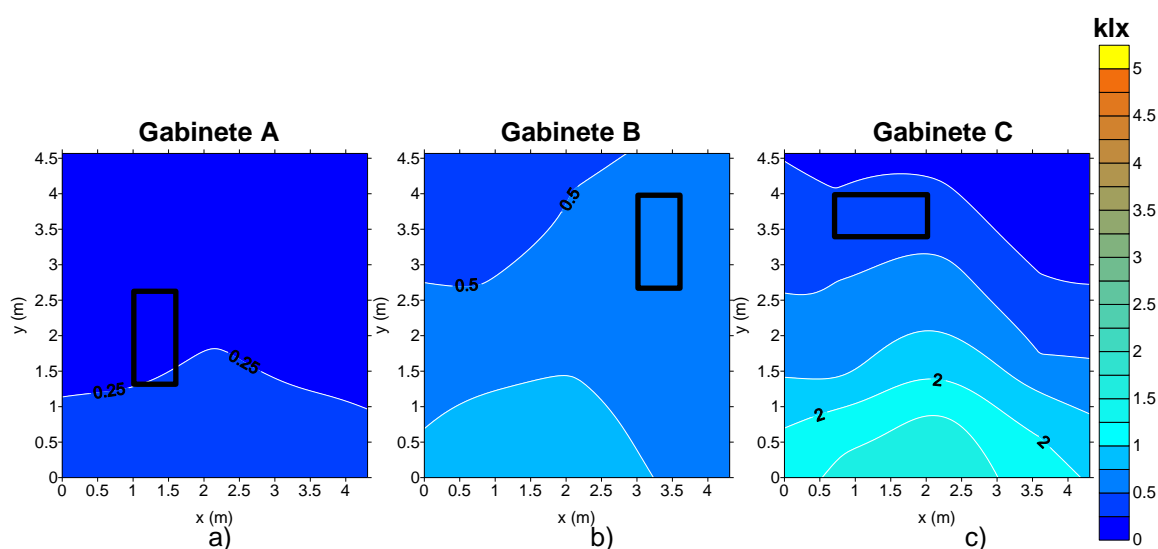


Figura 6.22 - Mapa das iluminâncias interiores no plano de trabalho ($E_{int,v}$) obtidas às 16h no gabinete A (a), gabinete B (b) e gabinete C (c), com a localização dos postos de trabalho.

Através da análise dos mapas de iluminância é possível concluir que o gabinete C pode apresentar problemas de desconforto visual, que seguramente foi uma das razões que determinou à aplicação de uma película nos sistemas envidraçados dos gabinetes anteriormente a este estudo. Apesar do gabinete B, com película interior, apresentar níveis de iluminância bastante razoáveis, pelo facto de evidenciar um comportamento térmico pouco satisfatório, sobretudo no Verão, a aplicação de película pelo interior, com uma transmitância visível intermédia, pode não ser a melhor solução face à aplicação de uma película com características mais reflectivas pelo exterior (gabinete A).

Por outro lado, o gabinete A é o que apresenta os níveis mais baixos de iluminância no plano horizontal, o que se pode traduzir em níveis insatisfatórios de iluminação natural em dias de céu encoberto e consequentemente em maiores consumos em iluminação eléctrica. Ainda assim, verificou-se, através de visitas frequentes para recolha de dados nos três gabinetes, que a iluminação artificial raramente foi utilizada, mesmo em situações de níveis baixos de iluminação natural.

7 Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusões

O sector da construção é responsável por uma grande fatia da energia consumida a nível mundial. Grande parte dessa energia é destinada a manter os níveis de conforto térmico no interior dos edifícios, tanto na estação fria como na estação quente.

Como tal, é necessário adoptar uma política de reabilitação energética, nomeadamente ao nível da envolvente, de maneira a contrariar os elevados consumos da maior parte dos edifícios actuais. Por outro lado, tem-se optado por construir edifícios, em particular edifícios comerciais, com grandes áreas de envidraçados nas fachadas exteriores, uma vez que, para além do aspecto estético, permitem a entrada de luz natural, diminuindo desta forma os consumos energéticos em iluminação eléctrica. No entanto, as grandes áreas envidraçadas vão contribuir para um aumento de ganhos solares, o que no Inverno poderá trazer um efeito benéfico de diminuição das necessidades energéticas para aquecimento, mas no Verão irá agravar as condições de sobreaquecimento e o consumo energético para arrefecimento. Neste contexto tem-se verificado uma aposta na inovação da tecnologia dos envidraçados com vista ao aumento da sua eficiência energética.

Um destes exemplos consiste na aplicação de películas de controlo solar em envidraçados, em particular em operações de reabilitação de edifícios existentes, que permitem a alteração de algumas das suas propriedades, nomeadamente o factor solar e a transmitância visível.

Para estudar o desempenho térmico e óptico de películas de controlo solar, no presente trabalho foi realizada uma campanha experimental em três gabinetes idênticos, em que num deles não foi aplicada qualquer película, servindo assim de referência (gabinete C). Nos restantes gabinetes, num foi aplicada uma película pelo exterior (gabinete A) e no outro uma película pelo interior (gabinete B), tendo-se obtido desta forma um quadro de análise que permitiu identificar os efeitos das películas e superfícies de aplicação. Os três gabinetes têm áreas, ocupações e equipamentos idênticos e a fachada exterior está orientada a Sudeste e é totalmente envidraçada, sendo constituída por vidro duplo incolor (6+12+4mm) com ar e caixilharia em alumínio.

A campanha experimental consistiu na medição de várias grandezas de maneira a avaliar o desempenho térmico de cada gabinete. Foram realizadas duas campanhas, uma no período de Inverno e outra no período de Verão, tendo sido seleccionados dois dias-tipo para a campanha de Inverno – Dia Mais Frio (DMF) e Dia de menor Radiação (DmR) – e três dias-tipo para a campanha de Verão – Dia Mais Quente (DMQ), Dia de Maior Radiação (DMR) e Dia Sem Climatização (DSC) –, tendo sido feita, posteriormente, uma análise aos resultados obtidos.

Paralelamente, foram calculadas numericamente as propriedades térmicas e ópticas para cada sistema envidraçado com e sem películas, através de dois programas específicos, o *Optic* e o *Window*. Desta

forma, foi possível obter dados teóricos do comportamento térmico e óptico dos sistemas envidraçados que puderam ser confrontados com os resultados da campanha experimental.

Concluiu-se que as películas aplicadas tanto no exterior como no interior reduziram de forma significativa o factor solar, a transmitância visível e a transmitância à radiação UV em relação ao sistema de referência, sendo que a redução foi maior no gabinete A, uma vez que a película aplicada nesse envidraçado apresenta valores de reflectância solar superiores e valores de transmitância solar e factor solar inferiores, em relação à película aplicada no sistema envidraçado do gabinete B. Esta redução tem como consequência a diminuição dos ganhos solares, bem como da temperatura interior, tanto no Inverno como no Verão, e do nível de iluminação natural no interior dos dois gabinetes com película.

O gabinete A, por um lado, foi o que apresentou o melhor desempenho térmico, o que está de acordo com o valor mais reduzido do factor solar do seu envidraçado face aos envidraçados dos outros dois gabinetes. Por outro lado, o gabinete C (sem qualquer película), tomado como referência, foi o que apresentou o mais fraco desempenho térmico, tendo o gabinete B apresentado para a campanha de Inverno registos de temperatura interior inferiores aos do gabinete de referência e, para a campanha de Verão, registos de temperatura interior semelhantes aos do gabinete de referência.

Particularizando para a campanha de Inverno, onde não foi activado o sistema de climatização, verificou-se que as temperaturas interiores médias para o dia DMF (Dia Mais Frio) foram respectivamente de 21.0°C, 20.8°C e 22.5°C para os gabinetes A, B e C. De facto, as grandes diferenças registadas foram nos valores máximos de temperatura interior: 23.3°C, 25.5°C e 30.2°C, na mesma ordem.

Para a campanha de Verão, no dia DMR (Dia de Maior Radiação) e para os gabinetes B e C, onde não foram utilizados os respectivos sistemas de climatização, pôde-se concluir que o desempenho térmico foi semelhante. As temperaturas médias interiores foram de 29.9°C e 30.2°C, respectivamente, enquanto que os valores máximos de temperatura foram de 34.2°C e 33.9°C. Verifica-se desta forma que a aplicação de películas pelo interior não significa necessariamente um melhor desempenho térmico, uma vez que a absorção de radiação pela película provoca um aumento da temperatura da superfície interior do envidraçado, efeito este que depois se estende à temperatura interior do espaço.

No dia DSC (Dia Sem Climatização) na estação de Verão, onde não foram utilizados os sistemas de climatização, concluiu-se que o gabinete B (película interior) apresenta temperaturas interiores médias semelhantes às do gabinete C (sem película), que foram respectivamente de 30.3°C e 30.2°C. Concluiu-se no presente trabalho que a solução de películas pelo interior pode não ser a melhor solução, uma vez que para o caso estudado o desempenho térmico do sistema envidraçado com película interior foi praticamente idêntico ao envidraçado sem película durante a campanha de Verão. Para o gabinete A (película exterior) a temperatura interior média foi ligeiramente inferior, 29.4°C. No entanto, esta diferença não pode ser imputada apenas à superfície de aplicação da película (pelo

interior ou pelo exterior), uma vez que foram utilizadas duas películas com propriedades diferentes, sendo que a película do gabinete A apresenta valores de reflectância solar exterior superiores e de transmitância solar e factor solar inferiores aos da película do gabinete B.

Através da análise das temperaturas interiores é possível concluir que o desempenho térmico de ambas as películas foi superior durante a campanha de Inverno, devido ao facto de a temperatura média diária do ar exterior registada neste período ter sido bastante inferior à registada durante a campanha de Verão. As películas apenas vão alterar as propriedades solares-ópticas do envidraçado como, por exemplo, a transmitância solar, a reflectância solar e o factor solar, mantendo inalterado o valor do coeficiente de transmissão térmico (U), daí que o desempenho térmico durante a campanha de Verão (onde as temperaturas médias diárias do ar exterior foram bastante elevadas) tenha sido inferior ao registado durante a campanha de Inverno.

No que toca às iluminâncias verticais interiores verificou-se que, de uma maneira geral, apresentam níveis inferiores ao que seria de esperar, tendo por base os valores de transmitância visível calculados numericamente. A razão prende-se com o facto de a iluminância vertical exterior ter sido calculada com base nos registos obtidos na cobertura e, como se viu para a radiação, ter existido uma diferença bastante considerável entre os valores de radiação vertical exterior medidos na cobertura e os medidos nos envidraçados dos gabinetes.

Relativamente à iluminância interior no plano de trabalho, foi também realizada uma campanha experimental num dia de céu limpo próximo do solstício de Verão, tendo-se efectuado um mapeamento das iluminâncias horizontais à altura do plano de trabalho (0.8 m). Verificou-se que nos gabinetes com película as iluminâncias interiores foram inferiores às do gabinete sem película, tendo os menores valores sido registados no gabinete A. Estes resultados eram expectáveis na medida em que a transmitância visível calculada numericamente com recurso aos programas *Optic* e *Window* é menor no envidraçado do gabinete A (0.15) e maior no do gabinete C (0.8), apresentando o envidraçado do gabinete B um valor intermédio (0.24).

Concluiu-se também que os valores de iluminância médios diários no plano de trabalho, em particular no Inverno, ficam bastante abaixo de 500 lx [50] – considerado como um valor mínimo recomendável para a iluminação eléctrica em escritórios com actividades relacionada com o uso de ecrãs –, tendo sido para o Dia de menor Radiação (DmR), respectivamente 69 lx e 268 lx para os gabinetes A e C (não tendo sido possível obter as iluminâncias no gabinete B). No entanto, veio a verificar-se que a iluminação eléctrica raramente foi utilizada pelos ocupantes. Este facto pode explicar-se pela maior tolerância das pessoas a baixos níveis de iluminação quando se trata de luz natural, pelo que neste caso a utilização de películas, em particular as mais penalizadoras ao nível da transmitância visível, não se traduza, necessariamente, num aumento considerável do consumo de energia eléctrica para iluminação.

Pelos resultados obtidos, pode indirectamente concluir-se que a aplicação de películas de controlo solar pode ter um grande impacto na redução do consumo de energia, em particular se forem aplicadas em grandes edifícios não residenciais e com grandes áreas de envidraçados, como o caso estudado, em que as necessidades de climatização provocadas por ganhos solares excessivos, em particular no Verão, sejam prioritárias face às necessidades energéticas para iluminação eléctrica.

7.2 Desenvolvimentos futuros

No seguimento do presente trabalho, e para um aprofundamento do conhecimento sobre o desempenho energético de películas de controlo solar, propõem-se como desenvolvimentos futuros:

- analisar os consumos energéticos associados à utilização de diferentes películas em edifícios com grandes áreas envidraçadas, utilizando, para isso, medições *in situ*, para diferentes orientações das fachadas, climas, elementos envidraçados, e para diferentes utilizações dos edifícios.
- por via de simulação numérica, estimar o comportamento térmico, energético e luminoso dos gabinetes do caso de estudo, com os sistemas envidraçados respectivos, calibrando e validando o modelo com os resultados da campanha experimental efectuada no presente trabalho;
- realizar uma análise económica comparativa entre a solução de envidraçado com aplicação de películas, tanto pelo exterior como pelo interior, e a solução de utilização de envidraçados com propriedades térmicas e ópticas semelhantes ao conjunto do vidro e película;
- realizar campanhas experimentais semelhantes à do presente estudo, mas onde seja comparado o desempenho térmico, óptico e energético de películas de controlo solar com outros tipos de soluções, como por exemplo a aplicação de estores interiores ou exteriores
- estudar as diferentes combinações possíveis de envidraçados com diferentes películas, de maneira a determinar quais as combinações mais vantajosas do ponto de vista energético e as que conduzem a uma mais rápida deterioração das películas ou à quebra do envidraçado.

Referências

- [1] DGEG, “Energia em Portugal”, Lisboa, 2014.
- [2] IPCC, “Climate Change 2014 Synthesis Report”, Contrib. Work. Groups I, II III to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang., pp. 1–151, 2014.
- [3] UNEP SBCI, “Buildings and Climate Change - Summary for Decision-Makers”, 2013.
- [4] EU, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)”, Off. J. Eur. Union, pp. 13–35, 2010.
- [5] R. Yin, P. Xu, P. Shen, “Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai”, *Energy Build.*, vol. 45, pp. 132–140, 2012.
- [6] J. Bernardo, “Estratégia para a Eficiência Energética nos Edifícios Públicos”, Workshop: RePublic ZEB, Lisboa, 2015.
- [7] DGGE, “Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais”, DGGE / IP, Lisboa, 2004.
- [8] “Proporção Adequada das Áreas Envidraçadas”, *Proporção Adequada das Áreas Envidraçadas*, 2012. [Online]. Disponível em WWW: <<http://construcaosustentavel.pt/2013/proporcao-adequada-das-areas-envidracadas/>> [Consultado em: 11-8-2016].
- [9] INE, DGEG, “Inquérito ao consumo de energia doméstico 2010”, Lisboa, 2010.
- [10] V. Rocheta, F. Farinha, “Práticas De Projecto E Construtivas Para a Construção Sustentável”, *Congr. Construção*, p. 11, 2007.
- [11] A. P. Duarte, “Construção Sustentável: Oportunidades e Boas Práticas”, *Semana Europeia da Energia Sustentável*, Celorico da Beira, pp 1-43, 11 a 13 de Abril de 2011.
- [12] ISR – Dep. de Eng. Electrotécnica e de Computadores Universidade de Coimbra, *Manual de boas práticas de eficiência energética*, Coimbra, 2005.
- [13] M. G. Gomes, A. J. Santos, A. M. Rodrigues, “Solar and visible optical properties of glazing systems with venetian blinds: Numerical, experimental and blind control study”, *Build. Environ.*, vol. 71, pp. 47–59, 2014.
- [14] D. H. W. Li, J. C. Lam, S. L. Wong, “Daylighting and its implications to overall thermal transfer value (OTTV) determinations”, *Energy*, vol. 27, no. 11, pp. 991–1008, 2002.

- [15] T. Frank, "Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland", *Energy Build.*, vol. 37, pp. 1175–1185, 2005.
- [16] L. Guan, "Implication of global warming on air-conditioned office buildings in Australia", *Build. Res. Inf.*, vol. 37, no. 1, pp. 43–54, 2009.
- [17] P. de Wilde W. Tian, "Management of thermal performance risks in buildings subject to climate change", *Build. Environ.*, vol. 55, pp. 167–177, 2012.
- [18] B. I. Ouedraogo, G. J. Levermore, J. B. Parkinson, "Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso", *Build. Environ.*, vol. 49, no. 1, pp. 270–282, 2012.
- [19] R. Aguiar, M. Oliveira, H. Gonçalves, "Climate change impacts on the thermal performance of Portuguese buildings. Results of the SIAM study", *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 223–231, 2002.
- [20] A. J. Marsh, "Solar Radiation", 2011. [Online]. Disponível em WWW: <<http://naturalfrequency.com/wiki/solar-radiation>> [Consultado em: 01-9-2016].
- [21] A. Belusso, G. P. Cainelli, "Análise do espectro da radiação solar e sua importância no correcto dimensionamento de tecnologias para conversão fotovoltaica de energia", 15º Congresso Nacional de Iniciação Científica, Universidade de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 27-28 de Novembro de 2015.
- [22] R. Russel, "Ultraviolet Radiation (UV)" 2010. [Online]. Disponível em WWW: <http://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_ultraviolet.html> [Consultado em: 23-9-2016].
- [23] S. Janjai, A. Webb, G. Seckmeyer, S. Diaz, R. L. McKenzie, M. Blumthaler, V. Fioletov, J. Herman, K. Takashi, C. Sinclair, L. Jalkanen, "GAW Report N.º 212 Standard Operating Procedures (SOPs) for Spectral Instruments Measuring Spectral Solar Ultraviolet Irradiance", 2014.
- [24] R. Russel, "Visible Light", 2005. [Online]. Disponível em WWW: <http://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_visible_light.html> [Consultado em: 23-9-2016].
- [25] R. Russel, "Infrared Radiation (IR)", 2005. [Online]. Disponível em WWW: <http://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_infrared.html> [Consultado em: 23-9-2016].
- [26] A. P. D. A. S. Castro, "Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

- [27] S. Chaiyapinunt, B. Phueakphongsuriya, K. Mongkornsaksit, N. Khomporn, "Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission", *Energy Build.*, vol. 37, no. 7, pp. 725–738, 2005.
- [28] D. Russo, C. McKown, C. Roger, J. Brotzman, J. Stricker, "The influence of film composition on the optical and thermal properties of solar control coatings", *Thin Solid Films*, vol. 398–399, pp. 65–70, 2001.
- [29] A. J. Santos, S. M. Antunes, L. M. Matias, "Aspectos energéticos e acústicos dos vãos envidraçados", NUTAU'2000 X Congresso Ibérico de Energia Solar V Congresso Ibero-Americano de Energia Solar – As Energias Renováveis no novo Milênio, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2000.
- [30] C. L. Faustino, "Influência dos Vãos Envidraçados no Desempenho Energético de Edifícios", Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, IST, Lisboa, Portugal, Outubro de 2012.
- [31] WINDOWS for high-performance commercial buildings, "Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)." [Online]. Disponível em WWW: <<http://www.commercialwindows.org/shgc.php>> [Consultado em: 20-8-2016].
- [32] WINDOWS for high-performance commercial buildings, "Visible Transmittance." [Online]. Disponível em WWW: <<http://www.commercialwindows.org/vt.php>> [Consultado em: 2-9-2016].
- [33] European Window Film Association, "Short History of Window Film." [Online]. Disponível em WWW: <<http://www.ewfa.org/short-history-window-film#!b3>> [Consultado em: 27-11-2015].
- [34] J. O. Pinheiro, "Simulação energética de películas em envidraçados", Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, IST, Lisboa, Portugal, Novembro de 2015.
- [35] CEN, "EN 15752-1 Glass in building - Adhesive backed polymeric film - Part 1: Definitions and requirements", European Committee for Standardization, Bruxelas, 2014.
- [36] CEN, "EN 15755-1 Glass in building - Adhesive backed polymeric filmed glass - Part 1: Definitions and requirements", European Committee for Standardization, Bruxelas, 2014.
- [37] S. Capoccia, "Many Utilities See Window Film As A Cost-Effective Way To Cut Peak Demand", 2015. [Online]. Disponível em WWW: <<http://www.iwfa.com/News/PressReleases/TabId/308/ArtMID/1592/ArticleID/2093/Many-Utilities-See-Window-Film-As-A-Cost-Effective-Way-To-Cut-Peak-Demand.aspx>> [Consultado em: 05-12-2015].

- [38] J. Xamán, C. Pérez-Nucamendi, J. Arce, J. Hinojosa, G. Álvarez, I. Zavala-Guillén, “Thermal analysis for a double pane window with a solar control film for using in cold and warm climates”, *Energy Build.*, vol. 76, pp. 429–439, 2014.
- [39] F. Noh-Pat, J. Xamán, G. Álvarez, Y. Chávez, J. Arce, “Thermal analysis for a double glazing unit with and without a solar control film (SnS–CuxS) for using in hot climates”, *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 704–712, 2011.
- [40] C. Li, J. Tan, T.-T. Chow, Z. Qiu, “Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption”, *Energy Build.*, vol. 102, pp. 129–138, 2015.
- [41] D. H. W. Li, J. C. Lam, C. C. S. Lau, T. W. Huan, “Lighting and energy performance of solar film coating in air-conditioned cellular offices”, *Renew. Energy*, vol. 29, no. 6, pp. 921–937, 2004.
- [42] E. Moretti, E. Belloni, “Evaluation of energy, thermal, and daylighting performance of solar control films for a case study in moderate climate”, *Build. Environ.*, vol. 94, pp. 183–195, 2015.
- [43] D. Lourenço, M. G. Gomes, A. M. Rodrigues, “Estudo Experimental do Desempenho de Envidraçados com Películas”, *Conferência TEST&E 2016 – 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil*, IST, Lisboa, 3-5 de Julho de 2016.
- [44] LLumar, “Reflective Helios Dark Silver (RHE20 SI ER HPR) - Performance Data”, 2015.
- [45] LLumar, “R35 SR HPR - Technical data.” 2010.
- [46] Lawrence Berkeley National Laboratory, “Therm 6.3 / Window 6.3 – NFRC Simulation Manual”, Berkeley, Califórnia, Julho de 2013.
- [47] ITeCons, Universidade de Coimbra, “DL118/2013 de 20 de Agosto – Regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH), Síntese da regulamentação aplicável”, Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção, p. 127, Coimbra, Lisboa, 2013.
- [48] A. J. Santos, “Desenvolvimento de uma metodologia de caracterização das condições de iluminação natural dos edifícios baseada na avaliação ‘in situ’.”, Dissertação de Mestrado LNEC/FCUL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2001.
- [49] Golden Software, “Surfer User 's Guide Quick Start Guide”, Colorado, U.S.A, Janeiro de 2014.
- [50] CEN, “EN 12464-1 Light & Lighting – Lighting of Indoor Workplaces”, European Committee for Standardization, Bruxelas, 2014.