



**Universidade do Algarve – Campus de Gambelas**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

## **FACHADAS VENTILADAS**

*Avaliação de sistema de camada de vidro duplo ventilado*

**Dissertação**

**Mestrado em Energias Renováveis e Gestão de Energias**

**Juliana Martins Revés**

Orientador: **Prof. Doutor Eusébio Conceição**

2014



**Universidade do Algarve – Campus de Gambelas**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

## **FACHADAS VENTILADAS**

*Avaliação de sistema de camada de vidro duplo ventilado*

**Dissertação**

**Mestrado em Energias Renováveis e Gestão de Energias**

**Juliana Martins Revés**

Orientador: **Prof. Doutor Eusébio Conceição**

2014

## **FACHADAS VENTILADAS**

### *Avaliação de sistema de camada de vidro duplo ventilado*

#### **Declaração de autoria de trabalho**

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito.

Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

---

**Juliana Martins Revés**

#### **Copyright**

A universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte deste projeto, nomeadamente ao Orientador, o Prof. Doutor Eusébio Conceição, por toda a dedicação e apoio incondicional, sem o qual certamente não teria sido possível realizar esta dissertação.

Às empresas representantes da Domal e Anicolor pela informação dispensada.

A todos os colegas de curso, em particular aos colegas Rúben Teodoro e Daniel Correia que direta e indiretamente também contribuíram para a realização deste trabalho.

Finalmente a todos meus amigos e à minha família que mesmo nos momentos mais difíceis não me deixaram desistir.

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Caso de Estudo 1 - Características da fachada ventilada (caixa de suporte de lamelas), dispositivo de sombreamento (lamelas) .....	30
Tabela 2 – Caso de Estudo 1 – Características térmicas das lamelas .....	30
Tabela 3 – Caso de estudo 2 - Características da fachada ventilada (caixa de suporte de lamelas), dispositivo de sombreamento (lamelas) .....	32
Tabela 4 – Caso de Estudo 2– Características térmicas das lamelas .....	32
Tabela 5 – Caso de estudo 1 –Dados de Entrada .....	40
Tabela 6 – Caso de Estudo 2– Dados de Entrada .....	41
Tabela 7 – Atribuição de valores a Características Físicas do Ar .....	41
Tabela 8 – Cálculo de Resistências.....	42
Tabela 9 – Propriedades do ar (convecção natural) para uma temperatura de 10°C .....	43
Tabela 10– Propriedades do ar (convecção forçada) para uma temperatura de 10 °C .....	45
Tabela 11– Tabela de comparação de resultados de resistências térmicas dos Casos de Estudo 1 e 2.....	57
Tabela 12– Tabela de Comparação de resultados de temperaturas dos Casos de Estudo 1 e 2. ....	58
Tabela 13– Tabela de Comparação de Resultados de velocidades dos Casos de Estudo 1 e 2. ....	59
Tabela 14– Tabela de comparação de resultados de caudal mássico dos Casos de Estudo 1 e 2.....	59
Tabela 15– Valores resultantes para cálculo de caudal de renovação de ar .....	60
Tabela 16– Tabela de relação de valores caudal volúmico / número de pessoas .....	60
Tabela 17– Tabela de relação de valores caudal volúmico / número de fluxo de energia ....	61

## Índice de Figuras

Figura 1 – Caso de Estudo 1 - Fachada com um dispositivo de sombreamento composto por 5 lamelas (vista diagonal) .....	16
Figura 2 – Caso de Estudo 2 - Fachada com um dispositivo de sombreamento composto por 13 lamelas com ângulo de inclinação de $180^\circ$ (vista diagonal) .....	17
Figura 3 – Esquema aproximado de uma lamela .....	26
Figura 4 – Esquema de vista lateral da fachada ventilada com as linhas da radiação solar a $39^\circ$ .....	26
Figura 5 – Esquema aproximado de uma lamela pequena .....	27
Figura 6 – Esquema de vista lateral da fachada ventilada com as linhas da radiação solar a $39^\circ$ .....	27
Figura 7 – Modelo geral para os dois casos de estudo com dimensões (m) de vidro e caixa de lamelas (altura e largura).....	28
Figura 8 – Caso de Estudo 1 – Vista de cima, dimensões (m) de comprimento de lamelas e vidro .....	29
Figura 9 – Caso de Estudo 1 – Vista lateral de lamela, com dimensão (m) de altura de lamela e largura de lamela interior e exterior .....	29
Figura 10 – Caso de Estudo 2 – Vista de cima, dimensões (m) de comprimento de lamelas e vidro .....	31
Figura 11 – Caso de Estudo 1 – Vista lateral de lamela, com dimensão (m) de altura de lamela e largura de lamela interior e exterior .....	31

## **Siglas e Abreviaturas**

ASHRAE	–	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AVAC	–	Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado
CAD	–	Desenho Assistido por Computador
CFD	–	Método Computacional de Dinâmica de Fluidos
CO <sub>2</sub>	–	Dióxido de Carbono
ETICS	–	External Thermal Insulation Composite Systems
GEE	–	Gases Efeito de Estufa
PMV	–	Votação Média Previsível
PPD	–	Porcentagem de pessoas insatisfeitas
RCCTE	–	Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios
SCE	–	Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios
UAlg	–	Universidade do Algarve

## **Nomenclatura utilizada no programa de modelo integral**

### **Temperaturas**

$T_e$	–	Temperatura exterior
$T_i$	–	Temperatura da fachada ventilada
$T_{ve}$	–	Temperatura do vidro exterior
$T_{vi}$	–	Temperatura do vidro interior
$T_{ii}$	–	Temperatura da sala
$T_{iii}$	–	Temperatura fora da sala
$T_{arle}$	–	Temperatura do ar dentro da lamela lado exterior
$T_{arli}$	–	Temperatura do ar dentro da lamela lado interior
$T_{li}$	–	Temperatura da parte interior da lamela
$T_{le}$	–	Temperatura da parte exterior da lamela
$T_d$	–	Temperatura do ar injetado dentro das lamelas

### Resistências Térmicas

- R(ve-e) – Resistência térmica entre o vidro exterior e o ar exterior
- R(ve-i) – Resistência térmica entre o vidro exterior e o ar dentro da fachada ventilada (i)
- R(vi-ii) – Resistência térmica entre o vidro interior e o ar do compartimento (ii)
- R(vi-i) – Resistência térmica entre o vidro interior e o ar dentro da fachada ventilada (i)
- R(Li-i) – Resistência térmica entre o alumínio da lamela interior e o ar dentro da fachada ventilada (i)
- R(Le-i) – Resistência térmica entre o alumínio da lamela exterior e o ar dentro da fachada ventilada (i)
- R(Li-arli) – Resistência térmica entre o alumínio da lamela interior e o ar dentro da lamela
- R(Le-arle) – Resistência térmica entre o alumínio da lamela exterior e o ar dentro da lamela
- R(arle-arli) – Resistência térmica entre o ar da parte interior dentro da lamela e a parte exterior dentro da lamela

### Outra nomenclatura utilizada

abl	Absorvidade da lamela
Altura.vidro	Altura do vidro (m)
Altura.caixa.lamelas	Altura da caixa de lamelas (m)
Av2	Área do vidro interior (m <sup>2</sup> )
Av1	Área do vidro exterior (m <sup>2</sup> )
Abv	Absorvidade do vidro
Alt	Área da lamela para a convecção Natural e forçada (m <sup>2</sup> )
Ai	Área da caixa de lamelas (m <sup>2</sup> )
Avs2	Área do vidro interior sujeita a radiação solar (m <sup>2</sup> )
Ale	Área exterior da lamela sujeita a radiação solar (m <sup>2</sup> )
Ali	Área interior da lamela sujeita a radiação solar (m <sup>2</sup> )
$\beta$	Inclinação da lamela
Cp	Calor específico (J/Kg.K)

comp.lamela	Comprimento da lamela (m)
comp.vidro	Comprimento do vidro (m)
De	Diâmetro equivalente (m)
$\Delta L$	Diferença de cotas da caixa de lamelas (m)
Espessura.lamela	Espessura da lamela (m)
F	Fator de atrito
g	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
hin	Coefficiente de transferência de calor por convecção interior ( $w/m^2.K$ )
hext	Coefficiente de transferência de calor por convecção exterior ( $w/m^2.K$ )
I	Irradiação ( $W/m^2$ )
Largura.caixa	Largura da caixa de lamelas (m)
Largura.lamela	Largura da lamela (m)
Largura. lamela.i	Largura da lamela interior sujeita à radiação solar (m)
Largura. lamela.e	Largura da lamela exterior sujeita à radiação solar (m)
$m'$	Caudal mássico na caixa de lamelas ( $m^3/s$ )
$m^1$	Caudal mássico dentro da lamela ( $Kg/s$ )
Par	Densidade do ar ( $Kg/m^3$ )
Trans	Transmitancia
V	Velocidade (m/s)

## Índice Geral

Índice de Tabelas .....	5
Índice de Figuras .....	6
1. Objetivos.....	14
2. Enquadramento .....	15
2.1 Enquadramento geral do trabalho .....	15
2.2 Caracterização do Caso em Estudo.....	15
2.3 Consumos Energéticos.....	17
2.4 Edifícios em Portugal .....	18
2.5 Noção de conforto térmico .....	19
2.6 Desconforto térmico local.....	20
2.6.1 Risco de Resfriamento .....	20
2.6.2 Temperatura do ar na vertical .....	20
2.6.3 Temperatura do chão .....	21
2.6.4 Assimetria de temperatura radiante .....	21
2.6.5 Qualidade do ar interior .....	22
3. Estado de Arte.....	23
3.1 Fachadas de Parede em Portugal .....	23
3.2 Fachadas de Vidro .....	23
4. Modelo Numérico .....	25
4.1 Casos de Estudo.....	25
4.1.1 Caso de Estudo 1: Modelo de lamelas horizontais e fixas.....	25
4.1.2 Caso de Estudo 2: Modelo de lamelas pequenas .....	26
4.2 Constituição de lamelas .....	28
5. Modelo Matemático.....	33
5.1 Equação da temperatura do ar da caixa de lamelas ( $T_i$ ) .....	33
5.2 Equação da temperatura do espaço do habitáculo ( $T_{ii}$ ).....	34
5.3 Equação da temperatura do vidro exterior ( $T_{ve}$ ).....	35
5.4 Equação da temperatura do vidro interior ( $T_{vi}$ ) .....	36
5.5 Equação da temperatura da lamela .....	37
5.5.1 Equação da temperatura da parte interior da lamela ( $T_{li}$ ) .....	37
5.5.2 Equação da temperatura da parte exterior da lamela ( $T_{le}$ ) .....	38

5.6	Equação da temperatura do ar dentro da lamela do lado interior (Tarli).....	39
5.7	Equação da temperatura do ar dentro da lamela no lado exterior (Tarle) .....	39
5.8	Dados de Entrada .....	40
5.9	Cálculo de Resistências .....	41
5.9.1	Convecção Natural.....	42
5.9.2	Convecção Forçada.....	44
5.10	Cálculo das áreas .....	46
5.10.1	Cálculo das áreas dos vidros.....	46
5.10.2	Cálculo das áreas das lamelas.....	47
5.10.2.1	Área das lamelas .....	47
5.11	Cálculo da velocidade do ar no interior.....	48
5.12	Caudal mássico do ar na caixa de lamelas.....	51
5.13	Cálculo do fluxo de calor.....	52
5.14	Cálculo do fluxo de energia.....	53
5.15	Resolução do sistema de equações .....	53
5.15.1	Regime transitório .....	53
5.15.2	Regime Permanente .....	54
6.	Resultados.....	57
7.	Perspetivas Futuras .....	62
8.	Conclusão .....	63
9.	Referências bibliográficas .....	65

## **Resumo**

Com a entrada em vigor dos novos regulamentos na área de consumo energético de edifícios, tem-se verificado um aumento significativo de certificações energéticas, sendo por isso importante a simulação do comportamento térmico destes, de forma a minimizar o desconforto térmico e a aumentar o nível da qualidade do ar interior. Surge assim a necessidade de criar novas soluções construtivas, nomeadamente sistemas de ventilação ecológicos, entre eles, as fachadas ventiladas. As fachadas ventiladas mais utilizadas são as de parede, assim partindo-se deste mesmo princípio, pretende-se através do estudo de fachadas com camada de vidros duplos ventiladas, com dispositivo de sombreamento no seu interior, comprovar a sua eficácia enquanto sistema de ventilação.

Serão objeto de estudo, dois tipos de fachadas, uma em que o dispositivo de sombreamento é composto por lamelas grandes e outra com lamelas menores, possibilitando assim o cálculo da taxa de renovação do ar no espaço, o campo de temperatura e a velocidade na fachada.

Será efetuado projeto e dimensionamento da fachada ventilada em estudo em Desenho Assistido por Computador e as simulações efetuadas num programa de resolução de sistemas equações, adotando um modelo integral para o efeito.

Com base nos resultados obtidos, pretende-se obter valores que comprovem a eficiência da implementação deste sistema de fachadas ventiladas.

## **Abstract**

With the coming into force of the new regulations in the field of energy consumption of buildings, there has been a significant increase in energy certificates, so it is important to simulate the thermal behavior thereof, so as to minimize the thermal discomfort and increasing the level the indoor air quality. This creates the need for new construction solutions, including ventilation ecological systems, including the ventilated facades. The ventilated facades are the most widely used wall, so starting from this same principle, it is intended by studying facades with ventilated double glazing with shading device inside layer, proving its effectiveness as a ventilation system.

Will be the object of study, two types of facades, one in which the shading device is composed of large plates and one with smaller lamellae, thus enabling the calculation of the rate of air change in the space, the temperature field and the velocity on the facade .

Design and sizing of the ventilated façade study in Computer Aided Design and simulations performed on a resolution of equations program will be made by adopting a comprehensive model for the effect.

Based on these results, we intend to obtain values that prove the efficiency of the implementation of this system of ventilated facades.

## **1. Objetivos**

Pretende-se com este estudo avaliar a utilização de fachadas com camada de vidro duplo ventiladas, com um dispositivo amovível de sombreamento no seu interior. A importância de melhoria da qualidade do ar interior, do conforto térmico e consequentemente a obtenção de redução significativa de consumo energético de vários sistemas de ventilação estão cada vez mais assentes, por isso pretende-se estudar novas metodologias que o permitam.

Será realizado um projeto e dimensionamento da fachada ventilada em Desenho Assistido por Computador. Na simulação numérica será utilizado um modelo integral que permite calcular o campo de velocidade e temperaturas dentro da caixa de lamelas.

## **2. Enquadramento**

### **2.1 Enquadramento geral do trabalho**

Com o crescimento populacional e a necessidade de mais e maiores construções, tornou-se cada vez mais real a necessidade de uma construção sustentável. O aproveitamento dos recursos renováveis é o grande objetivo, pois irá permitir uma melhor qualidade de vida, não só em termos do conforto térmico como da qualidade do ar interior nos edifícios, uma vez que a utilização de sistemas de ventilação ecológicos tende a aumentar.

De acordo com a diretiva europeia 2009/28/CE de 23 de Abril, foi estabelecido que cada Estado-Membro deverá estabelecer uma melhoria da eficiência energética em 20% até 2020.

A construção em Portugal tem vindo a sofrer uma queda acentuada, pelo que é necessário recorrer a requalificação de edifícios existentes. Assim, a aplicação de janelas de vidro duplo ventiladas será uma mais-valia, apesar de os resultados obtidos não serem ainda satisfatórios (Elsevier, 2011).

A implementação desta solução alternativa permitirá uma melhoria significativa da qualidade do ar interior, do conforto térmico, menor nível de desconforto térmico local dos ocupantes (risco de resfriamento) e menor consumo energético. A qualidade do ar interior nos edifícios não é tão discutida, analisada e avaliada quanto a qualidade de ar exterior, sendo por isso necessário criar uma maior sensibilidade para este problema. Todos estes aspetos serão falados posteriormente.

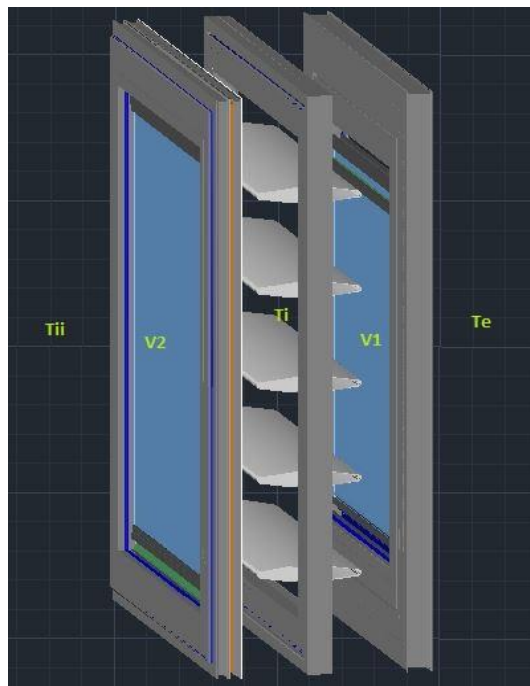
### **2.2 Caracterização do Caso em Estudo**

O estudo da implementação de fachadas com camada de vidro duplo ventiladas será efetuado num modelo desenvolvido em CAD. Este modelo consiste em:

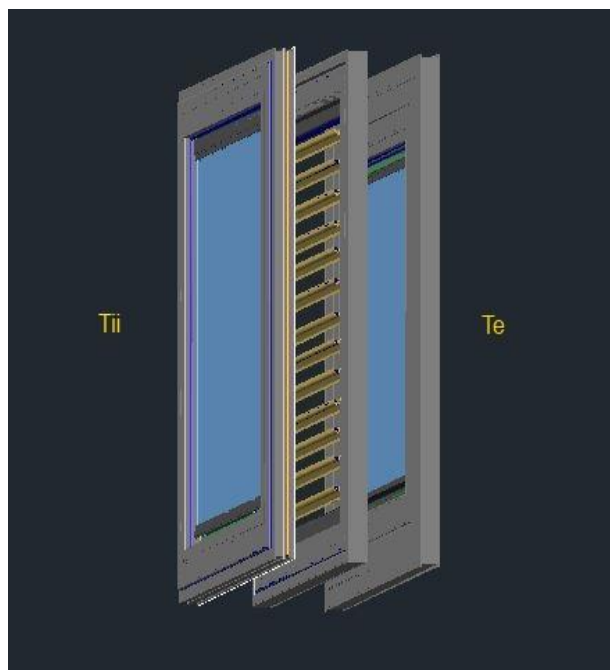
- Vidro exterior (vidro 1) com abertura superior para o exterior (e)
- Vidro interior (vidro 2) com abertura interior para o espaço (ii)

- Dispositivo de sombreamento (lamelas) com ângulo de inclinação variável ( $\beta$ )

Este estudo implica o estudo de dois casos, o caso de estudo 1 constituído por um modelo de lamelas grande fixas e o caso de estudo 2 constituído por um modelo de lamelas pequenas amovíveis. Ambos os casos são de seguida apresentados.



**Figura 1–Caso de Estudo 1 - Fachada com um dispositivo de sombreamento composto por 5 lamelas (vista diagonal)**



**Figura 2– Caso de Estudo 2 - Fachada com um dispositivo de sombreamento composto por 13 lamelas com ângulo de inclinação de 180° (vista diagonal)**

O objetivo é determinar a variação da temperatura e velocidade do ar nos compartimentos i e ii ao longo do dia, consoante as temperaturas exteriores e ângulos de inclinação das lamelas em relação à radiação solar.

### **2.3 Consumos Energéticos**

O consumo de combustíveis fósseis tem sido desde os tempos mais primórdios a grande fonte de energia. Com a evolução da tecnologia e da sensibilidade do impacto no meio ambiente, estes foram dando lugar a fontes renováveis de energia. Verificou-se assim, em Portugal, em Outubro de 2013, face ao mesmo mês de 2012, uma redução de 6,6% no consumo global de combustíveis fósseis.

A produção de energia elétrica a partir de Fontes de Energia Renovável (FER) registou em Outubro de 2013, um aumento de 39% relativamente a Outubro de 2012, devendo-se principalmente a componentes hídrica e eólica (DGEG, 2014)

Entre 2008 e 2011 o consumo energético caiu 5,2% em Portugal. A Eurostat aponta a crise financeira e o conseqüente abrandamento económico como as principais causas.

O novo objetivo do Governo de redução do consumo de energia primária, passou dos 20% para os 25%, exigindo assim um esforço adicional (entre 1,2 e 1,7 Mtep) nas expectativas de evolução até 2020. Isto deveu-se a atual situação económica e ao facto de haver uma perspetiva otimista de instalação de potência.

## **2.4 Edifícios em Portugal**

Os edifícios em Portugal representam 30% dos consumos energéticos, 60% do consumo elétrico e é o 2º sector que mais contribui para o efeito de estufa.

Foram definidas medidas que permitem alcançar 10% de eficiência energética até 2015 (ver diretiva 2006/32/CE).

Para se poder então atingir estes objetivos, é necessário que a construção em Portugal siga por outros caminhos, isto é, é necessário aproximar-se dos valores atingidos pelos outros países da União Europeia. É a crescente necessidade de abrandar os consumos excessivos de energia, quer para aquecimento quer para arrefecimento, nos edifícios, recorrendo para isso à reabilitação energética dos mesmos.

Atualmente estão em vigor vários regulamentos que têm de ser seguidos, tais como o SCE, o RCCTE e outras exigências ambientais. Assim, é necessária a verificação de todas as opções existentes (eficientes, inovadores e ecológicas) que possam ser de utilidade para aplicação nas paredes exteriores dos edifícios (Abreu e Corvacho, 2010).

A qualidade dos edifícios e o seu nível de qualidade depende assim de todo um conjunto de fatores, uns que têm a ver com a construção do edifício em si (qualidade dos isolamentos colocados em paredes exteriores, tipo de fachada, outros) e outros que têm a ver com o

interior dos mesmos (conforto e desconforto térmico, qualidade do ar, qualidade do ar na vertical, temperatura do chão ou assimetria de temperatura radiante). Pode-se no entanto dizer que a qualidade interior do edifício, o seu nível de conforto, depende da construção do edifício, e quanto melhor esta for, menos consumo energético terá o edifício.

## **2.5 Noção de conforto térmico**

O nível de conforto térmico é muito subjetivo, pois varia de pessoa para pessoa. Foi defendido (Fanger, 1993) que esta noção depende de um conjunto de grandezas físicas que afetam o ambiente.

A noção de conforto térmico depende então de dois parâmetros individuais (vestuário e atividade) e de quatro ambientais (temperatura média do ar, temperatura média radiante, velocidade média do ar e humidade relativa). A ASHRAE 55-1981 e ISO 7730 defendem ainda que o conforto térmico tem a ver com o “estado de espírito de cada indivíduo em relação ao ambiente”.

Para que um indivíduo esteja em “equilíbrio térmico”, as condições de conforto deverão ser ótimas. Estas são assim determinadas através da utilização do índice PMV, que corresponde à votação média previsível de um conjunto de avaliadores no que diz respeito às condições de conforto de um dado ambiente térmico moderado, e o PPD, que exprime através de uma percentagem previsível, a quantidade de pessoas insatisfeitas quando expostas a esse mesmo ambiente térmico moderado.

Apesar da percentagem de pessoas termicamente insatisfeita, um indivíduo pode estar termicamente confortável e ao mesmo tempo estar insatisfeito, pois há a possibilidade de risco de resfriamento (Conceição, 2013).

Através destes índices é possível a determinação do consumo de energia dos sistemas de ventilação existentes (Djongyang, 2010).

## **2.6 Desconforto térmico local**

Desconforto térmico local é a insatisfação de um indivíduo numa zona limitada do seu corpo, face a parâmetros ambientais que não são admissíveis para conforto. Os fatores que podem levar a este desconforto (resfriamento) são a velocidade do ar, diferença de temperatura do ar na vertical, temperatura do chão ou assimetria da temperatura radiante (Conceição, 2013).

A norma ISO 7730 classifica ainda os ambientes térmicos em três categorias de qualidade de A a C.

### **2.6.1 Risco de Resfriamento**

O resfriamento num indivíduo, por vezes é provocado por um sistema ar forçado e/ou condicionado, sendo esta movimentação de ar que causa o resfriamento, provocando assim um arrefecimento local do corpo humano (Melikov, 1988).

A existência de um elevado arrefecimento por convecção na superfície do corpo humano estimula os termo-recetores de frio, causando assim o resfriamento. É este resfriamento sentido pelos indivíduos que faz estes quererem controlar a temperatura do ar, aumentando assim o consumo energético.

A parte do corpo que é considerada como a mais sensível é a cabeça (Olesen, 1985b e Fanger et al, 1988b), pois é uma zona desprotegida. O cabelo promove uma proteção, principalmente na zona do pescoço, embora não esteja demonstrada a influência do comprimento do cabelo na sensação de resfriamento. A quantificação do risco de resfriamento em espaços ventilados através do índice de percentagem de pessoas insatisfeitas (PD) é determinada a partir do número de pessoas insatisfeitas devido a resfriamentos locais (Conceição, 2013).

### **2.6.2 Temperatura do ar na vertical**

A temperatura existente num determinado compartimento não é igual em todo lado, no teto permanece o calor, devido ao menor peso do ar quente este sobe, e no chão o frio. Quando a

diferença entre a temperatura existente no teto e no chão é muito grande pode ocorrer desconforto. (Olesen, 1979, Wyon e Sandberg, 1993)

A ISO 7730 sugere ainda temperaturas do ar admissíveis, para um nível de atividade moderado (Conceição, 2013).

### **2.6.3 Temperatura do chão**

Olesen (1977) efetuou um estudo sobre a temperatura do chão e os seus limites. Desta forma, a ASHRAE 55-1981 e a ISO 7730, admitem que a temperatura (para uma diminuição do desconforto sentido) do chão deverá estar compreendida entre os 18° e 29°C e entre os 19° e 26°C, respetivamente (Conceição, 2013).

### **2.6.4 Assimetria de temperatura radiante**

O desconforto causado por este tipo de assimetria pode ser provocado por janelas, parede que estejam sujeitas a radiação solar ou por painéis de aquecimento localizados nas paredes ou teto (Fanger 1880 e 1985).

Este tipo de assimetria é definido pela diferença de temperatura de planos radiantes de lados opostos de um pequeno elemento plano, sendo que no geral há uma maior sensibilidade a assimetrias de radiação causadas por tetos quentes do que por paredes quentes ou frias (Conceição, 2013).

As normas ISO 7730 e ASHRAE 55-1981 recomendam temperaturas médias radiantes para assimetrias verticais e horizontais.

### **2.6.5 Qualidade do ar interior**

As pessoas passam cada vez mais tempo (grande parte dos dias) em ambientes interiores, sendo por isso necessário uma maior preocupação e sensibilização para esses espaços.

O desenvolvimento de microrganismos, uso de produtos de limpeza até ao tipo de ventilação existente (não apropriada) e consequente renovação de ar (deficiente), são razões suficientes para uma melhoria no tratamento da qualidade do ar interior, não só nas casas onde se habita como também nos locais de trabalho (APA, 2013)

O Dióxido de Carbono, resultante de um espaço interior ocupado, é o principal indicador de poluição existente num determinado compartimento interior, através do qual se torna possível indicar qual a renovação de ar que deve ser efetuada. Este é gerado, não só por nós seres humanos como também por outras fontes de carga poluente, situação em que se torna mais complicado de saber qual a fonte de emissão.

Os vários métodos que se utiliza para o estudo a eficiência dos processos de ventilação e de qualidade do ar são a modelação física, os métodos descritivos e a modelação numérica. A taxa de renovação de ar é também um aspeto importante a considerar, pois expressa o número de renovações de ar por hora que um compartimento deverá ter (Conceição, 2013).

### **3. Estado de Arte**

#### **3.1 Fachadas de Parede em Portugal**

A evolução de soluções construtivas ao longo dos anos (técnica e exigências de conforto) de paredes exteriores de fachada tem fomentado uma grande pesquisa. A evolução da pedra ou tijolo maciço (anos 40) ao tijolo furado e de menor espessura (anos 80) foi originada pela crescente preocupação com conforto, não só térmico mas também acústico e higrométrico. A partir dos anos 90 deram entrada o sistema ETICS (sistema de isolamento térmico pelo exterior que é vulgarmente usado na construção e que é constituído por cola, isolamento, camada de base armada com rede de fibra de vidro, camada de primário e o revestimento final) e a fachada ventilada, sendo esta última constituída por um suporte de fixação, por uma camada de material isolante térmico, caixa-de-ar ventilada (provoca efeito chaminé), estrutura de fixação, placas de revestimento e outros acessórios necessários para o seu bom funcionamento.

Recentemente iniciou-se o estudo de fachadas com camada de vidro duplo ventilada, acoplada de dispositivos de sombreamento (Guardoet *al*, 2011).

#### **3.2 Fachadas de Vidro**

Este sistema é constituído por duas camadas de vidros, uma interior e outra exterior, uma caixa-de-ar e um dispositivo de sombreamento que fica no entre os dois vidros, promovendo assim a ventilação necessária.

Os resultados dos recentes estudos ainda não foram de todo conclusivos, pois os seus resultados não tem sido satisfatórios e muitas vezes é necessário gastos extra para se poder obter os resultados esperados. Foi assim efetuado um estudo por CFD, que provou que este sistema incluía transferências de calor por condução, convecção e radiação. Os resultados deste estudo apontam para uma redução de taxa de fluxo volumétrica de ar dentro dos vidros (caixa-de-ar), obtendo reduções similares aquando da ventilação vertical (Guardoet *al*, 2011).

É de grande importância salientar que as trocas de ar no interior dos vidros permitem um maior conforto térmico e de qualidade do ar, pois há uma constante renovação de ar.

O rendimento deste sistema só será válido se o projeto for energeticamente correto e sustentável, se houver aproveitamento solar para uma melhor iluminação natural, a ventilação e trocas de ar serão efetuadas através de aberturas existentes na fachada (no vidro exterior em baixo e no vidro interior em cima). Tudo isto fará com que todos os conceitos anteriormente referidos façam sentido (conforto térmico, qualidade do ar interior, outros) (Balocco, 2002).

O sistema deverá assim ser estanque, com bom desempenho térmico, permeável ao ar e com boa iluminação natural, de forma a ter um desempenho otimizado.

## **4. Modelo Numérico**

Este modelo permitiu determinar a variação, não só do campo da temperatura como também o campo da velocidade, no compartimento ocupado e no espaço da fachada, ao longo do dia, consoante temperatura exteriores e uns ângulos de inclinação das lamelas em relação à radiação solar.

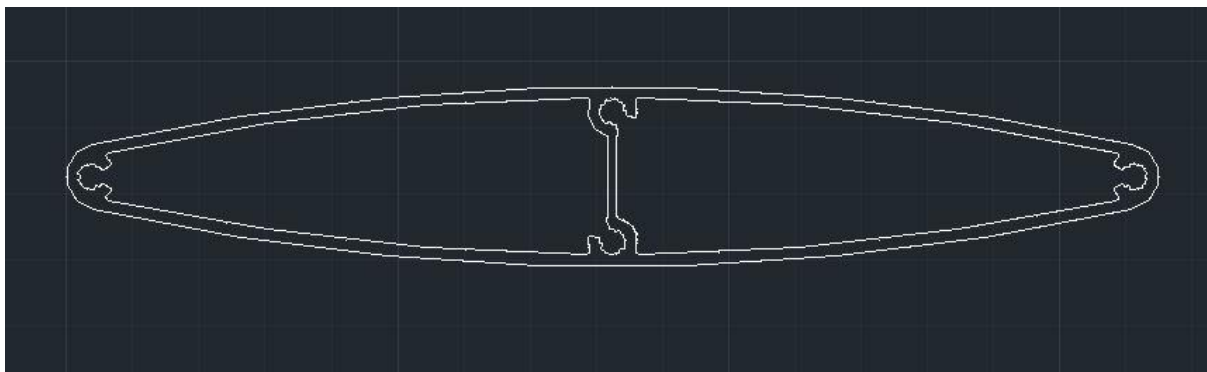
Com base em Ozizik, 1985, consideram-se as características físicas do ar para o cálculo das temperaturas, com exceção do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) do ar que foi assumido através dos dois casos de estudo, anteriormente já identificados e nesta secção serão falados mais ao pormenor:

### **4.1 Casos de Estudo**

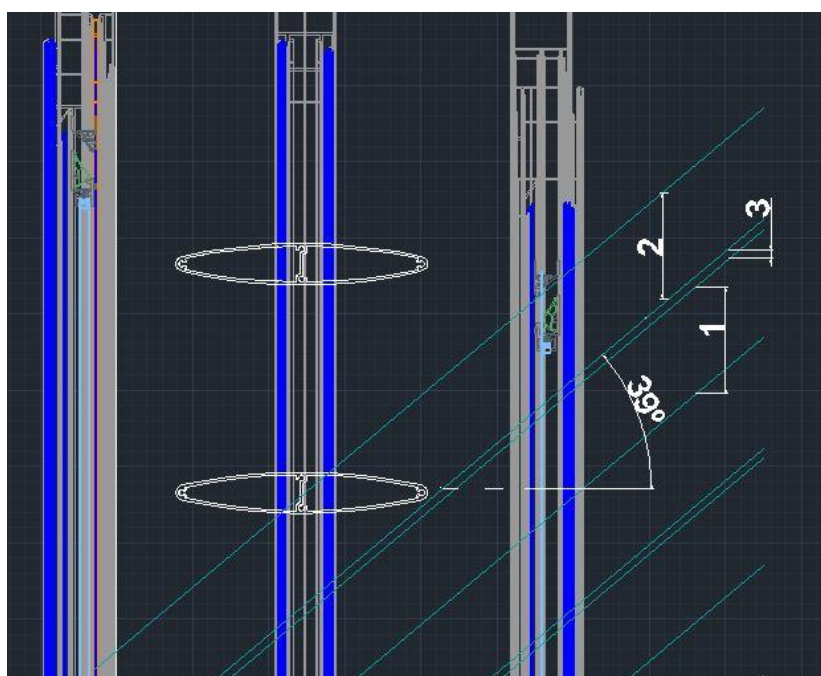
Ambos os casos têm constituição idêntica e já apresentada no ponto 2.2, assim vai-se dar ênfase apenas na tipologia das lamelas que os constitui, sendo esta a única particularidade que os difere.

#### **4.1.1 Caso de Estudo 1: Modelo de lamelas horizontais e fixas**

Este modelo é constituído por 5 lamelas horizontais fixas. Na figura 3 pode ser observado o esquema aproximado de uma lamela e na figura 4 um esquema de vista lateral da fachada ventilada com as linhas da radiação solar a 39°.



**Figura 3- Esquema aproximado de uma lamela**

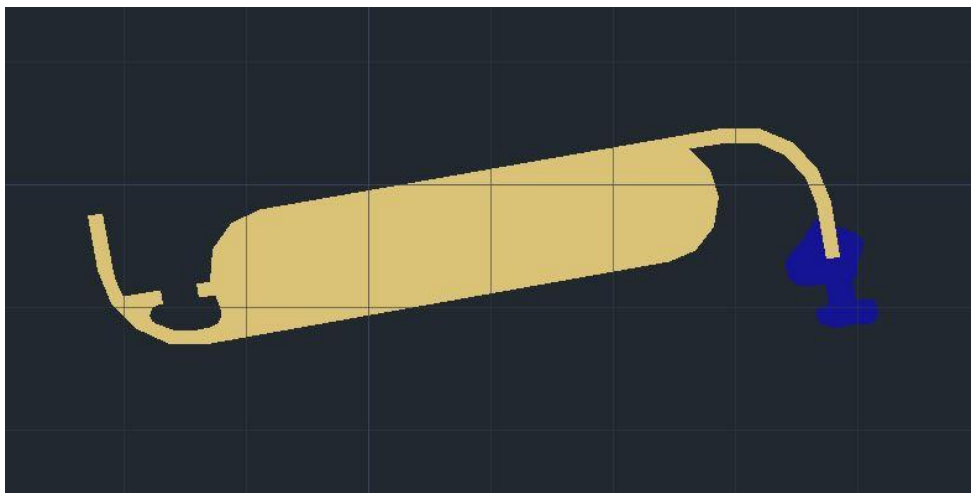


- 1 -distância da lamela da parte interior;
- 2-distância da lamela da parte exterior;
- 3-distância entre lamelas no qual a radiação passa para o vidro interior;

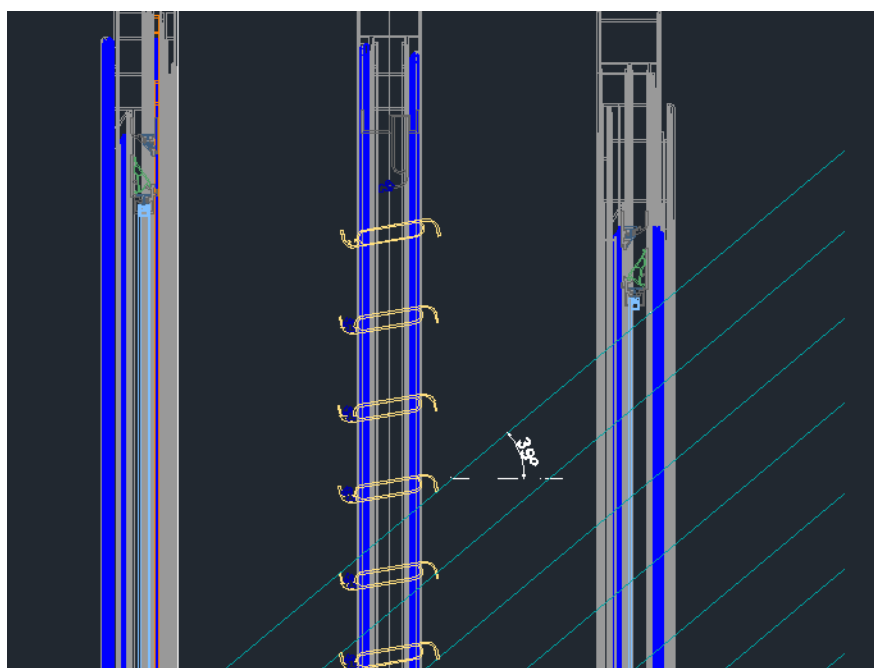
**Figura 4- Esquema de vista lateral da fachada ventilada com as linhas da radiação solar a 39°**

#### **4.1.2 Caso de Estudo 2: Modelo de lamelas pequenas**

Este modelo é constituído por 13 lamelas pequenas amovíveis em que na figura 5 pode ser observado o esquema aproximado de uma lamela pequena e na figura 6 um esquema de vista lateral da fachada ventilada com as linhas da radiação solar a 39°.



**Figura 5 - Esquema aproximado de uma lamela pequena**



**Figura 6– Esquema de vista lateral da fachada ventilada com as linhas da radiação solar a 39°**

## 4.2 Constituição de lamelas

Neste ponto é importante falar da constituição de cada lamela, caixa de lamelas e de cada modelo em si, pois é a partir daqui que se irá encontrar os dados de entrada e saída necessários para garantir que os resultados finais sejam devidamente inseridos.

Para cada caso de estudo e atendendo ainda a Ozizik, 1985, consideraram-se características físicas e geométricas idênticas para os vidros 1 e 2.

Essas características e ainda as características da fachada ventilada (caixa de suporte de lamelas) e do próprio dispositivo de sombreamento (lamelas) estão de acordo com as tabelas e com as figuras seguintes, para o caso de estudo 1 e caso de estudo 2, respetivamente:



**Figura 7 – Modelo geral para os dois casos de estudo com dimensões (m) de vidro e caixa de lamelas (altura e largura)**

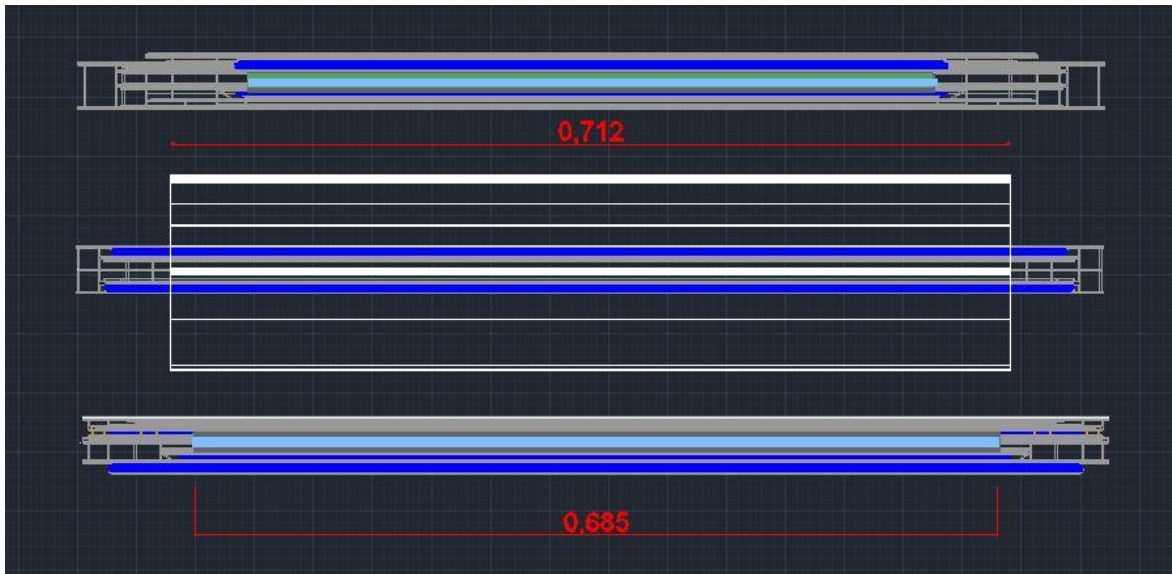


Figura 8 – Caso de Estudo 1 – Vista de cima, dimensões (m) de comprimento de lamelas e vidro

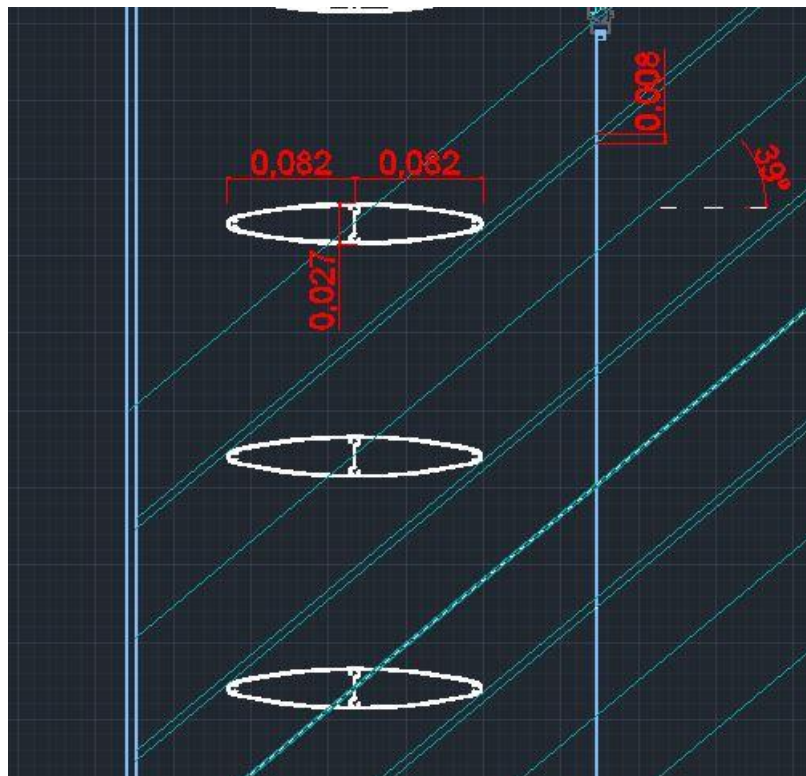


Figura 9 – Caso de Estudo 1 – Vista lateral de lamela, com dimensão (m) de altura de lamela e largura de lamela interior e exterior

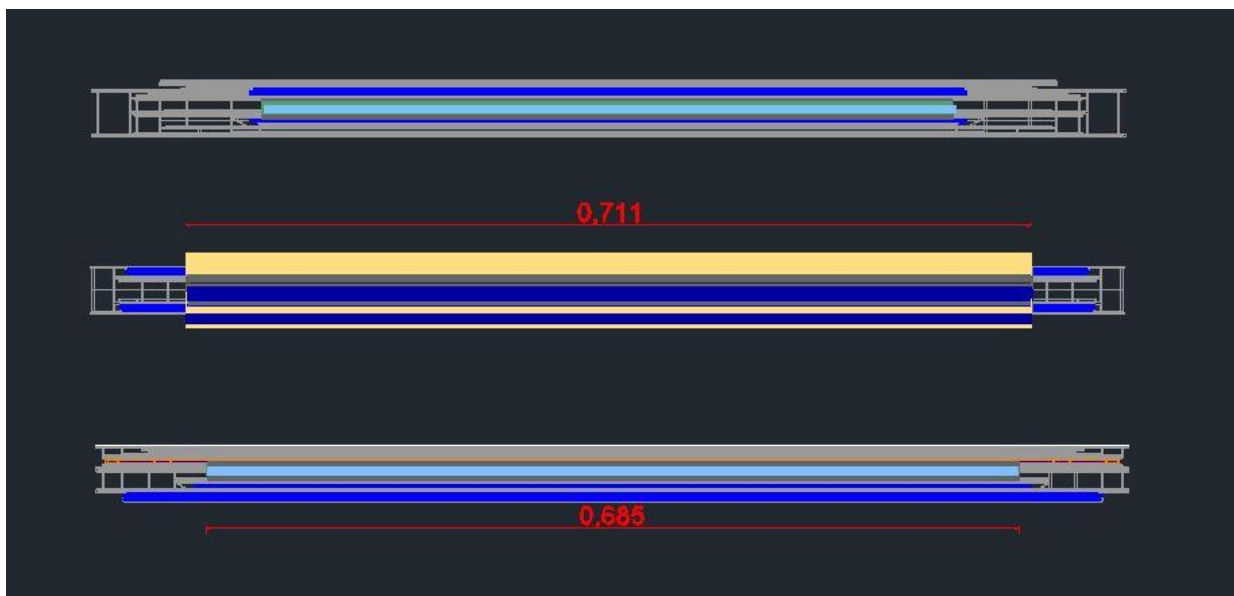
As tabelas que se apresentam de seguida representam as características das lamelas, tanto para o caso de estudo 1 como para o caso de estudo 2.

	<b>Vidros</b>	<b>Lamelas</b>	<b>Caixa de Lamelas</b>
<b>Quantidade</b>	2	5	1
<b>Altura (m)</b>	0.650	0,027	0.920
<b>Largura (m) ou espessura (m)</b>	0.005	0,344	0.254
<b>Comprimento (m)</b>	0,685	0.712	0.920
<b>Emissividade</b>	0.94	0.03	-
<b>Transmitância</b>	0.60	-	-
<b>Absorvência</b>	0.35	0.35	-
<b>Largura da lamela interior (m)</b>	0,082	-	-
<b>Largura da lamela exterior (m)</b>	0,082	-	-

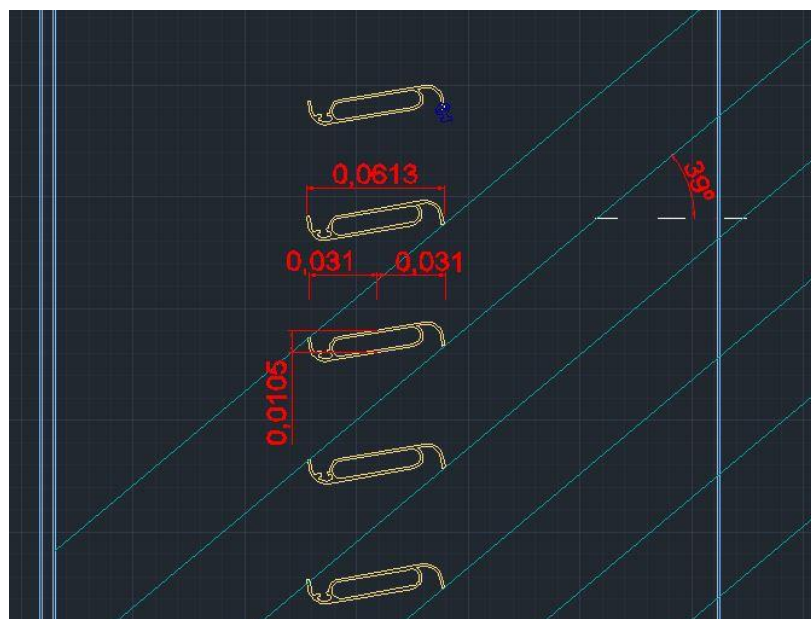
**Tabela 1 – Caso de Estudo 1 - Características da fachada ventilada (caixa de suporte de lamelas), dispositivo de sombreamento (lamelas)**

<b>k (W/m°C)</b>	10	237	-
<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2500	2702	-
<b>cp (J/Kg.K)</b>	750	903	-

**Tabela 2 – Caso de Estudo 1 – Características térmicas das lamelas**



**Figura 10 - Caso de Estudo 2 – Vista de cima, dimensões (m) de comprimento de lamelas e vidro**



**Figura 11 - Caso de Estudo 1 – Vista lateral de lamela, com dimensão (m) de altura de lamela e largura de lamela interior e exterior**

	<b>Vidros</b>	<b>Lamelas</b>	<b>Caixa de Lamelas</b>
<b>Quantidade</b>	2	13	1
<b>Altura (m)</b>	0.650	0,0105	0.920
<b>Largura (m) ou espessura (m)</b>	0.005	0,0613	0.254
<b>Comprimento (m)</b>	0,685	0.712	0.920
<b>Emissividade</b>	0.94	0.03	-
<b>Transmitância</b>	0.60	-	-
<b>Absorvência</b>	0.35	0.35	-
<b>Largura da lamela interior (m)</b>	0,031	-	-
<b>Largura da lamela exterior (m)</b>	0,031	-	-

**Tabela 3 – Caso de estudo 2 - Características da fachada ventilada (caixa de suporte de lamelas), dispositivo de sombreamento (lamelas)**

<b>k (W/m°C)</b>	10	237	-
<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2500	2702	-
<b>Cp (J/Kg.K)</b>	750	903	-

**Tabela 4 – Caso de Estudo 2– Características térmicas das lamelas**

## 5. Modelo Matemático

Foi implementado um modelo modular na fachada ventilada de camada dupla (Jiru&Haghighat, 2008), do qual resultaram as equações de balanço de energia e massa utilizada para avaliar a distribuição de temperatura.

Estas distribuições foram calculadas a partir de um sistema de equações e de um conjunto de temperaturas. Os seus estudos paramétricos foram realizados para identificar o fluxo mássico e a influência da fachada ventilada.

Seguem-se as diferentes equações determinadas para determinação de temperatura, nomeadamente equações de massa e de energia. As equações de energia irão permitir o cálculo das temperaturas e velocidade do ar.

### 5.1 Equação da temperatura do ar da caixa de lamelas ( $T_i$ )

Esta equação representa a equação energética da temperatura do espaço entre os dois vidros, a qual resulta da transferência de calor entre o vidro interior, vidro exterior e as lamelas. Este compartimento está ainda sujeito a um fluxo mássico energético do compartimento ii:

$$m_i C p_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{T_{vi} - T_i}{R_{vi}} + \frac{T_{ve} - T_i}{R_{ve}} + \frac{T_{Li} - T_i}{R_{Li}} + \frac{T_{Le} - T_i}{R_{Le}} + m' C p (T_{ii} - T_i) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

$C_p$  - Calor específico do ar (J/Kg.K)

$m'$  - Caudal mássico (Kg/s)

$T_i$  - Temperatura na caixa de lamelas (°C)

$T_{ii}$  - Temperaturas habitáculo (°C)

$T_{Le}$  - Temperatura da parte exterior da lamela (°C)

$T_{Li}$  - Temperatura da parte interior da Lamela (°C)

$T_{ve}$  - Temperatura vidro exterior (°C)

$T_{vi}$  - Temperatura vidro interior (°C)

$R_{Le-i}$  - Resistências condutivas e convectivas entre a parte exterior e caixa-de-ar da fachada ventilada (°C/W)

$R_{Li-i}$  - Resistências condutivas e convectivas entre a parte interior e a caixa-de-ar da fachada ventilada (°C/W)

$R_{ve-i}$  - Resistências condutivas e convectivas entre o vidro exterior e a caixa de lamelas (°C/W)

$R_{vi-i}$  - Resistências condutivas e convectivas entre o vidro interior e a caixa de lamelas (°C/W)

## 5.2 Equação da temperatura do espaço do habitáculo ( $T_{ii}$ )

Equação energética da temperatura do espaço ii resultante da radiação que atravessa o vidro exterior, dos dispositivos de sombreamento e do vidro interior que incide no habitáculo contribuindo para o aumento da temperatura. Podem ainda verificar-se transferências de calor com o vidro interior e com a massa de ar proveniente do interior do edifício (iii):

$$m_{ii} C_p \frac{dT_{ii}}{dt} = \frac{T_{vi} - T_{ii}}{R_{vi,ii}} + m' C_p (T_{iii} - T_{ii}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

$C_p$  - Calor específico do ar (J/Kg.K)

$m'$  - Caudal mássico (Kg/s)

$T_{ii}$  - Temperaturas habitáculo (°C)

$T_{iii}$  - Temperatura proveniente do edifício (°C)

$T_{vi}$  - Temperatura vidro interior (°C)

$R_{vi-ii}$  - Resistência condutiva e convectiva entre o  $v_2$  e o espaço “ii” (°C/W)

### 5.3 Equação da temperatura do vidro exterior ( $T_{ve}$ )

São as transferências convectivas e condutivas entre o vidro exterior e a cavidade i, radiação recebida do exterior e o próprio exterior, que permitiram a determinação desta equação energética:

$$m_{ve} C_{p_{ve}} \frac{dT_{ve}}{dt} = \frac{T_e - T_{ve}}{R_{ve_e}} + \frac{T_i - T_{ve}}{R_{ve_i}} + A_{v1} \cdot I \cdot ab_{v1} + A_{v1} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma (T_{sky}^4 - T_{v1}^4) - \frac{\varepsilon_1 (Eb_1 - J_1) \cdot A_{v1}}{1 - \varepsilon_1}$$

**(Eq. 3)**

Em que:

$ab_{v1}$  - Absorvância do vidro exterior

$A_{v1}$  - Área do vidro exterior (m<sup>2</sup>)

$C_p$  - Calor específico do vidro exterior (J/Kg.K)

$I$  - Irradiação solar (W/m<sup>2</sup>)

$T_e$  - Temperatura exterior (°C)

$T_i$  - Temperatura na caixa de lamelas (°C)

$T_{ve}$  - Temperatura vidro exterior (°C)

$R_{ve-e}$  - Resistências condutivas e convectivas entre o vidro exterior e “e” (°C/W)

R<sub>ve-i</sub> - Resistências condutivas e convectivas entre o vidro exterior e “i” (°C/W)

#### 5.4 Equação da temperatura do vidro interior (T<sub>vi</sub>)

É através do valor da temperatura que está dependente da resistência convectiva e condutiva entre os espaços i e ii que se determina a equação energética. O vidro interior absorve a radiação que foi transmitida pelo vidro exterior e altera o valor da temperatura:

$$m_{vi}Cp_{vi} \frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{T_{ii} - T_{vi}}{R_{vi-ii}} + \frac{T_i - T_{vi}}{R_{vi-i}} + (A_{v2} \cdot I \cdot \tau_{v1}) \cdot ab_v + A_{v2} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma (T_{ii}^4 - T_{v2}^4) - \frac{\varepsilon_2 (Eb_2 - J_2) \cdot A_{v2}}{1 - \varepsilon_2}$$

(Eq. 4)

Em que:

A<sub>v2</sub> - Área do vidro interior (m<sup>2</sup>)

ab<sub>v</sub> - Absorvância do vidro

Cp - Calor específico do vidro interior (J/Kg.K)

I - Irradiação solar (W/m<sup>2</sup>)

T<sub>i</sub> - Temperatura na caixa de lamelas (°C)

T<sub>ii</sub> - Temperaturas habitáculo (°C)

τ<sub>v1</sub> - Transmitância no vidro 1

T<sub>vi</sub> - Temperatura vidro interior (°C)

R<sub>vi-i</sub> - Resistências condutivas e convectivas entre o espaço i com o vidro interior (°C/W)

Rvi-ii- Resistências condutivas e convectivas entre o espaço i com o vidro interior (°C/W)

## 5.5 Equação da temperatura da lamela

Considerou-se o alumínio o material construtivo das lamelas, sendo a sua inclinação regulável. A temperatura incidente está dependente da radiação que incide, da temperatura do compartimento i e das trocas radiativas:

### 5.5.1 Equação da temperatura da parte interior da lamela (T<sub>Li</sub>)

$$m_{li} \cdot Cp_{li} \frac{dT_{Li}}{dt} = \frac{T_{arli} - T_{Li}}{R_{Li_{arli}}} + \frac{T_i - T_{Li}}{R_{Li_i}} + (ab_1 \cdot A_{li} \cdot I) \cdot \tau_{v1} - \frac{\varepsilon_1 (Eb_1 - J_1) \cdot A_1}{1 - \varepsilon_1} \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

A<sub>l</sub> - Área protegida pela parte interior das lamelas (m<sup>2</sup>)

A<sub>li</sub> - Área da parte interior das lamelas (m<sup>2</sup>)

ab<sub>1</sub> - Absorvância da lamela

Cp<sub>li</sub> - Calor específico da lamela interior (J/Kg.K)

I - Irradiação solar (W/m<sup>2</sup>)

τ<sub>v1</sub> - Transmitância no vidro 1

T<sub>i</sub> - Temperatura na caixa de lamelas (°C)

T<sub>Li</sub> - Temperatura na parte interior da lamela (°C)

T<sub>arli</sub> - Temperatura do ar dentro da lamela no lado interior (°C)

$R_{Li-i}$  - Resistência térmica entre o alumínio da lamela interior e o ar dentro da fachada ventilada (i) ( $^{\circ}C/W$ )

$R_{Li-arli}$  - Resistência térmica entre o alumínio da lamela interior e o ar dentro da lamela ( $^{\circ}C/W$ )

### 5.5.2 Equação da temperatura da parte exterior da lamela ( $T_{le}$ )

$$m_{le} \cdot C_{p_{le}} \frac{dT_{le}}{dt} = \frac{T_{ar_{le}} - T_{le}}{R_{Le_{ar_{le}}}} + \frac{T_i - T_{le}}{R_{Le_{i}}} + (ab_l \cdot Ale \cdot I) \cdot \tau_{v1} - \frac{\varepsilon_l (Eb_l - J_l) \cdot A_l}{1 - \varepsilon_l} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que:

$ab_l$  - Absorvância da lamela

$Ale$  - Área protegida pela parte exterior da lamela ( $m^2$ )

$C_{p_{le}}$  - Calor específico da lamela exterior ( $J/Kg.K$ )

$I$  - Irradiação solar ( $W/m^2$ )

$\tau_{v1}$  - Transmitância no vidro 1

$T_i$  - Temperatura na caixa de lamelas ( $^{\circ}C$ )

$T_{le}$  - Temperatura na parte exterior da lamela ( $^{\circ}C$ )

$R_{Le-ar_{le}}$  - Resistência térmica entre o alumínio da lamela exterior e o ar dentro da lamela ( $^{\circ}C/W$ )

$R_{Le-i}$  - Resistência térmica entre o alumínio da lamela exterior e o ar dentro da fachada ventilada ( $^{\circ}C/W$ )

## 5.6 Equação da temperatura do ar dentro da lamela do lado interior (Tarli)

$$m_{arli} \cdot C_{parli} \frac{dT_{arli}}{dt} = \frac{T_{li} - T_{arli}}{R_{Li-arli}} + \frac{T_{arle} - T_{arli}}{R_{arle-arli}} + ml' Cp (T_d - T_{arli}) \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que:

$C_p$  - Calor específico da lamela (J/Kg.K)

$C_{parli}$  - Calor específico do ar dentro da lamela lado interior (J/Kg.K)

$T_{li}$  - Temperatura da parte interior da lamela (°C)

$T_{arle}$  - Temperatura do ar dentro da lamela lado exterior (°C)

$T_{arli}$  - Temperatura do ar dentro da lamela lado interior (°C)

$T_d$  - Temperatura do ar injetado dentro da lamela (°C)

$ml'$  - Caudal mássico da lamela (Kg/s)

$R_{arle-arli}$  - Resistência térmica entre o ar da parte interior dentro da lamela e a parte exterior dentro da lamela (°C/W)

$R_{Li-i}$  - Resistência térmica entre o alumínio da lamela interior e o ar dentro da fachada ventilada (i) (°C/W)

## 5.7 Equação da temperatura do ar dentro da lamela no lado exterior (Tarle)

$$m_{arle} \cdot C_{parle} \frac{dT_{arle}}{dt} = \frac{T_{le} - T_{arle}}{R_{Li-arli}} + \frac{T_{arle} - T_{arle}}{R_{arle-arli}} + ml' Cp (T_{arli} - T_{arle}) \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

$C_p$  - Calor específico da lamela (J/Kg.K)

$C_{parle}$  - Calor específico do ar dentro da lamela lado exterior (J/Kg.K)

$m\dot{l}'$  - Caudal mássico da lamela (Kg/s)

Tarle - Temperatura do ar dentro da lamela lado exterior (°C)

Tarli - Temperatura do ar dentro da lamela lado interior (°C)

Td - Temperatura do ar injetado dentro da lamela (°C)

Tle - Temperatura da parte exterior da lamela (°C)

Rarle-arli - Resistência térmica entre o ar da parte interior dentro da lamela e a parte exterior dentro da lamela (°C/W)

RLe-arle - Resistência térmica entre o alumínio da lamela exterior e o ar dentro da lamela (°C/W)

RLi - Resistência condutiva e convectiva entre as lamelas e o espaço i (°C/W)

## 5.8 Dados de Entrada

Os dados de entrada considerados para proceder aos cálculos estão nas tabelas 5, 6 e 7 que se seguem:

<b>Irradiação solar (<math>W/m^2</math>)</b>	500
<b>Temperatura exterior (<math>T_e</math> °C)</b>	10 °C
<b>Ângulo da radiação</b>	39°
<b>Temperatura exterior ao habitáculo/edifício (<math>T_{iii}</math>°C)</b>	10°C
<b>Temperatura do ar injectado dentro da lamela (<math>T_d</math>°C)</b>	5°C
<b>Densidade (<math>Kg/m^3</math>)</b>	1,1614

**Tabela 5– Caso de estudo 1 –Dados de Entrada**

<b>Irradiação solar (W/m<sup>2</sup>)</b>	500
<b>Temperatura exterior (Te °C)</b>	10 °C
<b>Ângulo da radiação</b>	39°
<b>Temperatura exterior ao habitáculo/edifício (Tiii°C)</b>	10 °C
<b>Temperatura do ar injectado dentro da lamela (Td°C)</b>	5°C
<b>Massa específica (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	1,1614

**Tabela 6 – Caso de Estudo 2– Dados de Entrada**

<b>Cp (J/Kg.K)</b>	<b>Viscosidade Dinâmica (N.s/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Viscosidade Cinética (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>h (W/m<sup>2</sup>) dentro fachada</b>	<b>h (W/m<sup>2</sup>) fora fachada</b>
1007	1,846x10 <sup>-5</sup>	1,589x10 <sup>-5</sup>	4	10

**Tabela 7 – Atribuição de valores a Características Físicas do Ar**

## 5.9 Cálculo de Resistências

A tabela 8 que se segue indica as resistências térmicas a calcular e as respetivas fórmulas:

<b>Resistência</b>	<b>Fórmula</b>
R ve-e	$R_{ve-e} = \frac{1}{h_1 \cdot A_v}$
R ve-i	$R_{ve-i} = \frac{1}{h_2 \cdot A_v}$
R vi-ii	$R_{vi-ii} = \frac{1}{h_3 \cdot A_{lt}}$
R vi-i	$R_{vi-i} = \frac{1}{h_4 \cdot A_v}$
R Li-i	$R_{Li-i} = \frac{1}{h_5 \cdot A_v}$

R Le-i	$R_{Le-i} = \frac{1}{h_6 \cdot A_v}$
R Li-arli	$R_{Li-arli} = \frac{1}{h_7 \cdot A_v}$
R Le-arle	$R_{Le-arle} = \frac{1}{h_8 \cdot A_v}$
R arle-arli	$R_{arle-arli} = \frac{1}{h_9 \cdot A_{lt}}$

**Tabela 8 – Cálculo de Resistências**

Os valores de  $h_1$  a  $h_9$ , coeficiente de transferência de calor por convecção, são calculados através do modelo integral com recurso à convecção natural e forçada entre as diferentes áreas da fachada e lamelas.

### 5.9.1 Convecção Natural

Na convecção natural os movimentos do ar são provocados pela variação de densidade do mesmo. Considerando a caixa como uma placa plana vertical a velocidade do ar é nula junto à superfície. Assim considera-se que tem dois métodos de cálculo, um para quando a temperatura de superfície da placa é superior à do ar e outro para quando a temperatura de superfície da placa foi inferior à do ar.

Apresenta-se na tabela 9 as propriedades do ar que irão ser necessárias para o cálculo dos valores de convecção:

<b>Massa específica <math>\rho</math> (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	1,1614
<b>Condutibilidade térmica K(W/m.°C)</b>	0,023
<b>Coeficiente de expansão <math>\beta</math> (1/°C)</b>	$\frac{1}{T_{média}}$
<b>Viscosidade (<math>\mu</math>) (Kg/ms)</b>	0,0000158
<b>Prandl (Pr) (adimensional)</b>	0,707

**Tabela 9 – Propriedades do ar (convecção natural) para uma temperatura de 10°C**

Para as duas situações tem-se que:

- Quando  $T_{sup} > T_{ar}$ ,  $Ra$  é dado por:

$$Ra = \rho^2 * 9,8 * \beta * (T_{sup} - T_{ar}) * L^3 * \frac{Pr}{\mu^2} \quad (\text{Eq. 9})$$

- Quando  $T_{ar} > T_{sup}$ ,  $Ra$  é dado por:

$$Ra = \rho^2 * 9,8 * \beta * (T_{ar} - T_{sup}) * L^3 * \frac{Pr}{\mu^2} \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que:

- L - Dimensão característica (m)
- $\beta$  - Coeficiente de expansão (1/°C)
- $\rho$  - Massa Específica (Kg/m<sup>3</sup>)
- Pr - Número de Prandl (adimensional)
- $T_{ar}$  - Temperatura do ar (°C)
- $T_{sup}$  - Temperatura à superfície (°C)

Para valores de  $Ra < 1$  então considera-se que  $Ra = 1$ , sendo a equação para o Número de Nusselt a seguinte:

$$Nu = 0,59 * Ra^{0,25} \quad (\text{Eq. 11})$$

A equação para cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção natural é então:

$$h_N = Nu * K * L \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que:

L - Dimensão característica (m)

K - Condutibilidade térmica

### 5.9.2 Convecção Forçada

Neste tipo de convecção os movimentos do fluido são originados por uma causa mecânica diferente do fenómeno de transmissão de calor. Aqui são analisadas as situações em que a temperatura ou o fluxo são uniformes ao longo da placa.

Apresenta-se na tabela 10 as propriedades do ar que irão ser necessárias para o cálculo dos valores de convecção:

<b>Massa Específica <math>\rho</math> (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	1,1614
<b>Condutibilidade térmica K (W/m.°C)</b>	0,023
<b>Coefficiente de expansão <math>\beta</math> (1/°C)</b>	0,0000846
<b>Prandtl (Pr)</b>	0,8

**Tabela 10 – Propriedades do ar (convecção forçada) para uma temperatura de 10 °C**

A determinação do Número de Reynolds, Re, vem pela equação:

$$Re = \frac{\rho * L * v}{\mu} \quad (\text{Eq. 13})$$

Em que:

$\rho$  - Massa específica do ar

$v$  - Velocidade média do ar

$\mu$  - Viscosidade do ar

O número de Nusselt é então dado pela expressão:

$$Nu = 0,036 * Re^{0,8} * Pr^{0,3} \quad (\text{Eq. 14})$$

A equação para cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção forçada é então:

$$h_F = \frac{Nu * K}{L} \quad (\text{Eq. 15})$$

Em que:

K - Condutibilidade térmica

L - Dimensão característica (m)

Os coeficientes de transferência de calor por convecção são determinados diretamente através do software desenvolvido e estes valores são posteriormente utilizados no cálculo das respectivas resistências.

### **5.10 Cálculo das áreas**

Para os cálculos das áreas, os valores estão já identificados e referidos nas figuras e tabela de dados de entrada para cada caso, no ponto anterior. [ver figuras 2 a 11 e tabelas 2 a 4]

#### **5.10.1 Cálculo das áreas dos vidros**

$$A_{vi} = A_{ve} = \text{comp. vidro} * \text{altura. vidro}$$

Em que:

$A_{vi}$  - Área do vidro interior (m<sup>2</sup>)

$A_{ve}$  - Área do vidro exterior (m<sup>2</sup>)

Comp.vidro - Comprimento do vidro (m)

Altura.vidro - Altura do vidro (m)

## 5.10.2 Cálculo das áreas das lamelas

As áreas das lamelas para ambos os casos são calculadas de acordo com as seguintes equações e com as figuras 2 a 11.

### 5.10.2.1 Área das lamelas

$$A_{lt} = (\text{largura.lamela} * \text{comp.vidro})$$

Em que:

Alt - Área da lamela total (m<sup>2</sup>)

largura.lamela - Largura da lamela (m)

### ✓ Cálculo da área do vidro que recebe radiação solar

$$A_{vs2} = (\text{comp.vidro}) * (\text{altura.do.sol.em.v2}) * a$$

Em que:

A<sub>vs2</sub> - Área do vidro 2 que recebe o sol (m<sup>2</sup>)

a - Número de espaços que recebe radiação solar sem interferência das lamelas

altura.do.sol.em.v2 - Altura de radiação solar incidente no vidro 2 (m)

✓ **Cálculo da área da caixa de lamelas**

$$A_i = (\text{altura.caixa}) * (\text{largura.caixa})$$

Em que:

- $A_i$  - Área interior (caixa das lamelas) (m<sup>2</sup>)  
altura.caixa - Altura da caixa das lamelas (m)  
largura.caixa - Largura da caixa das lamelas (m)

**5.11 Cálculo da velocidade do ar no interior**

Para o cálculo da velocidade do ar é utilizada uma equação de integral de balanço de energia:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1^2 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + Z_2^2 - \beta \cdot H \cdot (T_i - T_{ii}) + h_{total} \quad \text{(Eq. 16)}$$

Em que:

- $\beta$  - Coeficiente de expansão (1/°C)  
 $P$  - Pressão do ar no vidro (1 ou 2) (N/m<sup>3</sup>)  
 $\rho$  - Massa específica do ar (Kg/m<sup>3</sup>)  
 $g$  - Aceleração gravitacional (m/s<sup>2</sup>)  
 $h_{total}$  - Perda de carga total (m)  
 $T_i$  - Temperatura na caixa das lamelas (°C)  
 $T_{ii}$  - Temperatura no habitáculo (°C)

$V$  - Velocidade do fluido no vidro (m/s)

$Z$  - Altura do Vidro (m)

Considerando  $P_1 = P_2 \neq 0$  e  $v_1 = v_2 = Z_1 = 0$ , resulta numa equação onde estão apresentadas as perdas de carga totais e as forças de impulsão, em que  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica  $\beta = \frac{1}{T}$ .

As perdas de carga englobam diversos elementos, dos quais deriva uma função complexa (viscosidade e densidade do fluido, velocidade de escoamento, grau de turbulência do movimento e distância percorrida).

Estas são classificadas em contínuas ou localizadas, dependendo do objetivo de possibilitar a obtenção de expressões matemáticas que permitam prever as perdas de carga.

As perdas de carga total são dadas pelas seguintes equações:

$$h_{total} = h_f + h_i \quad (\text{Eq. 17})$$

Enquanto as perdas de carga contínua são dadas pelas seguintes equações:

$$h_f = f \frac{\Delta L}{de} \cdot \frac{v^2}{2.g} \quad (\text{Eq. 18})$$

Em que:

$\Delta L$  - Altura da caixa (m)

$de$  - Diâmetro equivalente (m)

- f - Fator de atrito
- g - Aceleração gravitacional (m/s<sup>2</sup>)
- V - Velocidade do fluido no vidro (m/s)

Para valores do número de Reynolds inferiores a 2000 (regime laminar) e utilização do diagrama de Moody, o comportamento do fator de atrito pode ser obtido analiticamente por intermédio da equação de Hagen-Poiseuille conduzindo à equação:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{(Eq. 19)}$$

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que relaciona forças viscosas com as forças de inércia, e é dado por:

$$Re = \frac{\rho_{ar} \cdot v \cdot d_e}{\mu} \quad \text{(Eq. 20)}$$

Em que:

- d<sub>e</sub> - Diâmetro equivalente (m)
- ρ<sub>ar</sub> - Densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>)
- Re - Número de Reynolds
- μ - Viscosidade dinâmica (N.s/m<sup>2</sup>)
- v - Velocidade do fluido (m/s)

As perdas de carga localizadas podem ser expressas em termos de energia cinética do escoamento, onde:

$$h = k_i \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Eq. 21})$$

Em que:

$k_i$  - Coeficiente de perda de carga localizada

No final resulta a seguinte equação, para cálculo da velocidade do ar:

$$0 = -\beta * H * (T_i - T_{ii}) + f * \frac{\Delta L}{d_e} * \frac{v^2}{2g} + k_i * \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Eq. 22})$$

Em que:

$\Delta L$  - Altura da caixa (m)

$d_e$  - Diâmetro equivalente (m)

$\beta$  - Coeficiente de expansão (1/°C)

$k_i$  - Coeficiente de perda de carga localizada

$T_i$  - Temperatura na caixa de lamelas (°C)

$T_{ii}$  - Temperatura do ar (°C)

$v$  - Velocidade do fluido (m/s)

### 5.12 Caudal mássico do ar na caixa de lamelas

A equação que permite determinar o caudal mássico do ar é dada por:

$$m' = v * A_i * \rho_{ar} \quad (\text{Eq. 23})$$

Em que:

$\rho_{ar}$  - Densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>)

$A_i$  - Área interior (caixa das lamelas) (m<sup>2</sup>)

$v$  - Velocidade do fluido (m/s)

### 5.13 Cálculo do fluxo de calor

Para o cálculo do fluxo de calor é utilizada uma equação de integral de balanço de energia, utilizada também para o cálculo da velocidade do ar:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1^2 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + Z_2^2 - \beta \cdot H \cdot (T_i - T_{ii}) + h_{total} \quad (\text{Eq. 24})$$

Em que:

$\beta$  - Coeficiente de expansão (1/°C)

$P$  - Pressão do ar no vidro (N/m<sup>3</sup>)

$\rho$  - Massa específica do ar (Kg/m<sup>3</sup>)

$g$  - Aceleração gravitacional (m/s<sup>2</sup>)

$h_{total}$  - Perda de carga total (m)

$T_i$  - Temperatura na caixa das lamelas (°C)

$T_{ii}$  - Temperatura no habitáculo (°C)

$V$  - Velocidade do fluido no vidro (m/s)

$Z$  - Altura do Vidro (m)

## 5.14 Cálculo do fluxo de energia

Neste ponto apresenta-se a equação para cálculo do fluxo de energia que a fachada extrai para o ambiente exterior ou induz no interior do próprio espaço.

$$Q = m' * Cp(T_i - T_{ii}) \quad (\text{Eq. 25})$$

Em que:

- Cp - Calor específico do ar (J/Kg.K)
- $m'$  - Caudal mássico (m<sup>3</sup>/h)
- Q - Fluxo de energia (m<sup>-3</sup>m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)
- $T_i$  - Temperatura na caixa das lamelas (°C)
- $T_{ii}$  - Temperatura no habitáculo (°C)

## 5.15 Resolução do sistema de equações

O cálculo das temperaturas é efetuado através de um sistema de equações que pode aparecer sob a forma de regime transitório ou de regime permanente. Apresenta-se em seguida ambas as hipóteses para um conhecimento geral, mas os cálculos finais são apresentados pelo regime permanente.

### 5.15.1 Regime transitório

Neste regime as equações são apresentadas da seguinte forma:

- 1)  $m_i C p_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{T_{vi}-T_i}{R_{vi_i}} + \frac{T_{ve}-T_i}{R_{ve_i}} + \frac{T_{Li}-T_i}{R_{Li_i}} + \frac{T_{Le}-T_i}{R_{Le_i}} + m' C p(T_{ii} - T_i)$
- 2)  $m_{ii} C p_{ii} \frac{dT_{ii}}{dt} = \frac{T_{vi}-T_{ii}}{R_{vi_{ii}}} + m' C p(T_{iii} - T_{ii})$
- 3)  $m_{ve} C p_{ve} \frac{dT_{ve}}{dt} = \frac{T_e-T_{ve}}{R_{ve_e}} + \frac{T_i-T_{ve}}{R_{ve_i}} + A_{v1} \cdot I \cdot ab_v + A_{v1} \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma (T_{sky}^4 - T_{v1}^4) - \frac{\epsilon_1 (Eb_1 - J_1) \cdot A_{v1}}{1 - \epsilon_1}$
- 4)  $m_{vi} C p_{vi} \frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{T_{ii}-T_{vi}}{R_{vi_{ii}}} + \frac{T_i-T_{vi}}{R_{vi_i}} + (A_{vs2} \cdot I \cdot \tau_{v1}) \cdot ab_v$
- 5)  $m_{li} \cdot C p_{li} \frac{dT_{li}}{dt} = \frac{T_{arli}-T_{li}}{R_{li_{arli}}} + \frac{T_i-T_{li}}{R_{li_i}} + (ab_l \cdot Ali \cdot I) \cdot \tau_{v1}$
- 6)  $m_{le} \cdot C p_{le} \frac{dT_{le}}{dt} = \frac{T_{arle}-T_{le}}{R_{le_{arle}}} + \frac{T_i-T_{le}}{R_{le_i}} + (ab_l \cdot Ale \cdot I) \cdot \tau_{v1} - \frac{\epsilon_l (Eb_l - J_l) \cdot A_l}{1 - \epsilon_l}$
- 7)  $m_{arli} \cdot c p_{arli} \frac{dT_{arli}}{dt} = \frac{T_{li}-T_{arli}}{R_{li_{arli}}} + \frac{T_{arle}-T_{arli}}{R_{arle_{arli}}} + m' l \cdot C p(T_d - T_{arli})$
- 8)  $m_{arle} \cdot c p_{arle} \frac{dT_{arle}}{dt} = \frac{T_{le}-T_{arle}}{R_{le_{arle}}} + \frac{T_{arli}-T_{arle}}{R_{arle_{arli}}} + m' l \cdot C p(T_{arli} - T_{arle})$

### 5.15.2 Regime Permanente

Os cálculos das temperaturas neste regime foram efetuados colocando  $\frac{dT}{dt} = 0$ , eliminou-se os parâmetros não necessários e trocas radiativas, resultado assim:

- 9)  $0 = \frac{T_{vi}-T_i}{R_{vi_i}} + \frac{T_{ve}-T_i}{R_{ve_i}} + \frac{T_{Li}-T_i}{R_{Li_i}} + \frac{T_{Le}-T_i}{R_{Le_i}} + m' C p(T_{ii} - T_i)$

$$10) 0 = \frac{T_{vi}-T_{ii}}{R_{vi_{ii}}} + m' Cp(T_{iii} - T_{ii})$$

$$11) 0 = \frac{T_e-T_{ve}}{R_{ve_e}} + \frac{T_i-T_{ve}}{R_{ve_i}} + A_{v1} \cdot I \cdot ab_v$$

$$12) 0 = \frac{T_{ii}-T_{vi}}{R_{vi_{ii}}} + \frac{T_i-T_{vi}}{R_{vi_i}} + (A_{vs2} \cdot I \cdot \tau_{v1}) \cdot ab_v$$

$$13) 0 = \frac{T_{arli}-T_{li}}{R_{li_{arli}}} + \frac{T_i-T_{li}}{R_{li_i}} + (ab_l \cdot Ali \cdot I) \cdot \tau_{v1}$$

$$14) 0 = \frac{T_{arle}-T_{le}}{R_{le_{arle}}} + \frac{T_i-T_{le}}{R_{le_i}} + (ab_l \cdot Ale \cdot I) \cdot \tau_{v1}$$

$$15) 0 = \frac{T_{li}-T_{arli}}{R_{li_{arli}}} + \frac{T_{arle}-T_{arli}}{R_{arle_{arli}}} + m' l \cdot Cp(T_d - T_{arli})$$

$$16) 0 = \frac{T_{le}-T_{arle}}{R_{le_{arle}}} + \frac{T_{arli}-T_{arle}}{R_{arle_{arli}}} + m' l \cdot Cp(T_{arli} - T_{arle})$$

Resolução da equação de energia utilizada no cálculo da velocidade do ar para cálculo do fluxo de calor:

$$(9) 0 = -\beta * H * (T_i - T_{ii}) + f * \frac{\Delta L}{de} * \frac{v^2}{2g} + k_i * \frac{v1^2}{2g}$$

### Resolução das equações:

$$(10) 0 = \frac{T_{vi}}{R_{vi_i}} - \frac{T_i}{R_{vi_i}} + \frac{T_{ve}}{R_{ve_i}} - \frac{T_i}{R_{ve_i}} + \frac{T_{Li}}{R_{Li_i}} - \frac{T_i}{R_{Li_i}} + \frac{T_{Le}}{R_{Le_i}} - \frac{T_i}{R_{Le_i}} + m' Cp \cdot T_{ii} - m' Cp T_i$$

$$(11) 0 = \frac{T_{vi}}{R_{vi_{ii}}} - \frac{T_{ii}}{R_{vi_{ii}}} + m' Cp \cdot T_{iii} + m' Cp \cdot T_{ii}$$

$$(12) \quad 0 = \frac{T_e}{R_{ve\_e}} - \frac{T_{ve}}{R_{ve\_e}} + \frac{T_i}{R_{ve\_i}} - \frac{T_{ve}}{R_{ve\_i}} + A_{v1} \cdot I \cdot ab_v$$

$$(13) \quad 0 = \frac{T_{ii}}{R_{vi\_ii}} - \frac{T_{vi}}{R_{vi\_ii}} + \frac{T_i}{R_{vi\_i}} - \frac{T_{vi}}{R_{vi\_i}} + (A_{vs2} \cdot I \cdot \tau_{v1}) \cdot ab_v$$

$$(14) \quad 0 = \frac{T_{arli}}{R_{li\_arli}} - \frac{T_{li}}{R_{li\_arli}} + \frac{T_i}{R_{li\_i}} - \frac{T_{li}}{R_{li\_i}} + (ab_l \cdot Ali \cdot I) \cdot \tau_1$$

$$(15) \quad 0 = \frac{T_{arle}}{R_{le\_arle}} - \frac{T_{le}}{R_{le\_arle}} + \frac{T_i}{R_{le\_i}} - \frac{T_{le}}{R_{le\_i}} + (ab_l \cdot Ale \cdot I) \cdot \tau_1$$

$$(16) \quad 0 = \frac{T_{li}}{R_{li\_arli}} - \frac{T_{arli}}{R_{li\_arli}} + \frac{T_{arle}}{R_{arle\_arli}} - \frac{T_{arli}}{R_{arle\_arli}} + m' \cdot l \cdot Cp \cdot Td - m' \cdot l \cdot Cp \cdot T_{arli}$$

$$(17) \quad 0 = \frac{T_{le}}{R_{le\_arle}} - \frac{T_{arle}}{R_{le\_arle}} + \frac{T_{arli}}{R_{arle\_arli}} - \frac{T_{arle}}{R_{arle\_arli}} + m' \cdot l \cdot Cp \cdot T_{arli} - m' \cdot l \cdot cp \cdot T_{arle}$$

Resolução da equação de energia utilizada no cálculo da velocidade do ar para cálculo do fluxo de calor:

$$(18) \quad 0 = -\beta * H * (T_i - T_{ii}) + f * \frac{\Delta L}{de} * \frac{v^2}{2g} + k_i * \frac{v1^2}{2g}$$

## 6. Resultados

Os resultados obtidos estão indicados nas tabelas seguintes, comparando ambos os casos:

<b>Resultados</b>	<b>Caso de Estudo 1</b>	<b>Caso de Estudo 2</b>
<b>Resistência térmica entre o alumínio da lamela interior e o ar dentro da fachada ventilada (i) (RLi i)</b>	5,1	11,37
<b>Resistência térmica entre o ar da parte interior dentro da lamela e a parte exterior dentro da lamela (Rarlearli)</b>	40637	22423
<b>Resistência térmica entre o vidro exterior e o ar exterior (Rve e)</b>	1,318	1,374
<b>Resistência térmica entre o alumínio da lamela exterior e o ar dentro da lamela (RLearle)</b>	40637	22423
<b>Resistência térmica entre o vidro exterior e o ar dentro da fachada ventilada (i) (Rve i)</b>	1,502	1,404
<b>Resistência térmica entre o alumínio da lamela exterior e o ar dentro da fachada ventilada (i) (Rle i)</b>	5,1	11,37
<b>Resistência térmica entre o alumínio da lamela interior e o ar dentro da lamela (RLiarli)</b>	40637	22423
<b>Resistência térmica entre o vidro interior e o ar do compartimento (ii) (Rvi ii)</b>	2,722	1,809
<b>Resistência térmica entre o vidro interior e o ar dentro da fachada ventilada (i) (Rvi i)</b>	1,502	1,926

**Tabela 11 – Tabela de comparação de resultados de resistências térmicas dos Casos de Estudo 1 e 2**

<b>Resultados</b>	<b>Caso de Estudo 1</b>	<b>Caso de Estudo 2</b>
<b>Temperatura do ar dentro da lamela lado exterior (Tarle)</b>	47,89	77,17
<b>Temperatura da sala (Tii)</b>	20,03	10,24
<b>Temperatura do vidro exterior (Tve)</b>	38,76	34,15
<b>Temperatura do ar dentro da lamela lado interior (Tarli)</b>	43,83	72,78
<b>Temperatura fora da sala (Tiii)</b>	20	10
<b>Temperatura do vidro interior (Tvi)</b>	21,59	18,05
<b>Temperatura do ar injetado dentro das lamelas (Td)</b>	10	10
<b>Temperatura da parte exterior da lamela (Tle)</b>	53,62	82,56
<b>Temperatura exterior (Te)</b>	10	10
<b>Temperatura da parte interior da lamela (TLi)</b>	53,62	82,56
<b>Temperatura da fachada ventilada (Ti)</b>	21,39	11,95

**Tabela 12 – Tabela de Comparação de resultados de temperaturas dos Casos de Estudo 1 e 2**

<b>Resultados</b>	<b>Caso de Estudo 1</b>	<b>Caso de Estudo 2</b>
<b>Velocidade do ar na caixa de lamelas (v)</b>	0,08774	0,09022
<b>Velocidade do ar nas lamelas (v'l)</b>	0,00000774	0,00005357

**Tabela 13 – Tabela de Comparação de Resultados de velocidades dos Casos de Estudo 1 e 2**

<b>Caudal mássico da caixa de lamelas (m³)</b>	0,01771	0,01821
--	---------	---------

**Tabela 14 – Tabela de comparação de resultados de caudal mássico dos Casos de Estudo 1 e**

**2**

Efetuando uma análise aos resultados finais de temperaturas, velocidade do ar e caudal mássico, chegou-se às seguintes conclusões:

- ✓ Em termos de temperaturas, consegue-se atingir menores valores na sala utilizando as características da fachada ventilada do caso de estudo 2;
- ✓ Em termos de velocidade do ar, tanto na caixa de lamelas como nas próprias lamelas, é relativamente superior na fachada ventilada do caso de estudo 2. Tal situação deve-se ao facto de estas terem menor tamanho e espaço entre elas, o que consequentemente aumenta a velocidade de circulação do ar;
- ✓ O caudal mássico na caixa de lamelas é superior no caso de estudo 2, devendo-se ao facto da menor dimensão das lamelas permitir uma maior área de ar na caixa e consequentemente um maior caudal.

Na tabela 15 apresentam-se os valores de caudal volúmico para ambos os casos de estudo. Estes permitem assim determinar o caudal de renovação do ar, que é dado pela área de fachada existente e a velocidade do ar.

	<b>Caso de Estudo 1</b>	<b>Caso de Estudo 2</b>
<b>Caudal volúmico (m<sup>3</sup>/h)</b>	0,01771 kg/s 54,96m <sup>3</sup> /h	0,01821m <sup>3</sup> /s 56,51m <sup>3</sup> /h
<b>Área fachada (m<sup>2</sup>)</b>	0,80 m <sup>2</sup>	

**Tabela 15 – Valores resultantes para cálculo de caudal de renovação de ar**

Dado que para uma pessoa é necessário pelo menos um caudal de 35m<sup>3</sup>/h, o número de pessoas que o caudal, para o caso de estudo 1 e caso de estudo 2, satisfaz é dado pela expressão que se segue:

Para o caso de estudo 1, tem-se que:

$$n^{\circ} \text{ pessoas} = \frac{\text{caudal volúmico dado}}{\text{caudal volúmico/pessoa}} = \frac{54,96}{35} = 1,57 \approx 1 \text{ pessoas}$$

Para o caso de estudo 2, tem-se que:

$$n^{\circ} \text{ pessoas} = \frac{\text{caudal volúmico dado}}{\text{caudal volúmico/pessoa}} = \frac{56,51}{35} = 1,61 \approx 1 \text{ pessoas}$$

Na tabela seguinte podem ser observados os valores calculados:

	<b>Caudal volúmico (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Número de pessoas</b>
<b>Caso de Estudo 1</b>	54,96m <sup>3</sup> /h	1
<b>Caso de Estudo 2</b>	56,51m <sup>3</sup> /h	1

**Tabela 16 – Tabela de relação de valores caudal volúmico / número de pessoas**

Ou seja, para o caudal volúmico que nos é dado, pode-se ter 1 pessoas numa sala com uma fachada destas dimensões.

Assim sendo, é possível prever que para uma fachada de uma moradia, com uma área de fachada por exemplo 5m x 3m, qual a quantidade “fachadas” idênticas a esta é possível ter para atingir níveis de qualidade do ar aceitáveis. Logo, se, para uma área de fachada de 0,80 m<sup>2</sup> pode-se ter uma pessoa, então para uma área de 15 m<sup>2</sup> já se tem uma margem de 18 pessoas em simultâneo no compartimento com este tipo de fachada ventilada.

Os valores do fluxo de energia, para cada caso de estudo e de acordo com a (Eq.25), são:

	<b>Caudal volúmico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Fluxo de Energia (W)</b>
<b>Caso de Estudo 1</b>	0,01771	26.30
<b>Caso de Estudo 2</b>	0,01821	36,42

**Tabela 17 – Tabela de relação de valores caudal volúmico / número de fluxo de energia**

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que o caso 2, fachada com lamelas pequenas amovíveis, tem um maior fluxo de energia que o caso 1, fachada com lamelas grandes fixas, permite uma maior fluidez do ar.

## **7. Perspetivas Futuras**

Como perspectivas de evolução futura, o estudo deve ser aprofundado de forma a aperfeiçoar os resultados e métodos construtivos, não só em termos de modelação integral mas também em termos de modelação diferencial, por forma a obter as variações de escoamentos, intensidades de turbulências e outros parâmetros importante relevância.

O cálculo do campo de velocidade e temperatura no interior da fachada através de software baseado em modelos de Método Computacional de Dinâmica de Fluidos é também uma mais-valia.

Poderá também avaliar-se a hipótese de cálculo de toda a taxa de renovação do ar experimental, de forma a se poder validar o modelo através de dados experimentais e poder aplicar este modelo a fachadas de maiores dimensões.

## 8. Conclusão

Após todo o estudo e avaliação de utilização de fachadas com camada de vidro duplo ventiladas, com um dispositivo amovível de sombreamento no seu interior, pode-se concluir que é possível atingir níveis de qualidade do ar interior bastante aceitáveis.

São as lamelas e a possibilidade de regular a inclinação das mesmas em função da radiação solar e da temperatura que permite controlar a temperatura interior sem pôr em prática o recurso a equipamentos elétricos para a climatização do espaço.

Em termos de temperaturas, consegue-se atingir valores bastantes aceitáveis no habitáculo, principalmente no caso de estudo 2.

Em termos de velocidade do ar e caudal mássico, tanto na caixa de lamelas como nas próprias lamelas os valores a atingir são bastante favoráveis, embora a velocidade e caudal serem menores no caso de estudo 1. Esta diferença deve-se ao facto de as lamelas terem maior tamanho e espaço entre elas, o que consequentemente diminui a velocidade de circulação do ar e o caudal mássico.

O fluxo de energia no caso de estudo 2 é maior, o que permite uma maior fluidez do ar na fachada.

Pode-se ainda afirmar que no caso de estudo 1 e devido ao facto das lamelas apresentarem maior espaço entre si, a quantidade de radiação solar que passa através das mesmas é muito pouca, enquanto no caso de estudo 2 é praticamente nula.

Assim, conclui-se que em termos de qualidade de ar interior e valores, quer de temperaturas e velocidades de ar como caudal mássico, o caso de estudo 2 tem melhores probabilidades de, futuramente, ser um modelo a estudar e aplicar na construção.

Com este estudo é possível prever, teoricamente, a quantidade de pessoas que se pode garantir qualidade do ar numa habitação. A importância de melhoria da qualidade do ar interior, do conforto térmico e consequentemente a obtenção de redução significativa de consumo energético de vários sistemas de ventilação estão cada vez mais assentes, por isso pretende-se estudar novas metodologias que o permitam.

Apresenta-se assim algumas das vantagens mais consideráveis que se pode obter num curto, médio e longo prazo:

- ✓ A curto prazo:
  - Imagem moderna e robusta
  - Construção limpa e eficaz
  - Estética evoluída
  
- ✓ A médio prazo:
  - Conforto térmico continuado
  - Economia acentuada nos custos de climatização, tanto no Inverno como no Verão
  - Revestimento que não se desgasta com a passagem dos anos e que não apresenta as patologias comuns dos revestimentos tradicionais
  
- ✓ A longo prazo
  - Diminuta exigência ou mesmo ausência de manutenção
  - Componentes interiores do edifício com maior duração e eficácia prolongada

## 9. Referências bibliográficas

- Abreu, Isabel; Corvacho, Helena - Os novos desafios tecnológicos na reabilitação energética de paredes exteriores de edifícios. *Construção Magazine*. ISSN 1645-1767. 35, p.23-28, 2010, editora Engenho e Media Lda, Grupo Publindustica
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA), 2013
- Baldinelli, G., Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Buildings and Environment*, Vol.44, 2009, 1107-1118
- Balocco C., A simple model to study ventilated facades energy performance, *Energy and Building* 34 (2002) 469-475
- Balocco, Carla; Colombari, Massimo; Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed façade: Non-dimensional analysis, *Energy and Buildings* 38 (2006) 1–7
- D. Valentína, A. Guardoa, E. Egusquiza, C. Valeroa, P. Alavedra, Use of Coanda nozzles for double glazed façades forced ventilation, *Energy and Buildings* 62, 2013, 605–614
- DGEG – Direção geral de energia e geologia, 2014
- E. Ruano, E. M. Crispim, E. Z. E. Conceição e M<sup>a</sup> M. J. R. Lúcio "Prediction of Building's Temperature Using Neural Networks Models", *Energy and Buildings*, Vol. 38, N<sup>o</sup> 6, Junho 2006, pág. 682-694
- E. Z. E. Conceição, “Conservação de Energia em Sistemas Térmicos: Aplicação da Modelação Integral”, *Unidade de Ciências Exactas e Humanas, Universidade do Algarve*, pág 218+-259, 2013
- E. Z. E. Conceição, M<sup>a</sup> M. J. R. Lúcio, T. L. Capela e A. I. P. V. Brito "Evaluation of Thermal Comfort in Slightly Warm Ventilated Spaces in Non-Uniform Environments", *International Journal on Heating Air Conditioning and Refrigerating Research*, ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., EUA, Vol. 12, N<sup>o</sup> 3, Julho 2006, pág. 451-458
- E. Z. E. Conceição e M<sup>a</sup> M. J. R. Lúcio "Air Quality Inside Compartments of a School Building: Air Exchange Monitoring, Evaluation of Carbon Dioxide and Assessment of

Ventilation Strategies", The International Journal of Ventilation, Reino Unido, Vol. 5, N. 2, September 2006, pág. 259-270

- E. Z. E. Conceição, M<sup>a</sup> M. J. R. Lúcio e A. I. P. V. Brito "Avaliação das Condições de Conforto Interior em Espaços de Grande Dimensão: Parte II. Condições de Inverno", Revista de Informação Técnica e Científica Construção Magazine, N<sup>o</sup> 19, 1<sup>o</sup> Trimestre de 2007
- E. Z. E. Conceição e M<sup>a</sup> M. J. R. Lúcio "Conforto em Espaços Climatizados de Edifícios Escolares: Parte II. Risco de Resfriamento e Incomodidade", Revista O Instalador, N<sup>o</sup> 140, Dezembro de 2007, pág. 48-51
- E. Z. E. Conceição, V. D. S. R. Vicente e M<sup>a</sup> M. J. R. Lúcio "Airflow Inside School Buildings Office Compartments With Moderate Environment", International Journal on Heating Air Conditioning and Refrigerating Research, ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., EUA, Vol. 14, N<sup>o</sup> 2, Março 2008, pág. 195-207
- E. Z. E. Conceição e M<sup>a</sup> M. J. R. Lúcio "Numerical Study of the Influence of Opaque External Trees with Pyramidal Shape in the Thermal Behaviour of a School Building in Summer Conditions", Indoor and Building Environment, December 2010; Vol. 19, 6: pp. 657-667
- Gratia, Elisabeth e Herde, André de, The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. Energy and Buildings, Vol. 39, 2007, 364-373
- Guardoa, M. Coussiratb, C. Valeroa, E. Egusquiza, P. Alavedrac, CFD assessment of the performance of lateral ventilation in Double Glazed Façades in Mediterranean climates, Energy and Buildings, 2011
- Max Fordham & Partners, 42/43 Gloucester Crescent, London, NW1 7PE, UK, Natural ventilation, Renewable Energy 19, 2000, 17±37
- Manz, H. - Total solar energy transmittance of glass double façades with free convection. Energy and buildings. Vol 36 (2)., 2004, 127-136pp
- Manz, H.; Schaelin, A. and Simmler, H. - Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double façades. Building and Environment, 39, 2004, 1023 – 1033
- Manz, H; Franco, Th. - Thermal simulation of buildings with double-skin façades- Energy and buildings. Vol 37, 2005, 1114-1121

- Schulze, Tobias; Eicker, Ursula; Controlled natural ventilation for energy efficient buildings, *Energy and Buildings* 56, 2013, 221-232