

QUANTIFICAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS

Modelo de Cálculo

VITOR GOUVEIA PEREIRA MENDES

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

Orientadora: Professora Helena Corvacho

MARÇO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

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

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais e ao meu irmão,
pelo amor e apoio ao longo da minha vida.

À Paula,
pelo incentivo e companheirismo.

*“Hai un buraco na parede por onde às veces
entra a luz e podo ver o outro lado do muro.*

Chámanlle o Mundo”

Diego Alfonsín Rivero

AGRADECIMENTOS

Sendo esta dissertação a recta final de uma longa caminhada de vários anos, não posso deixar de agradecer com apreço todo o apoio, compreensão e amizade, daqueles que, de alguma forma, marcaram a minha vida e o decorrer deste trabalho.

À Professora Maria Helena Corvacho, pela sua orientação científica e incansável empenho, dedicação, paciência e disponibilidade, cuja experiência e conhecimentos tornaram possível a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Vasco Freitas, pelo impulso e ajuda à realização e pelo apoio e conhecimentos transmitidos, imprescindíveis na fase inicial deste projecto.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela amizade e companheirismo que sempre nos uniu.

Aos meus Pais e Irmão, que me acompanharam e apoiaram, desde sempre e em toda esta jornada.

À Paula, pela força e motivação que desde cedo me incutiu para a finalização desta etapa.

A Todos... o meu mais sincero OBRIGADO!

RESUMO

As questões da sustentabilidade ambiental e a necessidade de reduzir os consumos de energia aumentaram o interesse na eficiência energética dos edifícios. O relevo que estas questões foram adquirindo ao longo dos anos motivou o desenvolvimento de ferramentas computacionais de cálculo automático, mais ou menos complexas, que simulavam as trocas de energia nos edifícios ou nos seus componentes.

Os vãos envidraçados foram e continuam a ser objecto de diversos estudos que procuram desenvolver modelos matemáticos que permitam integrar, nas ferramentas computacionais, os modos de transferência de calor que ocorrem nos vãos envidraçados, de forma cada vez mais realista. Todos os programas computacionais são conjuntos de comandos e expressões que podem facilmente ocupar milhares de linhas de programação tornando os programas quase tão complexos quanto a realidade que pretendem explicar.

Actualmente existem poucas ferramentas que permitam realizar, de forma rápida e simplificada, o cálculo automático do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados. Além disso, as normas que especificam o método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados não são de aplicação prática. Surge assim a necessidade de sistematizar um método de cálculo simplificado e implementá-lo sob a forma de um software de cálculo automático.

O presente trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de uma ferramenta sob a forma de um programa de cálculo automático, actual e de fácil manuseamento, que avalie o coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados devido aos seus elementos constituintes e suas características térmicas, tendo como referência os modelos de transferência de calor e os métodos simplificados de cálculo existentes nas normas europeias. Denominado por **U_vVal**, caracteriza-se por conter um ambiente de desenvolvimento integrado totalmente gráfico que permite uma interacção amigável entre o utilizador e o programa.

PALAVRAS-CHAVE: Vão envidraçado, Janela, Transmissão Térmica, Energia, Software

ABSTRACT

The environmental sustainability questions and the need to reduce the energy consumptions had increased the interest in buildings energy efficiency. The relief that these questions had been acquiring throughout the years motivated the development of computational tools of calculation, more or less complex, that simulated energy exchanges in buildings or its components.

Windows had been and continue to be, the object of several studies in order to develop mathematical models to integrate the effective heat transference that occurs in windows systems in computational tools. All computational programs are a set of commands and expressions that can easily occupy thousand of programming lines making the programs almost as complex as the reality they intend to explain.

Currently there are few computational tools that carry a fast and simplified calculation of the thermal transmittance of windows. Moreover, the European Standards that specify the calculation method of the thermal transmittance of windows are not practical to apply. Therefore, it is necessary to systematize a simplified calculation method and to implement it under the form of a computer program.

The goal of the present work is to develop a tool under the form of a computational program, current and easy to use, that evaluates windows thermal transmission due to its elements and its thermal characteristics, based on the heat transference models and simplified methods of calculation specified in the European Standards. The developed software, called as UwVal, is characterized for containing a graphical integrated development environment allowing a friendly interaction between the user and the program.

KEYWORDS: Windows, Fenestration, Thermal Transmittance, Energy, Software

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJECTIVOS E PLANO DE TRABALHO	2
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. MODELOS TEÓRICOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	6
2.2.1. CONDUÇÃO	7
2.2.1.1. Equação Geral da Condução	9
2.2.1.2. Casos Particulares	11
2.2.2. CONVECÇÃO	11
2.2.3. RADIAÇÃO	13
2.3. TERMINOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DE VÃOS ENVIDRAÇADOS	14
2.3.1. ELEMENTOS CONSTITUINTES DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS - TERMINOLOGIA	14
2.3.2. CLASSIFICAÇÃO DE JANELAS E PORTAS	16
2.4. TECNOLOGIA DOS ENVIDRAÇADOS - COMPONENTES PRINCIPAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS	22
2.4.1. VIDRO	22
2.4.1.1. Tipos de Vidro	23
2.4.1.2. Revestimentos de Baixa Emissividade (Low – E)	25
2.4.1.3. Aplicação de Gás no Espaço de Ar	27
2.4.2. CAIXILHARIA	28
2.4.2.1. Caxilharia de Madeira	29
2.4.2.2. Caxilharia Metálica	31
2.4.2.3. Caxilharia de Plástico	34
2.4.2.4. Caxilharia Composta	36
2.4.2.5. “Novos Materiais”	38
2.4.3. PERFIL INTERCALAR (ESPAÇADOR)	38

2.4.3.1. Intercalares de baixa condutividade	39
2.4.4. DISPOSITIVOS DE OCLUSÃO	39
2.5. DESEMPENHO TÉRMICO DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS	44
2.5.1. O VIDRO E A ENERGIA.....	45
2.5.1.1. Perdas Térmicas.....	45
2.5.1.2. Ganhos Solares	46
2.5.1.3. Risco da Ocorrência de Condensações	47
2.5.2. CONTRIBUIÇÃO DA CAIXILHARIA PARA O DESEMPENHO TÉRMICO	49
2.5.2.1. Estrutura e o Desempenho Térmico.....	49
2.5.2.2. MODELO EUROPEU VS MODELO AMERICANO.....	49
2.5.2.3. Modelação do Efeito das Cavidades na Transferência de Calor	50
2.5.3. EFEITO DA CAIXILHARIA E DO PERFIL INTERCALAR NO U DO VÃO ENVIDRAÇADO.....	52
2.5.4. EFEITO DO DISPOSITIVO DE OCLUSÃO NA PERFORMANCE DO VÃO ENVIDRAÇADO	53
2.6. REGULAMENTOS E TABELAS TÉCNICAS NACIONAIS	55
2.6.1. TABELAS DO ITE 50 – U DE VÃOS ENVIDRAÇADOS	55
2.6.2. RCCTE – REGULAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE CONFORTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS.....	57
2.7. SOFTWARE DE CÁLCULO AUTOMÁTICO UTILIZADO ACTUALMENTE	58
2.7.1. WIS	59
2.7.2. THERM 6 E O WINDOW 6.....	60
3. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA SEGUNDO A NORMA EN10077	63
3.1. INTRODUÇÃO	63
3.2. MÉTODOS DE CÁLCULO.....	63
3.3. CAMPO DE APLICAÇÃO.....	64
3.4. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO ENVIDRAÇADO.....	64
3.4.1. ÁREA DO VIDRO/PAINEL	64
3.4.2. PERÍMETRO DO VIDRO/PAINEL	64
3.4.3. ÁREA DA CAIXILHARIA.....	65
3.4.4. ÁREA DA JANELA.....	66
3.5. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA DO VIDRO	66
3.5.1. RESISTÊNCIA TÉRMICA DE ESPAÇOS DE AR NÃO VENTILADOS	66
3.5.2. EN673 – VIDRO NA CONSTRUÇÃO - MÉTODO DE CÁLCULO DO U	67

3.5.2.1. Campo de aplicação.....	67
3.5.2.2. Fórmula Base do U	67
3.5.2.3. Condutância térmica total do envidraçado.....	68
3.5.2.4. Condutância térmica da camada de gás.....	68
3.5.2.5. Emissividade Normal e Corrigida.....	70
3.5.2.6. Propriedades do gás	71
3.5.2.7. Coeficiente exterior e interior de transmissão de calor.....	72
3.5.2.8. Método Iterativo – Cálculo do U de envidraçados com mais do que uma camada de gás.....	73
3.5.2.9. U projecto vs U declarado.....	74
3.6. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA DA CAIXILHARIA	75
3.6.1. CAIXILHARIA DE PLÁSTICO.....	75
3.6.2. CAIXILHARIA DE MADEIRA.....	76
3.6.3. CAIXILHARIA DE METAL	77
3.7. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR DA INTERACÇÃO ENTRE CAIXILHARIA/VIDRO/PERFIL INTERCALAR.....	79
3.7.1. PERFIS INTERCALARES DE ALUMÍNIO E AÇO	80
3.7.2. PERFIS INTERCALARES COM DESEMPENHO TÉRMICO MELHORADO	80
3.8. RESISTÊNCIA TÉRMICA ADICIONAL DO DISPOSITIVOS DE OCLUSÃO NOCTURNA	82
3.8.1. PERMEABILIDADE.....	82
3.8.2. RESISTÊNCIA TÉRMICA ADICIONAL.....	83
3.9. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA DA JANELA	84
3.9.1. JANELA/PORTA SIMPLES	84
3.9.2. JANELA/PORTA DUPLA	85
3.9.3. JANELA/PORTA DE DUPLA FOLHA NO MESMO ARO	86
3.9.4 JANELA COM DISPOSITIVO DE OCLUSÃO FECHADO	86
4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	89
4.1. JANELA SIMPLES COM VIDRO TRIPLO LOW-E	89
4.1.1. DADOS INICIAIS.....	89
4.1.2. TRANSMISSÃO TÉRMICA DO VIDRO DUPLO U_g	90
4.1.3. TRANSMISSÃO TÉRMICA DA CAIXILHARIA DE MADEIRA	93
4.1.4. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR Ψ	94

4.1.5. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA U_w DA JANELA.....	94
4.2. JANELA SIMPLES EM ALUMÍNIO COM VIDRO TRIPLO LOW-E	94
4.2.1. DADOS INICIAIS.....	94
4.2.2. TRANSMISSÃO TÉRMICA DO VIDRO DUPLO U_G	95
4.2.3. TRANSMISSÃO TÉRMICA DA CAIXILHARIA DE MADEIRA.....	98
4.2.4. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR Ψ	99
4.2.5. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA U_w DA JANELA.....	99
5. MODELO DE CÁLCULO AUTOMÁTICO PROPOSTO - UwVAL.....	101
5.1. INTRODUÇÃO	101
5.2. CAMPO DE APLICAÇÃO.....	101
5.3. DESCRIÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO AUTOMÁTICO DESENVOLVIDO	102
5.3.1. ESTRUTURA DO PROGRAMA.....	102
5.3.2. CARACTERIZAÇÃO GERAL.....	103
5.3.3. DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO	106
5.3.3.1. Identificar o Vão Envidraçado.....	106
5.3.3.2. Definir das Características Geométricas	107
5.3.3.3. Determinar as Características do Vidro	108
5.3.3.4. Definir a Caixilharia.....	110
5.3.3.5. Introduzir o Perfil Intercalar	114
5.3.3.6. Determinar a Permeabilidade do Dispositivo de Oclusão	116
5.3.3.7. Introduzir o Pannel.....	117
5.3.3.8. Resumo das Características do Vão Envidraçado.....	118
5.3.3.9. Cálculo do Coeficiente de Transmissão Térmica do Vão Envidraçado	119
5.3.4. POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES.....	120
5.4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO E VALIDAÇÃO	120
5.4.1. JANELA SIMPLES EM MADEIRA - METAL COM VIDRO DUPLO LOW-E	120
5.4.2. JANELA SIMPLES EM ALUMINIO COM VIDRO TRIPLO LOW-E	124
5.5. ANÁLISE ECONÓMICA.....	127
5.5.1. CUSTO GLOBAL.....	127
5.5.2. CÁLCULO DO PERÍODO DE RETORNO	128

5.5.3. APLICAÇÃO DA ANÁLISE ECONÓMICA E VALIDAÇÃO COM O OPTITERM..... 128

6. CONCLUSÕES 131

BIBLIOGRAFIA..... 133

ANEXO A 137

ANEXO B 143

ANEXO C 149

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Modos e mecanismos de transporte e meios onde podem ocorrer (adaptado de [5])
- Figura 2.2 – Modelo de análise para a condução unidimensional
- Figura 2.3 – Variação da condutibilidade térmica de alguns materiais com a densidade [4]
- Figura 2.4 – Variação da condutibilidade térmica de alguns materiais com a temperatura [4]
- Figura 2.5 – Balanço energético para o elemento de volume infinitesimal (adaptado de [5])
- Figura 2.6 – Elemento de volume infinitesimal para avaliar a condução de calor
- Figura 2.7 – Representação esquemática da convecção natural
- Figura 2.8 – Espectro electromagnético (adaptado de [27])
- Figura 2.9 – Definição dos elementos da janela (adaptado de [25])
- Figura 2.10 – Definição dos elementos da porta (adaptado de [25])
- Figura 2.11 – Tipos de janela/porta [6]
- Figura 2.12 – Caixilho fixo e Janela Fixa [6][26]
- Figura 2.13 – Janela/porta de batente de uma folha [6][26]
- Figura 2.14 – Janela pivotante de eixo vertical, horizontal e descentrado [6][25]
- Figura 2.15 – janela pivotante múltipla vertical e horizontal [6][25]
- Figura 2.16 – Janela de guilhotina (com uma ou duas folhas móveis) [6][28]
- Figura 2.17 – Janela/porta de correr (com uma ou duas folhas móveis) [6][29]
- Figura 2.18 – Janela oscilo-paralela [6][25]
- Figura 2.19 – Janela elevadora de correr [6][25]
- Figura 2.20 – Janela oscilo-batente [6][26]
- Figura 2.21 – Janela basculante [6][26]
- Figura 2.22 – Janela projectante [6][26]
- Figura 2.23 – Janela à italiana [6][26]
- Figura 2.24 – Janela de eixo vertical deslizante de abrir para o exterior [6][26]
- Figura 2.25 – Janela/porta de acordeão [6][30]
- Figura 2.26 – Porta de correr, sobreposta à parede ou no seu interior [6][26]
- Figura 2.27 – Representação de um vidro laminado num sistema de vidro duplo [39]
- Figura 2.28 – Representação esquemática e pormenor construtivo de um vidro de isolamento térmico (vidro duplo) [14]
- Figura 2.29 – Coeficiente de transmissão térmica do vidro em função do gás aplicado e da espessura do espaço de ar [24]
- Figura 2.30 – Perfil de uma caixilharia de madeira [45]

- Figura 2.31 – Perfil de uma caixilharia de madeira [23]
- Figura 2.32 – Perfil de uma caixilharia de alumínio [25]
- Figura 2.33 – Perfil de uma caixilharia de alumínio tradicional (sem corte térmico)
- Figura 2.34 – Perfil de uma caixilharia de alumínio com corte térmico e seus elementos constituintes (adaptado de [25])
- Figura 2.35 – Caixilharia de alumínio com corte térmico e representação esquemática (adaptado de [38])
- Figura 2.36 – Caixilharia de PVC
- Figura 2.37 – Perfil de uma caixilharia de PVC (adaptado de [37])
- Figura 2.38 – Caixilharia composta de alumínio-madeira [43]
- Figura 2.39 – Caixilharia composta de PVC-madeira [25]
- Figura 2.40 – Caixilharia composta de PVC-alumínio [25]
- Figura 2.41 – Caixilharia composta de alumínio-PVC-madeira de uma janela de correr [25]
- Figura 2.42 – Perfis Intercalares [28]
- Figura 2.43 – Exemplos de dispositivos de sombreamento – Portadas (edifício da foz do porto à esquerda, residência universitária de Coimbra à direita) [46]
- Figura 2.44 – Portadas de um edifício de habitação em Carabanchel[47]
- Figura 2.45 – Exemplos de dispositivos de sombreamento – Brise-Soleils [34]
- Figura 2.46 – Palas horizontais e verticais da Cité-Refuge de l’Armée du Salut, de Le Corbusier, em Paris [52]
- Figura 2.47 – Exemplo de pala horizontal a funcionar como “light shelve” [50] [51]
- Figura 2.48 – Brise-soleils [49]
- Figura 2.49 – Portadas [25]
- Figura 2.50 – Venezianas [49]
- Figura 2.51 – Réguas horizontais e estores [25] [48]
- Figura 2.52 – Telas de rolo vertical aplicada no exterior e interior [49]
- Figura 2.53 – Cortinas de bandas verticais e romana [49]
- Figura 2.54 – Toldos [49]
- Figura 2.55 – Vidros avançados de controlo solar [49]
- Figura 2.56 – Balanço da energia solar incidente no vidro [53]
- Figura 2.57 – Humidade relativa e temperatura para a ocorrência de condensação em vários sistemas envidraçados [36]
- Figura 2.58 – Perfil de uma caixilharia de madeira-metal e representação das linhas isotérmicas [15]
- Figura 2.59 – Transformar uma cavidade não rectangular numa cavidade rectangular equivalente, segundo a norma ISO 10077-2 [15]
- Figura 2.60 – Caixilharia com painel isolante. Modelo de cálculo de U_f . ISO 10077-2 [15]
- Figura 2.61 – Caixilharia com o vidro duplo. Modelo de cálculo de ψ . ISO 10077-2 [15]

Figura 2.62 – Efeito na temperatura da superfície interior do envidraçado devido ao uso de diferentes perfis intercalares [35]

Figura 2.63 – Efeito do material da caixilharia, com diferentes perfis intercalares, para a temperatura na superfície interior do envidraçado [35]

Figura 2.64 – Resultados da simulação para seis sistemas envidraçados com e sem dispositivo de oclusão [54]

Figura 2.65 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia de madeira [57]

Figura 2.66 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia de metálica [57]

Figura 2.67 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia metálica com corte térmico [57]

Figura 2.68 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia de plástico [57]

Figura 2.69 – Ecrã inicial do WIS

Figura 2.70 – Módulos (Vão Envidraçado e vidro)

Figura 2.71 – Interface para a definição das características do envidraçado (Window 6)

Figura 2.72 – Simulação de um sistemas envidraçados – isolinhas de temperaturas (Therm 6)

Figura 2.73 – Interface para a simulação dos sistemas envidraçados (Therm 6)

Figura 3.1 – Área do vidro/bandeira [7]

Figura 3.2 – Perímetro do vidro/bandeira [7]

Figura 3.3 – Representação das várias áreas [7]

Figura 3.4 – Espaço mínimo entre paredes das câmaras ocas [7]

Figura 3.5 – Espessuras da caixilharia para vários sistemas envidraçados [7]

Figura 3.6 – U_f das caixilharias de madeira e metal-madeira em função da espessura da caixilharia [7]

Figura 3.7 – Valores de U_{f0} para caixilharias metálicas com corte térmico [7]

Figura 3.8 – Perfil tipo 1: corte térmico com $0,2 < \lambda \leq 0,3 \text{ W/(m.K)}$ [7]

Figura 3.9 – Perfil tipo 2: corte térmico com $0,1 < \lambda \leq 0,2 \text{ W/(m.K)}$ [7]

Figura 3.10 – perfil intercalar oco [7]

Figura 3.11 – perfil intercalar sólido [7]

Figura 3.12 – Definição das frinchas [7]

Figura 3.13 – Ilustração de uma janela simples (adaptado de [7]).

Figura 3.14 – Ilustração de uma janela dupla (adaptado de [7]).

Figura 3.15 – Ilustração de uma janela de dupla folha no mesmo aro (adaptado de [7]).

Figura 3.16 – Ilustração de uma janela com dispositivo de oclusão exterior fechado (adaptado de [7]).

Figura 4.1 – Janela simples em madeira-metal (adaptado de [43])

Figura 4.2 – caixilharia com madeira e metal

Figura 4.3 – Janela simples em alumínio (adaptado de [25])

Figura 4.4 – Caixilharia de alumínio

Figura 5.1 – Janela de início

Figura 5.2 – Barra de ferramentas

Figura 5.3 – Barra de estado

Figura 5.4 – Interface para introduzir os dados de entrada

Figura 5.5 – Separadores da interface para introduzir os dados de entrada

Figura 5.6 – Ícone do ficheiro com extensão. Uvw

Figura 5.7 – Relação da barra de tarefas com todas as janelas do programa (sub-módulos)

Figura 5.8 – Separador “Elemento”

Figura 5.9 – Janela Dupla e Acoplada – espessura máxima das frinchas

Figura 5.10 – Separador “Características Geométricas”

Figura 5.11 – Mensagem de erro

Figura 5.12 – Numeração das camadas

Figura 5.13 – Definir o número de vidros e a orientação

Figura 5.14 – Definir o número de gases existentes na camada

Figura 5.15 – Separador dos “Vidros” – ordem de preenchimento das emissividades de cada camada

Figura 5.16 – Separador “Caixilhariarias” – Associar o simulador ao U_wVal

Figura 5.17 – Separador “Caixilhariarias” – CheckBox do Simulador (desactivada)

Figura 5.18 – Separador “Caixilhariarias” – Método dos valores tabelados (ex: janelas duplas)

Figura 5.19 – Separador “Caixilhariarias” – Método dos valores tabelados

Figura 5.20 – Separador “Perfil Intercalar”

Figura 5.21 – Informação apresentada pelo U_wVal

Figura 5.22 – Separador “Dispositivo de Oclusão”

Figura 5.23 – Separador “Painel”

Figura 5.24 – Separador “Resultados”

Figura 5.25 – Resultado final - U_w

Figura 5.26 – Botão da barra de ferramentas para criar um relatório

Figura 5.27 – Elemento em estudo – Janela simples madeira-metal

Figura 5.28 – Características Geométricas – Janela simples madeira-metal

Figura 5.29 – Características Geométricas – Janela simples madeira-metal

Figura 5.30 – caixilharia – Janela simples madeira-metal

Figura 5.31 – Perfil intercalar – Janela simples madeira-metal

Figura 5.32 – Resultados – Janela simples madeira-metal

Figura 5.33 – Elemento em estudo – Janela simples em alumínio

Figura 5.34 – Características Geométricas – Janela simples em alumínio

Figura 5.35 – Vidro – Janela simples em alumínio

Figura 5.36 – Caixilharia – Janela simples em alumínio

Figura 5.37 – Perfil Intercalar – Janela simples em alumínio

Figura 5.38 – Resultados – Janela simples em alumínio

Figura 5.39 – Módulo da Análise Económica

Figura 5.40 – Comparação entre duas soluções de janelas na zona climática I1

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Propriedades físicas gerais do vidro [14]

Quadro 2.2 – Composição do vidro definido na norma EN 572-1 [14]

Quadro 2.3 – Propriedades dos gases à temperatura de 10°C

Quadro 2.4 – Características térmicas das janelas utilizadas na simulação (adaptado de [54])

Quadro 2.5 – Evolução dos coeficientes de transmissão térmica de referência na zona I1

Quadro 3.1 – Resistência térmica R_s de espaços de ar não ventilados, em $m^2.K/W$ (adaptado de [7])

Quadro 3.2 – Relações para o cálculo da emissividade corrigida a partir da emissividade normal (adaptado de [9])

Quadro 3.3 – Propriedade de gases utilizados em envidraçados selados (adaptado de [9])

Quadro 3.4 – Transmissão térmica para caixilharias de plástico com reforços metálicos (adaptado de [7])

Quadro 3.5 – Valores de ψ para perfis intercalares metálicos correntes (ex: alumínio e aço) (adaptado de [7])

Quadro 3.6 – Valores de ψ para perfis intercalares de desempenho térmico melhorado (adaptado de [7])

Quadro 3.7 – Relação entre a permeabilidade e a dimensão total efectiva das frinchas entre o dispositivo de oclusão e o vão (adaptado de [7])

Quadro 3.8 – Expressões para o Cálculo de ΔR em função da permeabilidade (adaptado de [7])

Quadro 3.9 – Resistência térmica adicional, ΔR , para janelas com dispositivos de oclusão (adaptado de [7])

Quadro 4.1 – Resultados intermédios do método Iterativo

Quadro 5.1 – Método analítico e método do U_wVal – caixilharia madeira-metal

Quadro 5.2 – Método analítico e método do U_wVal – caixilharia alumínio

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Constante

c – Capacidade calorífica específica do gás [J/(kg.K)]

d – Espessura da camada de material (vidro ou material alternativo para envidraçado) [m]

F – Fração volumétrica

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/(m².K)]

– Condutância térmica [W/(m².K)]

M – Número e camadas de material

n – expoente

N – Número de espaços

r – Resistividade térmica do vidro (material de envidraçamento) [m.K/W]

P – Propriedade do gás

R_n – Reflectância normal (perpendicular à superfície)

s – Largura do espaço do gás [m]

T – Temperatura absoluta [K]

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/(m².K)]

ΔT – Diferença de temperatura [K]

ε – Emissividade corrigida

ε_n – Emissividade normal (Perpendicular à superfície)

ρ – Densidade do gás [kg/m³]

σ – Constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x 10⁻⁸) [W/(m².K⁴)]

μ – Coeficiente de viscosidade dinâmica do gás [Kg/(m.s)]

λ – Coeficiente de condutibilidade térmica do gás na camada [W/(m.K)]

– Comprimento de onda (também) [μm]

v – Temperatura na escala Celsius [°C]

Números adimensionais

Gr – Número de Grashof

Nu – Número de Nusselt

Pr – Número de Prandtl

Índices

c – convecção

e – externo

i – interno

j – camada de material j

g – gás

m – médio

n – normal

r – radiação

s – espaço

t – total

1;2 – primeiro, segundo, etc

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Actualmente, o critério de sustentabilidade ambiental e eficiência energética estão presentes em todos os sectores da construção. Ao longo dos últimos anos temos assistido a uma consciencialização para o tema da construção sustentável e racionalização dos consumos energéticos, quer por parte de projectistas e arquitectos, quer pela sociedade em geral. Com a assinatura do Protocolo de Quioto, cada estado signatário comprometeu-se a tomar todas as medidas necessárias para reduzir a produção dos gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa que contribuem para o aquecimento global.

Para cumprir o Protocolo de Quioto, é necessário constar, nos pacotes de políticas de cada estado signatário, as medidas necessárias para a melhoria da eficiência energética no seu território. Para cumprir, entre outros, os pressupostos consagrados no Protocolo de Quioto, a União Europeia, em cujo conjunto dos edifícios é responsável pelo gasto de mais de 40% da energia total consumida na comunidade, apontou como um dos seus principais objectivos melhorar a eficiência energética dos edifícios impondo aos seus Estados-Membros que integrem as exigências de protecção do ambiente nas suas políticas e acções das suas comunidades. [1]

O cumprimento das políticas de desempenho energético definidas na legislação nacional, no âmbito das directivas europeias e dos planos nacionais, e a aspiração legítima da população por melhores condições de conforto térmico, constituem desafios constantes aos projectistas de térmica na concepção de edifícios, para encontrar soluções construtivas tecnologicamente adequadas e economicamente rentável.

A melhoria do desempenho energético global de um edifício novo ou existente pode cingir-se aos componentes que são mais relevantes para a eficiência energética e que são economicamente mais rentáveis. Os vãos envidraçados, muitas vezes, representam um obstáculo para se conseguir minimizar as transferências térmicas pela envolvente exterior de um edifício, contudo, podem também ser parte da solução para criar edifícios com elevados padrões de eficiência energética, sem colocar em causa as condições de bem-estar e conforto higrotérmico, ao reduzir as perdas de calor pela envolvente.

No inverno, as perdas de calor pelos vãos envidraçados podem representar uma parcela significativa das perdas globais do edifício (cerca de 30%). Estas perdas podem ser compensadas com ganhos solares durante o dia, que dependem da disponibilidade de sol, da orientação dos vãos e do factor solar do vidro, contudo, as perdas ainda serão significativas. De facto, os vãos envidraçados, são os elementos da envolvente exterior onde ocorrem as maiores perdas de calor no inverno e os maiores ganhos solares no verão, sobretudo, nas janelas pouco eficientes.

Evidenciada a importância dos vãos envidraçados para o desempenho térmico global do edifício, deve o engenheiro projectista de térmica possuir instrumentos que permitam realizar uma análise térmica do desempenho de vãos envidraçados e uma análise económica comparativa de diferentes soluções de envidraçados. As legislações, europeia e nacional, e os documentos técnicos que regulam o método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados não são de fácil aplicação. Importa, portanto, sistematizar um método de cálculo simplificado e implementá-lo sob a forma de um programa de cálculo automático com uma interface gráfica clara e simples, motivo pelo qual surgiu o presente trabalho.

1.2. OBJECTIVOS E PLANO DE TRABALHO

O presente trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio a engenheiros projectistas de térmica e a técnicos da área da construção sob a forma de um programa de cálculo automático, actual e de fácil manuseamento, que avalie o coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados devido aos seus elementos constituintes e suas características térmicas, tendo por base os métodos simplificados de cálculo existentes nas normas europeias, e que permita também, efectuar uma análise económica comparativa entre diferentes soluções de vãos envidraçados.

Como primeira abordagem ao tema, descrevem-se os tipos de vão existentes (janelas e portas) no mercado nacional, seus elementos constituintes e suas características térmicas. De seguida, aprofundou-se o conhecimento dos fenómenos de transmissão térmica pelos vãos envidraçados e fez-se uma pesquisa das metodologias existentes de cálculo do coeficiente de transmissão térmica, quer nos documentos técnicos nacionais, quer nos documentos normativos europeus e americano, assim como nos programas de cálculo automático actualmente existentes.

Concluída esta primeira abordagem, são apresentadas e aprofundadas os documentos normativos europeus actualmente em vigor que regulam o método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados e posteriormente são apresentados alguns exemplos de aplicação, determinados analiticamente, e que servirão de base para auxiliar a validação do software de cálculo proposto.

Finalmente, pretendeu-se criar um software de cálculo simplificado, baptizado de U_w Val, recorrendo a uma linguagem de programação que permitisse o desenvolvimento de uma interface gráfica, acessível e de fácil aplicação.

O trabalho que se apresenta está organizado em 6 capítulos.

No capítulo 2, faz-se referência e caracterizam-se os tipos de vãos envidraçados utilizados correntemente no mercado português e faz-se o enquadramento das metodologias e softwares de cálculo do coeficiente de transmissão térmica utilizados a nível nacional e internacional.

No capítulo 3, apresenta-se os métodos de cálculo do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados especificados na norma europeia EN10077-1 e noutras normas que esta faz referência.

No capítulo 4, aplicam-se, por via analítica, as metodologias das normas apresentadas no capítulo anterior a alguns exemplos práticos de vãos envidraçados correntes.

No capítulo 5, apresenta-se o programa de cálculo automático (U_w Val) e descreve-se os passos dados para o seu desenvolvimento. Avaliam-se também as suas condições de aplicação, discutem-se as suas potencialidades e condicionantes e resolvem-se alguns exemplos. Os resultados provenientes da aplicação são comparados e validados com os resultados obtidos no capítulo anterior e com valores tabelados nas normas mencionadas. Ainda neste capítulo, discute-se o método de análise económica

previsto no software criado, referindo os seus pressupostos, condições de aplicação e resultados obtidos.

No capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões resultantes do desenvolvimento deste trabalho e da aplicação prática do U_wVal na área do projecto de térmica.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

A criatividade do homem permitiu-lhe desafiar os elementos naturais e a construção do seu abrigo constituiu, possivelmente, um dos seus esquemas mais elaborados de dominar os climas mais hostis. O Homem, desde sempre tentou adaptar as construções ao clima, estudando a localização, a forma, a configuração e a envolvente dos edifícios de modo a tirar partido das condições naturais. [2]

Na história da arquitectura, são diversos os exemplos desta capacidade de adaptação do homem ao clima com o auxílio de diversas técnicas construtivas e seus constantes aperfeiçoamentos, contudo, não é unicamente no clima e sua variação que se encontram as explicações para a evolução arquitectónica dos edifícios conforme explica Veiga de Oliveira e Galhano, "...a habitação (...), produto de adaptação do homem ao meio, ela reflecte não só o meio geográfico natural, mas também o meio humano, histórico e cultural." [2]

Em Portugal não existe uma unicidade arquitectónica, a habitação tradicional desenvolveu-se, em grande parte, sem se submeter a regras e estilos arquitectónicos. Existem diferenças significativas entre uma casa do norte e do sul do país, reflexo da geografia, do clima, dos materiais disponíveis, das técnicas construtivas e da tradição que ditaram as soluções a adoptar para cada caso. Para ajudar a evidenciar estas diferenças regionais, transcreve-se de [3], a título de exemplo, a descrição da influência do clima "mediterrânico-continental" sobre as habitações alentejanas:

"Nas habitações, o emprego da cal e a ausência de aberturas rasgadas para o exterior são outras tantas condições concomitantes do clima."

No passado, a construção de habitações com paredes de adobe ou em alvenaria de pedra ou tijolo, em geral com grandes espessuras por razões estruturais e com aberturas de comunicação com o exterior reduzidas, conduziam a soluções razoáveis em termos de conforto térmico. De facto, estas características e a inércia térmica dos elementos da envolvente limitavam as trocas de calor e as amplitudes térmicas no interior das habitações eram inferiores às registadas no exterior.[4] Estas e outras soluções, que respondiam a problemas seculares, são ainda bastante actuais por motivos arquitectónicos e por critérios de sustentabilidade ambiental e economia de energia.

Actualmente, as estratégias políticas para a redução das necessidades energéticas dos edifícios para aquecimento ou arrefecimento, minimizando quer as perdas térmicas no inverno, quer os ganhos solares no verão e a necessidade do homem em controlar a radiação solar, condicionam a concepção da envolvente.

Os edifícios deverão ser adaptados ao clima do local onde se encontram protegendo os seus utilizadores do ambiente externo e dos agentes naturais sem originar situações de desconforto no interior. A envolvente do edifício desempenha um papel decisivo para o controlo e manutenção das condições de conforto higrotérmico dos espaços interiores e para a durabilidade, sustentabilidade e o desempenho energético do edifício, funcionando como um filtro entre a ambiência interior e exterior, controlando a entrada de ar e de água, o calor, o frio, a luminosidade e o ruído.

Na concepção da envolvente, o clima, a localização, a latitude e a orientação contribuem para a formulação da relação entre as áreas opacas e não opacas e para a definição das tecnologias construtivas que optimizam o desempenho térmico do edifício. Uma envolvente termicamente mal concebida afecta as necessidades de aquecimento e arrefecimento, sendo inevitável o aumento do consumo energético para atingir as condições de conforto térmico desejadas. Portanto, é imprescindível conhecer os elementos que a compõem e qual a sua contribuição para o desempenho global dos edifícios.

A envolvente exterior vertical é constituída por dois elementos principais: a parede (área opaca) e os vãos envidraçados (área translúcida). Os vãos envidraçados têm um peso significativo na optimização do desempenho térmico dos edifícios, estima-se que no inverno sejam responsáveis por 35% a 40% [58] das perdas térmicas totais dos edifícios e no verão, quando mal implementadas, poderão ser responsáveis por grande parte das necessidades de arrefecimento do edifício.

Hoje em dia, os envidraçados são componentes fundamentais e incontornáveis do projecto arquitectónico. Têm de cumprir, em simultâneo, diversos requisitos que afectam o seu desempenho: transmitância luminosa; isolamento térmico e acústico; ventilação, durabilidade; facilidade de utilização; resistência mecânica e ao vento; estanquidade à água e permeabilidade ao ar; segurança contra intrusão; facilidade de manutenção e limpeza. Para cumprirem satisfatoriamente a sua função, e garantirem a qualidade global da solução final, deve-se fazer uma selecção exigencial do envidraçado procurando compatibilizar os múltiplos requisitos do projecto.

Nos últimos anos, tem-se assistido, por parte dos fabricantes de janelas, a uma crescente aposta na inovação, na tecnologia e no número de envidraçados disponíveis no mercado para dar resposta a projectos de construção cada vez mais exigentes e para cumprir as actuais directivas e normas europeias relativamente à eficiência energética e sustentabilidade ambiental e certificação de qualidade dos seus produtos.

O primeiro passo para a selecção exigencial do sistema envidraçado passa pelo conhecimento dos seus componentes e das características técnicas dos seus elementos.

2.2. MODELOS TEÓRICOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os edifícios podem ser considerados como sistemas energéticos que efectuem trocas de calor com a sua vizinhança. A relevância que a questão energética assumiu nos últimos anos na concepção dos edifícios, coloca desafios aos projectistas de térmica para o desenvolvimento de soluções que permitam aprisionar a energia nos edifícios, mantendo a sua temperatura interior em níveis satisfatórios. Na procura dos meios que permitam atingir esses objectivos, os projectistas de térmica devem conhecer e dominar os princípios e os modelos físicos que traduzem as leis da termodinâmica para descrever os mecanismos, modos e meios de transferência de calor.

O calor só pode ser transferido se existir uma diferença de temperatura entre corpos (ou sistemas). A transferência de calor ocorre sempre do sistema a temperatura mais alta para o sistema a temperatura mais baixa. O calor pode ser transferido segundo dois mecanismos: transporte molecular e radiação

electromagnética. O transporte molecular dá-se nos meios sólidos e fluidos - estando incluídos neste os gasosos - e ocorre devido ao movimento das moléculas e electrões do meio. [5] Na radiação o transporte é feito por ondas electromagnéticas e ao contrário do transporte molecular, não necessita de um meio material para transferir o calor, sendo que, "...o transporte por radiação através de meios materiais, sejam fluidos ou sólidos, só é possível quando tais meios sejam total ou parcialmente transparentes ou permeáveis ao tipo de radiação em causa." [5] No quadro seguinte, resumem-se os mecanismos de transporte de calor.

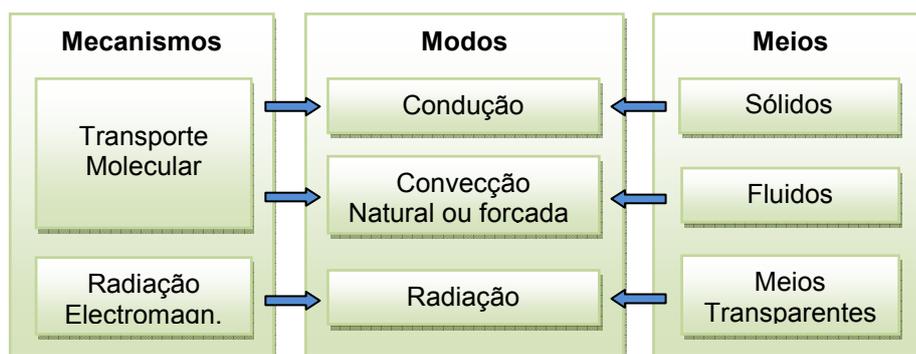


Figura 2.1 – Modos e mecanismos de transporte e meios onde podem ocorrer (adaptado de [5])

2.2.1. CONDUÇÃO

“A condução de calor por condução ocorre entre dois corpos em contacto ou no interior de um corpo sempre que exista uma diferença de temperatura entre dois dos seus pontos.” [4] Na condução a transferência de calor é conseguida através da transferência de energia cinética entre moléculas. A condução é o modo de transporte típico da transferência térmica dos sólidos.

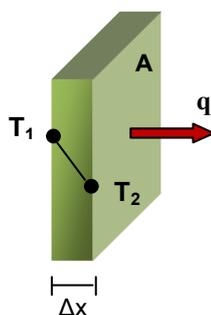


Figura 2.2 – Modelo de análise para a condução unidimensional

Seja a parede representada na figura 2.2, um sólido opaco, homogéneo e isotrópico, isto é, a condutibilidade térmica da parede não varia com a direcção. Se houver uma diferença de temperatura entre ambas as faces do sólido ($T_1 > T_2$), gera-se um fluxo de calor através da parede, que é proporcional à área normal à direcção do fluxo e à diferença de temperatura entre as faces da parede e inversamente proporcional à espessura Δx . Esta lei básica da condução é conhecida por Lei de Fourier. A constante de proporcionalidade define-se como condutibilidade térmica. [5][4]

$$Q_x = \lambda \frac{A}{\Delta x} (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

A expressão pode-se reescrever, como:

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

em que:

Q_x é a quantidade de calor que atravessa a parede (W);

A é a Área da superfície da parede (m^2);

Δx (∂x) é a espessura da parede (m);

T_1 e T_2 são as Temperaturas nas faces da parede ($^{\circ}C$);

λ é a Condutibilidade térmica do material (W/m. $^{\circ}C$);

q_x é o Fluxo de calor (W/ m^2);

$\frac{\partial T}{\partial x}$ é o Gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor

O sinal negativo assegura que o fluxo de calor é uma grandeza positiva e indica que seu sentido é oposto ao do gradiente de temperaturas. A condutibilidade é uma propriedade característica de cada material e representa a capacidade de um dado material para conduzir calor. Físicamente define-se como a quantidade de energia que atravessa a área de um elemento de espessura unitária, quando submetido a uma diferença de temperatura unitária entre superfícies opostas. [5][4]

A condutibilidade tem um valor característico para cada material e permite avaliar o comportamento dos materiais à condução. A condutibilidade de cada material apresenta variações com a densidade, a temperatura, e com a presença de humidade, pois “a água ocupa o lugar dos poros do material, facilitando a passagem de calor através do corpo.” [4]. A condutibilidade é também influenciada pela existência de ar estagnado em cavidades existentes no interior dos materiais. Na figura 2.3 apresenta-se a variação da condutibilidade térmica de alguns materiais de construção com a densidade. [5][4]

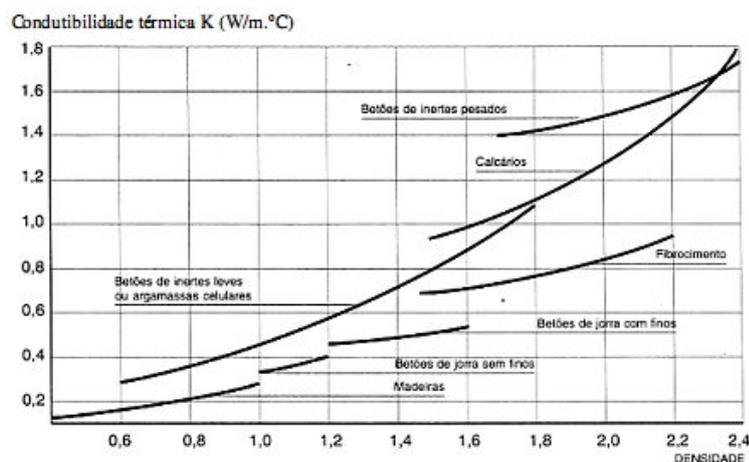


Figura 2.3 – Variação da condutibilidade térmica de alguns materiais com a densidade [4]

Na figura 2.4 representa-se a evolução da condutibilidade de alguns materiais com a temperatura.

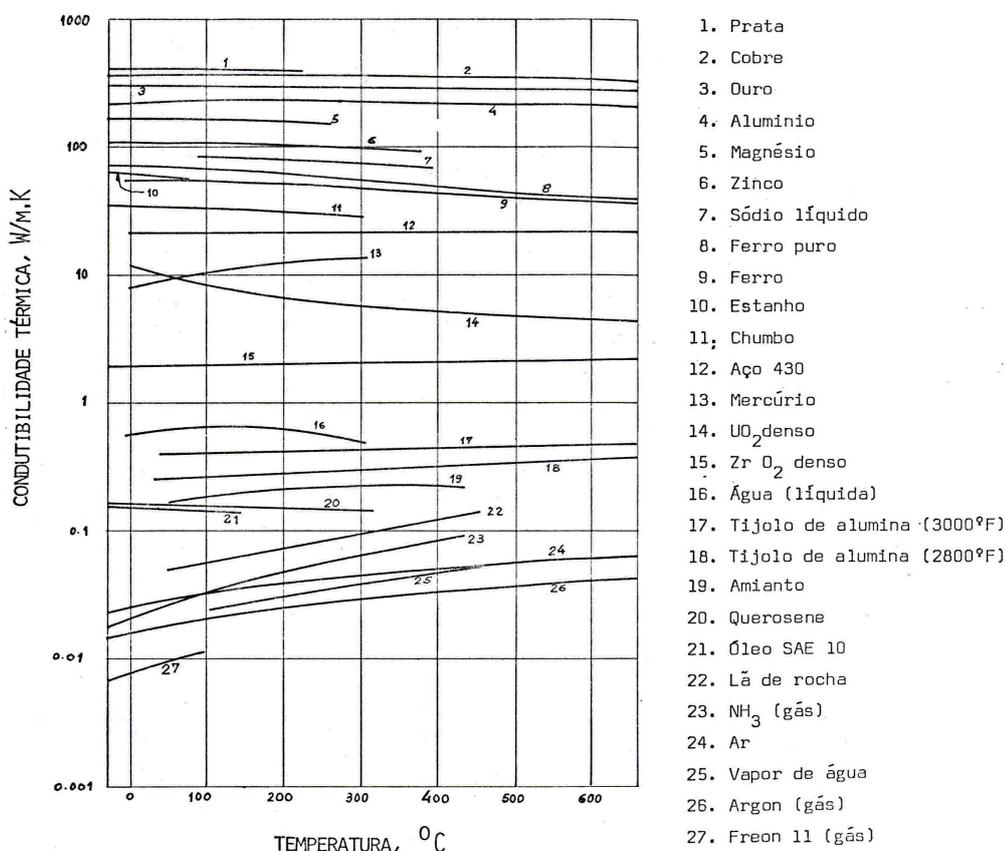


Figura 2.4 – Variação da condutibilidade térmica de alguns materiais com a temperatura [4]

Nos materiais de construção, para a gama de temperaturas a que os materiais são submetidos, geralmente basta usar os valores da condutibilidade térmica para a temperatura média de funcionamento. No anexo A estão tabelados os valores da condutibilidade térmica de alguns materiais utilizados na construção.

2.2.1.1. Equação Geral da Condução

A equação geral da condução, permite determinar as componentes do fluxo de calor, quando existem gradientes de temperatura segundo as três direcções x, y, z e determinar o gradiente de temperaturas se for conhecida a distribuição de temperaturas no meio. Considerando o volume infinitesimal representado na figura 2.6, e partindo do princípio de que o meio é isotrópico, o balanço da energia do elemento infinitesimal vem:

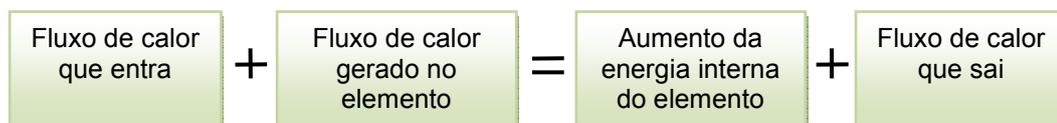


Figura 2.5 – Balanço energético para o elemento de volume infinitesimal (adaptado de [5])

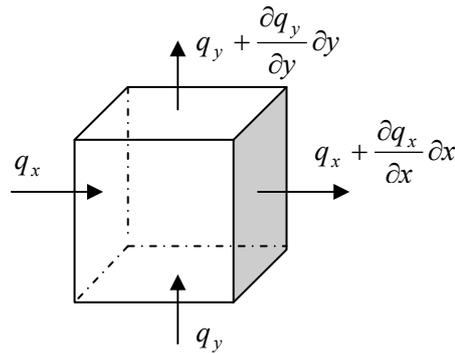


Figura 2.6 – Elemento de volume infinitesimal para avaliar a condução de calor

- Fazendo o balanço apenas entre a **energia que entra** e a **energia que sai**, para o volume infinitesimal vem:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dy dz \quad (2.3)$$

- Se existirem fontes no meio, a quantidade de **energia produzida** por unidade de volume e tempo, isto é, $q_f = q_f(x,y,z,t)$, vem:

$$q_f dx dy dz \quad (2.4)$$

- A energia armazenada no elemento de volume é função do calor específico a pressão constante (c_p), da massa volúmica (ρ) é dada por:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.5)$$

Onde a temperatura varia por unidade de volume e tempo, ou seja, $T = T(x,y,z,t)$

Juntando as 3 expressões, e simplificando, o balanço da energia do elemento infinitesimal é dado por:

$$q_f - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_f = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

A expressão 2.7 traduz a equação geral da condução do calor e pressupõe a existência de fontes de calor – representado pelo termo q_f – que, geralmente, não existe nos elementos construtivos, no caso dos edifícios ($q_f = 0$)

2.2.1.2. Casos Particulares

- **Meio isotrópico** - Caso o meio seja isotrópico, a condutibilidade térmica (λ) é constante para qualquer direcção e a expressão vem simplificada, adquirindo a seguinte forma:

$$\lambda \nabla^2 T + q_f = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Ou ainda,

$$\nabla^2 T + \frac{q_f}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

Sendo, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ a difusividade térmica do material. A difusividade térmica dá uma medida da velocidade de propagação do calor nos sólidos quando a temperatura varia com o tempo. É uma grandeza utilizada para a avaliação da inércia térmica dos materiais. [5]

- **Meio isotrópico e sem fontes de calor ($q_f = 0$):**

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

- **Meio isotrópico e regime permanente (T não varia com o tempo):**

$$\nabla^2 T + \frac{q_f}{\lambda} = 0 \quad (2.11)$$

Expressão conhecida como equação de Poisson.

- **Meio isotrópico, regime permanente e sem fontes de calor:**

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.12)$$

Expressão conhecida como equação de Laplace. Se considerarmos que a condução de calor é monodimensional, segundo o eixo dos xx, esta expressão transforma-se:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (2.13)$$

Ao especificar as condições fronteiras de temperatura ou de fluxo de calor, é possível resolver as equações diferenciais e determinar a distribuição de temperatura num meio qualquer. [4]

2.2.2. CONVECÇÃO

A convecção é um modo de transporte caracterizado pela troca de calor entre um fluido em movimento e um sólido. A convecção baseia-se no movimento macroscópico das moléculas do fluido que intervêm no transporte de energia. O fluido entra em contacto com o sólido e pela diferença de temperaturas entre ambos, o fluido recebe ou transmite calor, e aumenta ou diminui o seu volume

específico, criando uma corrente de convecção. [5] A convecção pode ser natural ou forçada ou mista. A convecção natural ocorre devido ao movimento do ar causado pelas diferenças de pressão e densidades, originadas por diferenças de temperatura. A convecção forçada, conforme o nome indica, usa diferenças de pressão para forçar o fluido ou gás a mover-se. Essas diferenças de pressão são induzidas por equipamentos ou pelo vento atmosférico.

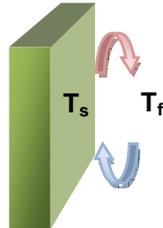


Figura 2.7 – Representação esquemática da convecção natural

O transporte por convecção é um fenómeno muito complexo. Para formular e resolver analiticamente os seus problemas, recorre-se às leis e conceitos da termodinâmica e também da mecânica dos fluidos, pois, conforme mencionado anteriormente, a convecção é um fenómeno que ocorre em meios fluidos. A sua formulação matemática passa pela consideração de equações básicas da conservação: da continuidade ou da conservação da massa, de Navier-Stokes ou da conservação da quantidade de movimento e da conservação da energia. [5] Dado o objectivo do presente trabalho, não serão abordadas as equações gerais da convecção.

Em alguns casos práticos da engenharia, pode-se simplificar o fenómeno da transferência de calor por convecção, recorrendo à Lei de Newton:

$$Q = h_c A (T_s - T_f) \quad (2.14)$$

$$q = \frac{Q}{A} = h_c (T_s - T_f) \quad (2.15)$$

Em que:

Q_x é a quantidade de calor que atravessa a parede (W);

T_s e T_f – Temperaturas do sólido e do fluido, respectivamente (°C);

q_x – Fluxo de calor (W/m²);

h_c é a condutância térmica superficial por convecção (W/m².°C);

A é a área da superfície sólida (m²)

A condutância térmica superficial depende de vários factores, nomeadamente: [4]

- regime de convecção;
- tipo, temperatura, velocidade e propriedades do fluido;
- geometria, rugosidade, material e temperatura do sólido;
- área de contacto;
- sentido do fluxo (ascendente ou descendente)

2.2.3. RADIAÇÃO

É uma forma de transporte de calor comum a todos os corpos, através de ondas electromagnéticas. Todos os corpos emitem e absorvem ondas electromagnéticas, modificando a sua energia interna. Ao contrário da condução e da convecção, as ondas electromagnéticas não necessitam de um meio físico para se propagarem, podendo propagar-se no vazio.

Para a transferência de calor, a radiação importante a considerar é a denominada “radiação térmica” com comprimentos de onda que se situam entre os 0,4µm e os 1000µm. [4]

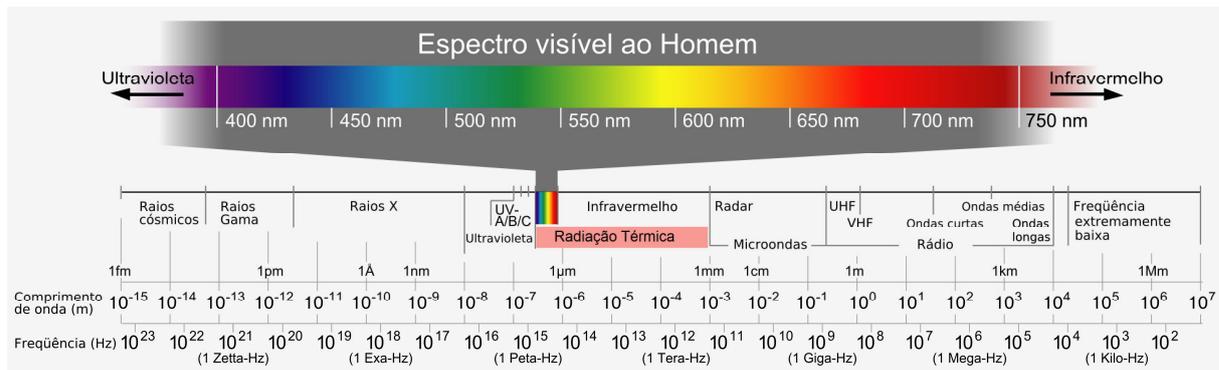


Figura 2.8 – Espectro electromagnético (adaptado de [27])

Segundo Stefan-Boltzmann, um corpo negro emite energia em todas as direcções e é proporcional à 4ª potência da temperatura absoluta do corpo

$$q = \frac{Q}{A} = \sigma \cdot T^4 \quad (2.16)$$

em que:

A é a área da superfície do corpo (m²)

σ é a constante de Stefan-Boltzmann (σ = 5,6697x10⁻⁸ W/m².K)

T é a temperatura absoluta do corpo (K), dada por T(K) = 273,2 + T(°C)

Um corpo negro não existe, é um corpo teórico, uma “abstração matemática”. Um corpo negro absorve toda a radiação que nele incide e é o corpo que mais energia emite sendo, por esse motivo, um emissor perfeito. Quando incide uma certa energia radiante sobre um corpo real, uma parte dessa energia é reflectida, outra parte é absorvida e a restante é transmitida através do corpo.

Quando se dá a transferência de calor entre dois corpos, por radiação, pela lei de Stefan-Boltzmann, vem:

$$Q = \sigma \cdot A(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.17)$$

Esta expressão é válida para os corpos negros, para os corpos cinzentos, a energia transmitida é menor mas são proporcionais a T⁴. Um corpo real emite uma energia inferior ou igual à que emite o corpo negro, nas mesmas condições. Um corpo cinzento é um corpo que emite a mesma energia que o corpo real em estudo. Para ter em conta a natureza cinzenta dos corpos reais, definiu-se um factor designado

por emissividade da superfície (ϵ) que representa a razão entre a energia emitida pelo corpo real e a energia que seria emitida por um corpo negro nas mesmas condições. [4]

“Todas as superfícies emitem calor radiante, sendo a quantidade total de emissão de calor por unidade de área dependente da temperatura absoluta e emissividade da superfície.”

$$q = \frac{Q}{A} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.17)$$

ϵ é a emissividade $0 \leq \epsilon \leq 1$

O fluxo de calor por radiação pode ser aproximado por uma expressão semelhante à da lei de Newton para a convecção:

$$q_r = h_r (T_s - T_{ar}) \quad (2.18)$$

$$h_r = \epsilon (4\sigma \cdot T_s^3) = \epsilon \cdot h^* \quad (2.19)$$

Em que:

h_r é a condutância superficial por radiação ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Para uma folha de vidro, $h^* = 4.4/0.837$ (ver norma EN 673).

Esta simplificação permite tratar da mesma forma as perdas de calor por convecção e radiação:

$$h_{cr} = h_c + h_r \quad (2.20)$$

Sendo h_{cr} a condutância térmica superficial interior, ou coeficiente interior de transmissão de calor (h_i).

O fluxo total por convecção e radiação (q_{cr}) é dado por:

$$q_{cr} = h_{cr} (T_s - T_{ar}) \quad (2.21)$$

2.3. TERMINOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DE VÃOS ENVIDRAÇADOS

A importância das janelas vai além dos critérios de estética, de luminosidade e de ventilação dos espaços. O projectista de térmica, ao fazer a selecção exigencial das janelas ou portas para um determinado edifício novo, quer para um edifício existente sujeito a uma intervenção de reabilitação, deve aliar aos factores mencionados, critérios que propiciem níveis de isolamento elevados, quer térmicos, quer acústicos ou de permeabilidade face aos elementos naturais. Para isso, é necessário conhecer os elementos constituintes e as características técnicas dos vãos envidraçados, como a forma como se manuseiam, a sua estanqueidade, permeabilidade, resistência e capacidade de isolamento, entre outras. Ao longo deste trabalho, as janelas e portas serão deliberadamente designadas como envidraçados sendo feita a distinção entre ambas, apenas nos casos em que se justifique.

2.3.1. ELEMENTOS CONSTITUINTES DO VÃO ENVIDRAÇADO – TERMINOLOGIA

Os vãos envidraçados têm como função, permitir a entrada de luz e/ou a ventilação dos espaços. O vão geralmente é preenchido por um aro e uma caixilho, sendo o aro fixo no vão e o caixilho fixo ou móvel, consoante se destine unicamente a permitir a entrada de luz ou a permitir a ventilação.

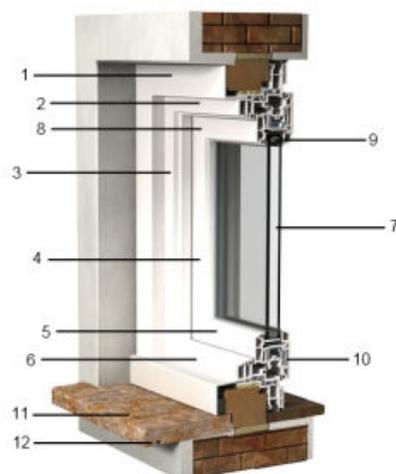


Figura 2.9 – Definição dos elementos da janela (adaptado de [25])

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1 – Pré-aro | 7 – Sistema envidraçado |
| 2 – Aro (fixo) | 8 – Folha (“caixilho” ou “aro móvel”) |
| 3 – Couceira | 9 – Perfil intercalar (espaçador) |
| 4 – Couceira da folha | 10 – Septos |
| 5 – Travessa inferior da folha | 11 – Parapeito |
| 6 – Tábua de peito | 12 – Goteira |

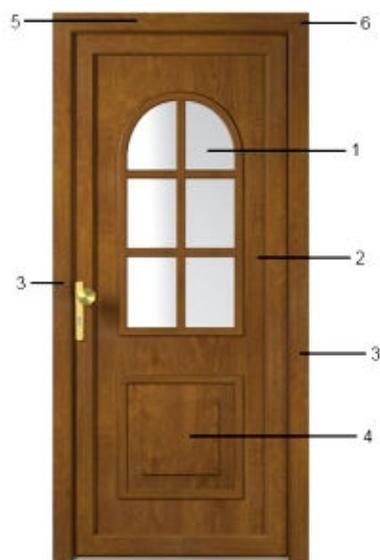


Figura 2.10 – Definição dos elementos da porta (adaptado de [25])

- | | |
|--------------|-----------------------|
| 1 – Vidro | 4 – Almofada |
| 2 – Folha | 5 – Travessa superior |
| 3 – Montante | 6 – Aro |

O vão é uma abertura na parte opaca, destinada a receber um caixilho. A sua envolvente é constituída por quatro partes: Ombreiras, peito ou soleira e a verga (ou padieira). A ombreira corresponde a cada uma das partes laterais verticais do vão. No caso das janelas, o peito corresponde à parte inferior horizontal de um vão de uma janela, no caso de uma porta, designa-se de soleira. A verga ou padieira (ou ainda, lintel), é a parte superior do vão.

Os vãos envidraçados são constituídos por duas partes: o aro e a folha.

O **aro** é uma peça com as dimensões do vão e é colocado à volta deste envolvendo-o como um revestimento e leva nos lados exteriores um ressalto ou mocheta, desenhado para o seu ajuste ao encaixe ou entalhe. No caso de uma porta, o aro é composto por dois montantes e uma travessa, formando um U invertido. [23]

As **folhas** são os elementos que se ajustam ao aro e podem ter movimentos de abrir e fechar total e parcialmente. São constituídas por um caixilho, por vidros e eventualmente painéis (ou almofadas) e correspondem à parte móvel do vão envidraçado. Na folha podem-se distinguir dois elementos principais: Caixilharia móvel e o corpo da folha. A caixilharia é o elemento que dá rigidez ao conjunto. O corpo da folha é a superfície entre os montantes e as travessas e pode conter vidros ou painéis (almofadas). No caso das portas, as folhas podem ser classificadas segundo três tipos: [19] [23]

- Porta de folha lisa (porta lisa sem nenhum ressalto);
- Porta de folha emoldurada (as molduras são colocadas sobre um fundo liso, criando um relevo);
- Porta de folha almofadada (as almofadas encaixam nos montantes e travessas formando relevos que sobressaem da folha.

A principal função da **caixilharia** é sustentar os vidros e garantir a continuidade das funções do aro e da folha tais como: isolamento térmico e acústico, controlar a luminosidade, evitar as condensações no interior, resistir aos esforços devido ao vento e ao uso, e garantir a estanquidade ao ar e a permeabilidade do conjunto à água. [23]

A **almofada** é um elemento, geralmente opaco e que normalmente é aplicado na parte inferior da porta.

2.3.2. CLASSIFICAÇÃO DE JANELAS E PORTAS

A norma europeia EN 12519:2004 [6] especifica o vocabulário geral utilizado para classificar janelas, portas pedonais e os seus componentes. Segundo esta norma a janela define-se como sendo o “componente do edifício que encerra um vão de uma parede, ou de um telhado inclinado, que admite luz e pode permitir ventilação”. Ainda segundo esta norma, uma porta é o “componente do edifício que encerra um vão numa parede que permite a passagem e pode admitir luz quando fechada”. Por extensão, um vão envidraçado é uma abertura formada na parede por janela ou porta, composta por caixilho e vidro.

Segundo a norma as janelas e portas dividem-se em 3 tipos:

- Janela/porta simples;
- Janela/porta de dupla folha no mesmo aro;
- Janela/porta dupla.

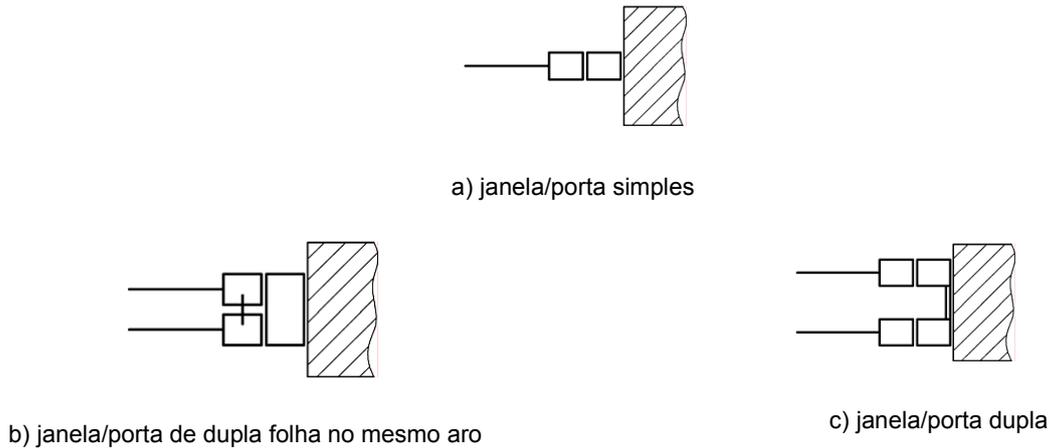


Figura 2.11 – Tipos de janela/porta [6]

As janelas e as portas também podem ser classificadas segundo o modo de movimentação das suas folhas de batente da seguinte forma:

- **Janela fixa/ caixilho fixo** – Este tipo de janela caracteriza-se pela imobilidade dos seus elementos que estão fixados no vão. Em termos de eficiência, estas janelas geralmente apresentam uma melhor estanqueidade e segurança e a ventilação é nula.

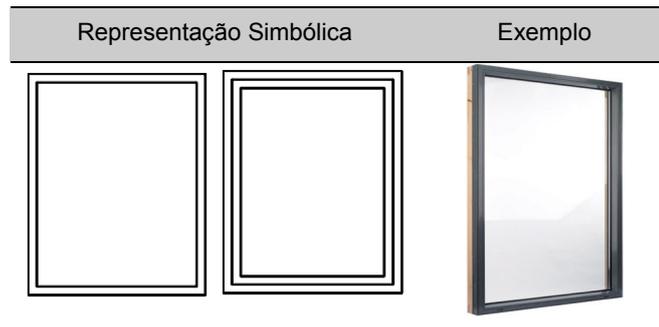


Figura 2.12 – Caixilho fixo e Janela Fixa [6][26]

- **Janela/Porta de batente com folha simples** – Esta é a janela tradicional. É composta por uma folha que ao rodar em torno de um eixo vertical situado ao longo da couceira, permite a abertura total do vão para ventilar o espaço interior sem oferecer resistência ao vento. Além das janelas de uma folha, existem também as de duas folhas.

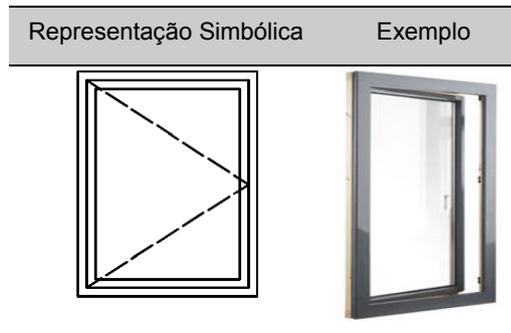


Figura 2.13 – Janela/porta de batente de uma folha [6][26]

- **Janela pivotante** – A folha desta janela abre-se ao girar em torno de um eixo horizontal ou vertical, centrado ou não, situado no aro. Além de permitirem uma boa ventilação, as configurações de eixo centrado permitem reduzir o espaço ocupado pela folha.

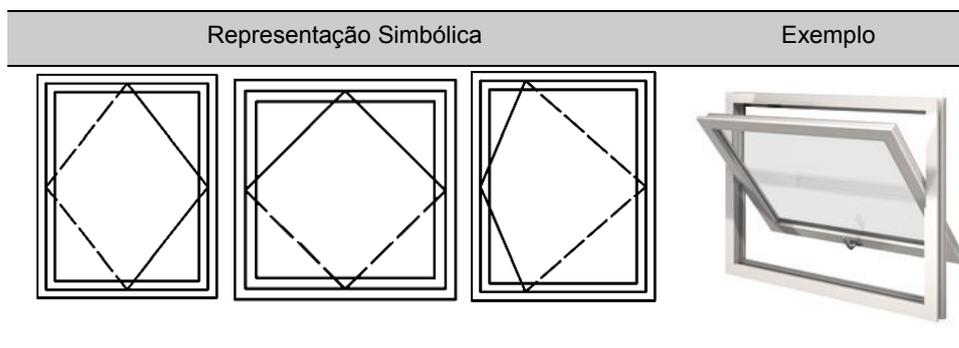


Figura 2.14 – Janela pivotante de eixo vertical, horizontal e descentrado [6][25]

Quando a janela é composta por várias folhas de vidro que se movem em torno de um eixo de rotação horizontal ou vertical toma a designação de **Janela pivotante múltipla**.

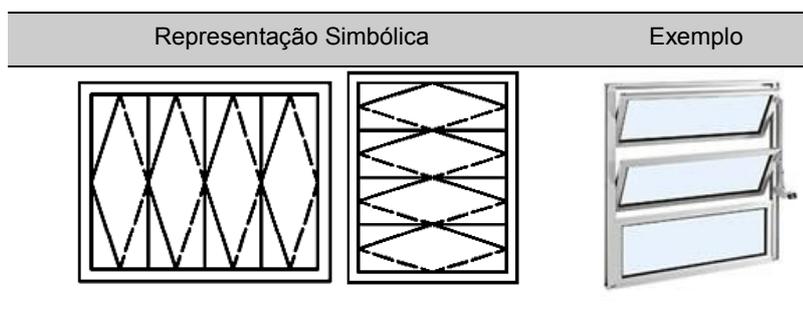


Figura 2.15 – janela pivotante múltipla vertical e horizontal [6][25]

- **Janela de guilhotina** – Janela, geralmente com duas folhas, que abrem por translação vertical no seu plano, abrindo para cima ou para baixo, caso tenha apenas uma folha móvel ou em ambos os sentidos como é o caso das janelas de guilhotina com duas folhas móveis. A ventilação apenas se dá em metade do vão.

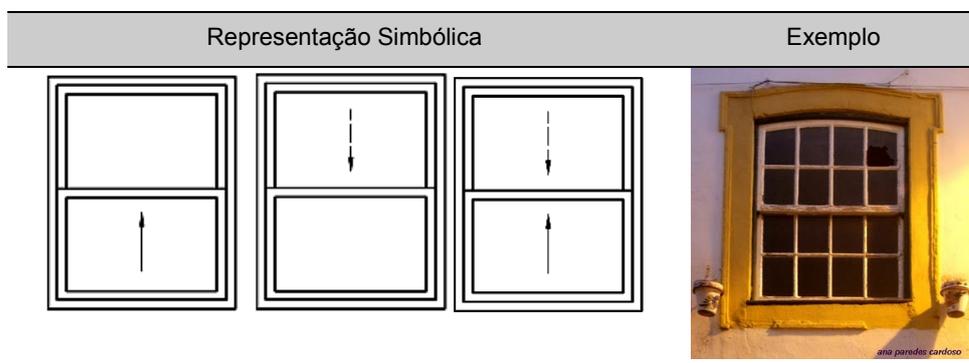


Figura 2.16 – Janela de guilhotina (com uma ou duas folhas móveis) [6][28]

- **Janela/porta de correr** – Janela com duas ou mais folhas, semelhante à janela de guilhotina em termos de funcionamento, mas cujo movimento das suas folhas se realiza por translação horizontal no seu plano. Estas janelas podem ter uma ou duas folhas móveis, correndo uma folha paralelamente à outra. Tal como na janela anterior, a ventilação desta janela dá-se apenas em metade do vão. Ambas as janelas possuem manobras simples poupando o espaço em seu redor.

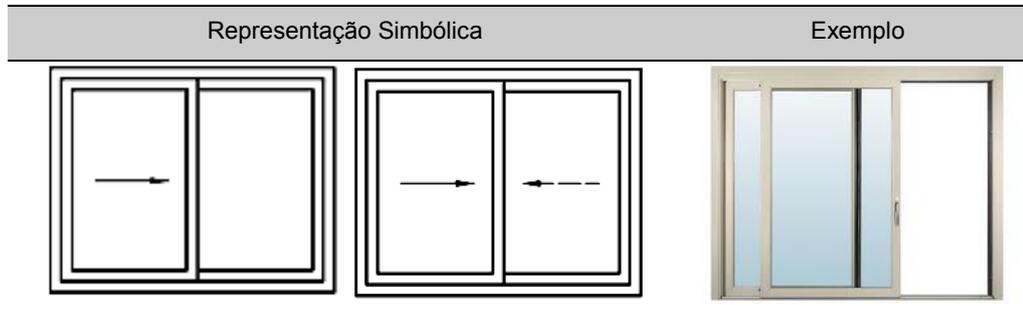


Figura 2.17 – Janela/porta de correr (com uma ou duas folhas móveis) [6][29]

- **Janela oscilo-paralela** – É semelhante à janela de correr mas nesta variante a folha móvel abre por translação horizontal sem ocupar espaço no compartimento e, simultaneamente, pode rodar em torno de um eixo horizontal situado na travessa inferior, para ventilar.

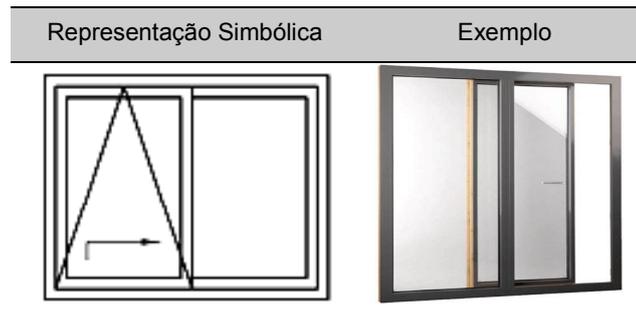


Figura 2.18 – Janela oscilo-paralela [6][25]

- **Janela elevadora de correr** – Esta janela é semelhante à janela de correr e geralmente é utilizada em conjunto com folhas pesadas e de grande dimensão. Quando se fecha a janela com o accionar da alavanca, a folha móvel é descida e fica em repouso sobre o seu eixo de translação, em sentido inverso, quando se manipula a alavanca para abrir a janela, a folha móvel é elevada para permitir a translação da janela ao longo do seu eixo.

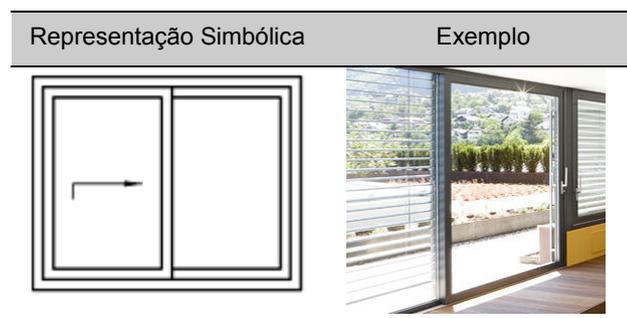


Figura 2.19 – Janela elevadora de correr [6][25]

- **Janela oscilo-batente** – Janela cuja folha móvel se comporta como de batente ou de basculante conforme o accionar do seu mecanismo. Por causa da sua funcionalidade, tornaram-se muito populares.

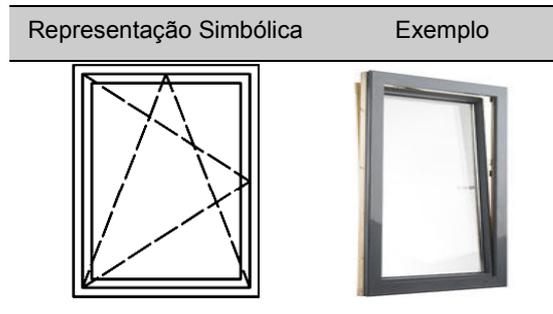


Figura 2.20 – Janela oscilo-batente [6][26]

- **Janela basculante** – Janela cuja folha móvel abre para o interior por rotação em torno de um eixo horizontal localizado na extremidade inferior da folha. Apesar de não expor totalmente o vão, oferece uma boa ventilação e boa estanquidade quando fechada.

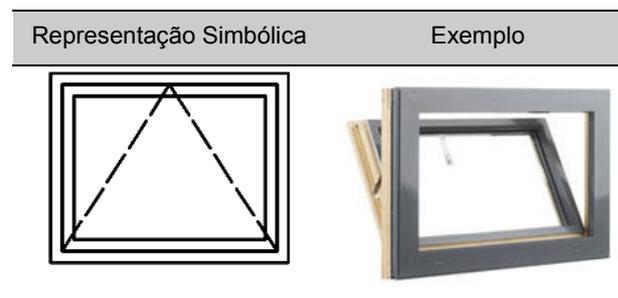


Figura 2.21 – Janela basculante [6][26]

- **Janela projectante** – Janela semelhante à anterior mas com o eixo de rotação horizontal localizado ao longo da travessa superior. Este tipo de janela, geralmente abre para o exterior.

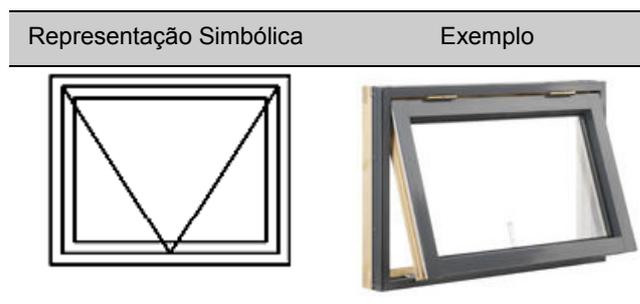


Figura 2.22 – Janela projectante [6][26]

- **Janela à italiana** – Janela cuja folha móvel é sustentada por compassos que abrem para o exterior ou interior por rotação em torno dos eixos dos compassos e translação vertical na respectiva travessa superior. [6][19]

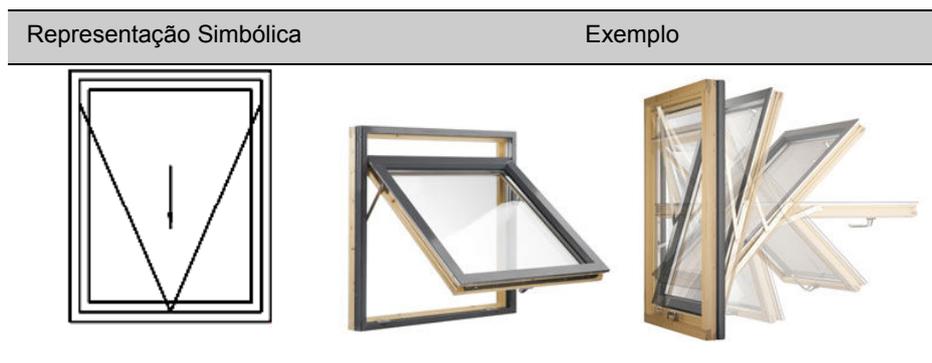


Figura 2.23 – Janela à italiana [6][26]

- **Janela de eixo vertical deslizante de abrir para o exterior** – Janela semelhante à anterior com rotação em torno dos eixos dos compassos mas translação horizontal na couceira.

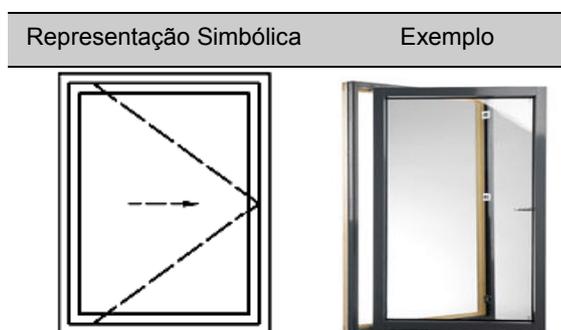


Figura 2.24 – Janela de eixo vertical deslizante de abrir para o exterior [6][26]

- **Janela/porta de acordeão** – Janela com duas ou mais folhas que abrem como um fole de acordeão por rotação vertical e translação horizontal dos montantes. [6][19]

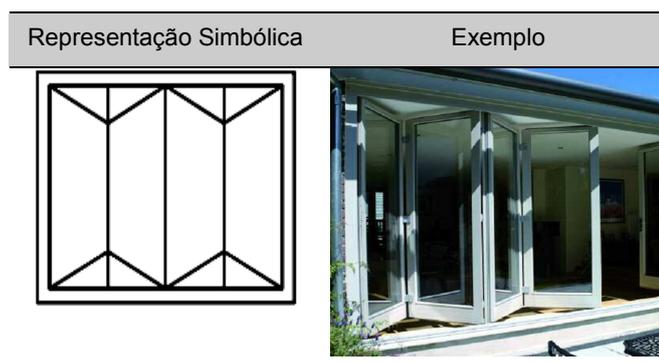


Figura 2.25 – Janela/porta de acordeão [6][30]

- **Porta de correr, sobreposta à parede ou no seu interior** – Porta com uma ou mais folhas, abre por translação horizontal no seu plano, não obstruindo o vão quando totalmente aberta. [6][11]

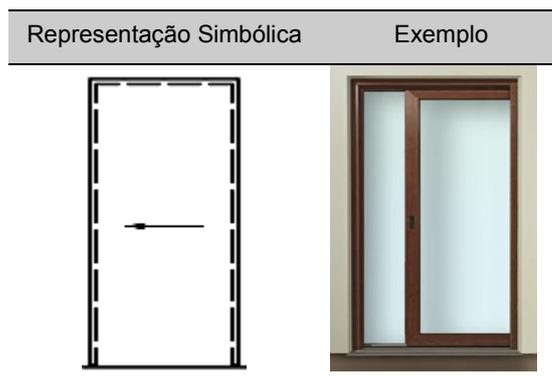


Figura 2.26 – Porta de correr, sobreposta à parede ou no seu interior [6][26]

2.4. TECNOLOGIA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS - COMPONENTES PRINCIPAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Até há poucos anos atrás, o vidro simples era o principal tipo de vidro usado nos vãos envidraçados. Apesar de ser um material durável e de permitir que uma percentagem elevada da radiação solar penetre nos edifícios, ele oferece pouca resistência ao fluxo de calor.

As caixilharias de elevado desempenho térmico, os vidros duplos, as películas de baixa emissividade e a utilização de gases nos espaços de ar, representam um conjunto de tecnologias presentes nos sistemas envidraçados comercializados actualmente que, consoante o desempenho das suas partes, podem reduzir substancialmente o valor do coeficiente de transmissão térmica, melhorando a eficiência energética dos vãos envidraçados.

O comportamento térmico dos vãos envidraçados é o reflexo do comportamento térmico da soma das suas partes. Neste subcapítulo, serão descritos os componentes que compõem os vãos envidraçados de forma a aprofundar o seu conhecimento.

2.4.1. VIDRO

Vidro é o termo genérico usado para denominar o elemento transparente ou translúcido de um envidraçado. O tipo de vidro mais utilizado nas janelas e portas é o vidro sodo-cálcico, podendo utilizar-se outros materiais como o acrílico. Ele ocupa a maior área do vão envidraçado, cerca de 70% a 80% e possibilita a admissão de luz natural nos compartimentos e a observação do exterior através dele, garantindo a segurança de bens e pessoas.

As superfícies envidraçadas podem ser constituídas por vidro simples ou múltiplo (geralmente duplo ou triplo). Uma janela com vidro simples consiste numa única folha de vidro, uma janela com vidro duplo é composta por duas folhas de vidro simples, afastadas nos bordos por um espaçador encerrando entre si uma câmara-de-ar. A presença da câmara-de-ar, permite reduzir as perdas por convecção e aproveitar a baixa condutividade térmica do ar, melhorando desta forma, o desempenho térmico do vão envidraçado. Por seu lado, o vidro triplo é composto por três folhas de vidro separadas por dois perfis intercalares. [24][31]

As propriedades físicas gerais do vidro estão indicadas no quadro 2.1. A composição do vidro utilizado actualmente está exposta no quadro 2.2.

Quadro 2.1 – Propriedades físicas gerais do vidro [14]

Propriedades	Valor e unidade
Densidade a 18°C	2200 – 2500 kg/m ³
Dureza	6 na escala de Mohs
Módulo de elasticidade (Módulo de Young)	7 x 10 ¹⁰ Pa = 70 GPa
Coeficiente de poisson (coeficiente de contracção lateral)	0,2
Capacidade térmica específica	0,72 x 103 J/(Kg.K)
Coeficiente de dilatação térmica médio (Coeficiente de dilatação linear)	9 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Condutibilidade térmica	1 W/(m.K)
Índice de refacção médio	1,5

Quadro 2.2 – Composição do vidro definido na norma EN 572-1 [14]

Composição do vidro	
Dióxido de silício (SiO ₂)	69% a 74%
Óxido de cálcio (CaO)	5% a 12%
Óxido de sódio branco (Na ₂ O)	12% a 16%
Óxido de magnésio (MgO)	0% a 6%
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0% a 3%

2.4.1.1. Tipos de Vidro

A norma EN 572-1 define a composição do vidro, contudo, podem-se adicionar outros componentes para modificar as propriedades e a cor do vidro. Existem no mercado diversos tipos de vidro com características específicas consoante o uso a que se destinam. A título de exemplo indicam-se alguns dos vidros mais usados na construção: [14][20][32]

Vidros Comum (sodo-cálcico ou float) - os vidros float são assim denominados devido seu processo de produção. Estes são os vidros mais comuns, mais antigos e largamente utilizados. Vidros sodo-cálcicos foram usados pelos antigos egípcios, enquanto hoje em dia constituem a maior parte das garrafas, frascos, potes, lâmpadas e vidros planos. É um vidro claro e transparente, fabricados em grande quantidade, com superfícies praticamente planas com espessuras que vão, geralmente, dos 2 aos 19mm.

Para reduzir a solubilidade dos vidros de silicatos alcalinos utilizam-se óxidos estabilizantes, sendo o mais utilizado o de cálcio juntamente com o óxido de magnésio. Eles contêm, normalmente, entre 5% e 12%, em peso de óxido de cálcio e de 12% a 16% por cento de óxido alcalino (principalmente óxido de sódio). Muito cálcio faz com que o vidro tenha tendência a cristalizar durante o seu processo

produtivo. Muito pouco cálcio ou alto teor em alcalinos resulta um vidro com baixa durabilidade química. Usualmente, uma pequena quantidade de alumina (0,6 a 2,5%) é incluída na composição para aumentar a sua durabilidade química.

Vidros de Borossilicato - Esses vidros são muito resistentes ao ataque químico sendo utilizados em equipamentos de laboratório, além disso, têm um coeficiente de dilatação térmica baixo, e apresentam uma elevada resistência ao choque térmico, sendo aplicado em locais onde seja necessário uma elevada resistência ao fogo (ex: produtos de mesa para levar ao forno). Estes vidros são também muito resistentes ao Na sua composição tem cerca de 7% as 15% de óxido de boro.

Vidro Aramado – É um vidro sodo-cálcico de cor clara, que contém no seu interior uma rede metálica introduzida durante o seu processo de fabrico. Todos os pontos da rede metálica são soldados. O aramado foi o primeiro vidro de segurança a ser utilizado na construção civil. Este vidro, geralmente é fabricado nas espessuras nominais de 6mm e 10mm.

Vidro Laminado – É formado pela união de duas ou mais folhas de vidro unidas por uma camada de polivinil butiral ou uma resina, quando sido submetidas a um processo de laminação. O vidro laminado atende às exigências de segurança, isolamento sonoro e térmico (quando associado a um vidro refletivo). Em caso de quebra, os estilhaços ficam presos nesta camada intermediária, sendo por esse motivo considerado um vidro de segurança.



Figura 2.27 – Representação de um vidro laminado num sistema de vidro duplo [39]

Vidro Temperado – É obtido a partir do aquecimento controlado do vidro comum, por um forno de têmpera horizontal ou vertical, seguido logo após, de um arrefecimento rápido. O vidro obtido por este processo adquire características de resistência muito maiores que o vidro comum. Depois de produzido, não permite cortes ou furos, pois qualquer furo ou corte pode resultar no estilhaçamento total do vidro. É considerado vidro de segurança porque evita a ocorrência de acidentes graves. Em caso de quebra o vidro fragmenta-se em pequenos pedaços de bordas pouco cortantes evitando assim ferimentos graves. O vidro temperado também possui maior resistência à flexão que os vidros comuns e pode suportar diferenças de temperaturas de até 200°C. O vidro temperado é mais rígido, tem maior resistência térmica e, quando danificado, estilhaça em pequenos fragmentos.

Vidro Baixo-emissivo - Também conhecidos como vidros Low-E, são revestidos com uma película de óxido metálico de baixa emissividade, aplicada numa das suas faces, que permite reduzir consideravelmente as perdas térmicas através do vidro, sem impedir a transmissão luminosa. Ele reduz os ganhos solares ou a perdas de calor por condução ao reflectir a energia infravermelha de ondas longas (calor), melhorando assim, a eficiência energética do sistema envidraçado. As perdas térmicas vêm mais reduzidas quando as películas de baixa emissividade são utilizadas em conjunto com o vidro duplo ou triplo.

Vidro de Isolamento térmico (IGU) – É a designação dada ao conjunto envidraçado formado pela combinação de duas ou mais folhas de vidro (ex: vidro duplo e triplo) separadas por um perfil

intercalar formando entre si um espaço selado hermeticamente preenchido por ar ou um gás. As folhas de vidro estão separadas por um perfil intercalar e um elemento vedante para impedir a penetração de vapor de água. Para melhorar a rigidez estrutural do conjunto e selá-lo hermeticamente, introduz-se um outro elemento vedante em todo o contorno. O elemento separador (perfil intercalar) geralmente contém um desidratante para absorver a humidade presente no espaço de ar.

A característica mais relevante deste vidro é a redução das perdas térmicas, tendo como efeito uma redução no consumo energético, a transparência através da redução do risco de condensação na superfície do vidro em contacto com o ambiente interior do edifício e a possibilidade de usar o vidro em áreas maiores sem aumentar o consumo energético. Na norma EN 1279 – “*Vidro na construção – Envidraçados isolantes prefabricados selados*” são especificados os métodos de ensaio e são estabelecidos os critérios de conformidade para o fabrico deste tipo de vidro. [33]

Hoje em dia, os fabricantes de envidraçados comercializam janelas e portas com tecnologias relativamente novas, como as películas de baixa emissividade e a incorporação de gases na caixa-de-ar, que visam diminuir as perdas térmicas do edifício.

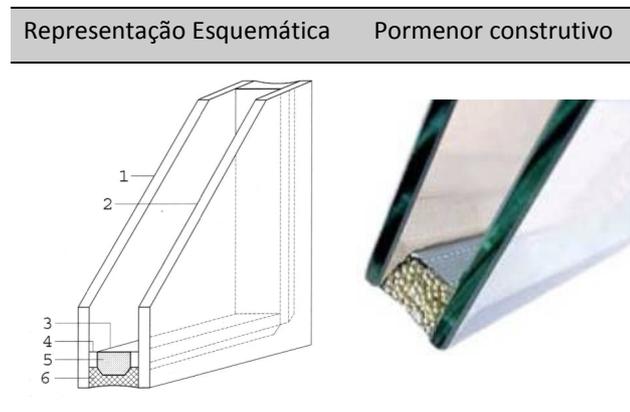


Figura 2.28 – Representação esquemática e pormenor construtivo de um vidro de isolamento térmico (vidro duplo) [14]

Legenda:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 1 – Exterior | 4 – Vedante |
| 2 - Interior | 5 – Material desidratante |
| 3 – Perfil Intercalar (Espaçador) | 6 – Vedante |

Os vidros devem ser colocados nas caixilharias sem que sofram esforços devido a contracções ou dilatações devido ao próprio vidro ou à caixilharia que os fixa.

2.4.1.2. Revestimentos de Baixa Emissividade (Low – E)

A emissividade representa a capacidade de um elemento restituir energia sob a forma de radiação. Um corpo negro restitui, sob a forma de radiação, toda a energia que sobre ele incide, apresentando uma

emissividade de 1,0. Um vidro sem película de baixa emissividade apresenta uma emissividade de cerca de 0,85, significa isto que, uma parte do vidro é opaco às radiações e a outra, transmite bastante calor sobre a forma de radiação. No vidro baixo emissivo, as camadas superiores das folhas de vidro são as responsáveis pelo valor da emissividade. Estas camadas são revestimentos de baixa emissividade compostos por óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, não condutores de electricidade. [14] A película de baixa emissividade é uma camada metálica ou de óxido metálico microscopicamente fina, invisível a olho nú, com uma espessura na ordem dos da ordem de 70nm, depositada à superfície dos vidros para reduzir a transferência de calor por radiação. As películas de baixa emissividade, geralmente são transparentes para o espectro da radiação solar e reflectivas para comprimentos de onda grandes da radiação infravermelha. [31]

Existe actualmente uma grande variedade de revestimentos de baixa emissividade disponíveis no mercado. De acordo com o tipo, a textura e a composição, a película pode ser aplicada na superfície exterior, interior ou até no seio da camada de ar. A norma europeia EN 1096 – “*Vidro na construção. Vidro revestido*” define em categorias os seus diferentes domínios de utilização em função da resistência da camada. Os revestimentos são classificados de acordo com as categorias seguintes: [14]

Classe A

A película é aplicada sobre a superfície do vidro voltada para o exterior e directamente exposta às intempéries.

Classe B

A película é aplicada sobre a superfície do vidro contacto directo com o interior e assim é protegido influências atmosféricas directas. O vidro revestido pode ser utilizado nos envidraçados simples.

Classe C

O filme só pode ser utilizado na camada intermédia de um vidro duplo isolante.

Classe D

O vidro revestido só pode ser utilizado na camada intermédia de um vidro duplo isolante e deve ser aplicado imediatamente após o seu fabrico. Não pode ser utilizado nos envidraçados simples.

Classe S

A superfície revestida pode ser utilizada tanto pelo exterior como pelo interior e está apto a satisfazer determinadas exigências específicas.

O revestimento pode ser aplicado segundo dois processos: revestimento “on-line” (método pirolítico) e revestimento “off-line” (método catódico). No revestimento “on-line”, durante do processo de fabrico do vidro soda-cálcico, aplica-se um óxido metálico sobre a superfície ainda quente do vidro do modo a fixar o revestimento ao vidro. Este revestimento assegura, por um lado, uma melhor protecção solar reduzindo os ganhos solares na estação de arrefecimento, porque o óxido metálico reflecte os raios do sol de volta para o exterior, e por outro lado, contribui para o isolamento térmico na estação de aquecimento limitando as perdas de calor por radiação ao reflectir o calor de novo para o interior do edifício, devido à presença de uma camada de óxido (ex: óxido de estanho) que apresenta uma emissividade baixa. Este efeito aumenta o valor do isolamento térmico global da janela. O revestimento pode ser aplicado, a umas ou várias das superfícies de vidro, ou a uma fina película

plástica introduzida entre as folhas de vidro. Actualmente, muitos fabricantes comercializam envidraçados com revestimentos de baixa emissividade.

No revestimento off-line, recorre-se a um processo físico (método catódico) que consiste na formação de uma camada de óxidos, por exemplo óxidos metálicos, por vaporização catódica. Electrões livres, acelerados num campo eléctrico, chocam contra uma molécula de gases. Esta é carregada positivamente e acelera pelo campo eléctrico transportando o material até chocar contra um cátodo carregado negativamente. No momento do choque as partículas libertam-se e acumulam-se sobre a superfície do vidro. Este processo é repetido milhões de vezes, e o produto é depositado sobre um dos lados do vidro. Estes revestimentos são mais ou menos estáveis em função da qualidade do produto utilizado contudo, não podem ser expostos à atmosfera ambiental, durante muito tempo e por esse motivo, devem ser utilizados apenas nos vidros de isolamento térmico (ex: vidro duplo) e a face revestida terá de estar voltada para a camada de ar intermédia para que seja protegida contra a humidade. Por ser susceptível às condições ambientais, estas películas designam-se por “soft-coat” enquanto, as películas obtidas pelo método pirolítico designam-se por “hard-coat”, por serem mais duráveis e poderem estar em contacto com o ar ambiente. [14][36]

2.4.1.3. Aplicação de Gás no Espaço de Ar

O espaço entre as folhas de vidro do vidro de isolamento térmico pode ser preenchido por outros gases que têm melhores propriedades térmicas do que o ar. Os gases que habitualmente se utilizam em envidraçados selados, são os gases nobres, não reactivos: árgon, o cripton e o xénon. Além destes gases também se usa o hexafluoreto de enxofre.

Pode-se melhorar o desempenho térmico de um envidraçado através da redução da condução térmica do espaço de ar entre as folhas de vidro. Nos vidros de isolamento térmico, no espaço de ar entre as folhas de vidro ocorrem fenómenos de convecção, o ar entra em contacto com o vidro à temperatura mais alta e aquece. Ao aquecer, o ar torna-se menos denso e sobe. Na folha oposta que está a uma temperatura mais baixa, ocorre o fenómeno inverso. O movimento originado por estas colunas de gás quente e fria gera um fenómeno de convecção. Ao preencher o espaço de ar com um gás com uma condutibilidade inferior, mais viscoso, ou mais lento, minimizam-se as correntes de convecção, a condução térmica através do gás é menor e a transmissão térmica global entre a superfície interior e exterior reduz-se. Além disso, como os gases apresentam uma menor condutibilidade do que o ar (ver quadro 2.3), é possível reduzir a espessura do espaço entre as folhas de vidro diminuindo o efeito da convecção sem, no entanto, agravar de forma relevante a condução térmica através do sistema envidraçado. [14][31]

Na figura 2.26 podemos visualizar o efeito da espessura da camada de ar no valor do coeficiente de transmissão térmica do envidraçado para alguns tipos de gases. Observando a figura 2.26 verificamos que o krypton proporciona um melhor desempenho térmico do que o árgon e do que o ar e permite adoptar espessuras entre folhas de vidro inferiores.

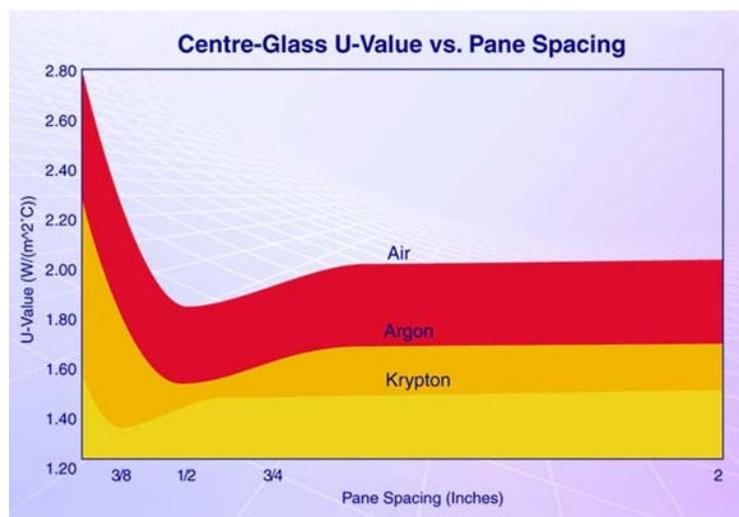


Figura 2.29 – Coeficiente de transmissão térmica do vidro em função do gás aplicado e da espessura do espaço de ar [24]

No quadro seguinte pode-se ver as propriedades de cada gás à temperatura de 10°C.

Quadro 2.3 – Propriedades dos gases à temperatura de 10°C

Gás	Ar	Argon	SF6	Krypton	Xenon
Densidade ρ (kg/m ³)	1,232	1,699	6,360	3,560	5,689
Viscosidade dinâmica μ (kg/m.s)	1,761x10 ⁻⁵	2,164x10 ⁻⁵	1,459x10 ⁻⁵	2,400x10 ⁻⁵	2,226x10 ⁻⁵
Condutibilidade λ (W/m.K)	2,496x10 ⁻²	1,648x10 ⁻²	1,275x10 ⁻²	0,900x10 ⁻²	0,529x10 ⁻²
Capacidade calorífica específica c (J/kg.K)	1,008x10 ³	0,519x10 ³	0,614x10 ³	0,245x10 ³	0,161x10 ³

Os envidraçados, são mais eficazes quando se utilizam as propriedades térmicas dos gases em conjunto com as películas de baixa emissividade. Por essa razão, é usual os fabricantes preencherem o espaço de ar das suas janelas e clarabóias de baixa emissividade (low-E) com gases. [36]

2.4.2. CAIXILHARIA

A caixilharia é o elemento utilizado para fechar e garantir a operacionalidade dos vãos e contribuir para o desempenho térmico dos edifícios. As suas funções principais são: a iluminação, o controlo da admissão de ar, a estanqueidade à água, a segurança contra intrusos e a regulação da troca de calor entre os compartimentos e o exterior. A escolha da caixilharia pode traduzir-se numa diminuição do consumo de energia através da redução das perdas térmicas pelos vãos e numa melhoria das condições de bem-estar e conforto higrotérmico. O desenvolvimento de caixilharias estanques permitiu controlar,

de forma mais eficaz, a troca de calor e frio entre o interior e o exterior. Por outro lado, a estanquidade obriga a prever caudais mínimos de ventilação dos espaços para garantir e manter a salubridade do ar interior.

As caixilharias podem ser classificadas de acordo com a sua função (janelas, portas e outras), material utilizado (madeira pintada ou natural, alumínio anodizado ou lacado, PVC, mista) e forma de abertura da folha (batente, basculante, pivotante, entre outras).

Em função das exigências de desempenho das caixilharias, é possível escolher entre vários tipos de materiais. A escolha do material da caixilharia pode basear-se em critérios económicos, estéticos, de desempenho térmico e acústico e, exigências de durabilidade e manutenção. No mercado nacional existem diversas soluções de caixilharias que se podem aplicar, quer em edifícios novos, quer em edifícios existentes sujeitos a intervenções de reabilitação.

A caixilharia representa cerca de 20% a 30% da área total do vão envidraçado mas a sua contribuição para a transferência de calor poderá ser substancialmente superior, especialmente em vãos envidraçados com vidros de isolamento térmico e caixilharias sem corte térmico. Uma caixilharia mal dimensionada pode tornar um ambiente escuro, sem controlo de iluminação, ruidoso e demasiado quente ou demasiado frio. O primeiro passo para escolher as caixilharias é conhecer as características, vantagens e desvantagens dos materiais utilizados no seu fabrico. [41]

2.4.2.1. Caixilharia de Madeira



Figura 2.30 – Perfil de uma caixilharia de madeira [45]

A madeira é um material bastante utilizado na construção, contudo, apesar das suas excelentes características, as caixilharias de madeira têm perdido o seu espaço no mercado nacional para as caixilharias de alumínio e PVC. Este facto deve-se ao seu elevado custo quando comparado com os preços praticados pelos seus concorrentes e ao mau desempenho verificado nas caixilharias de madeira em vários edifícios. De facto, não basta ter boas características técnicas, é necessário conhecer as tipologias de madeiras existentes e qual o seu desempenho para se efectuar uma selecção exigencial compatibilizando as características intrínsecas da madeira com as funções e requisitos que deverá cumprir.

Desde muito cedo se tem utilizado e constatado as vantagens e desvantagens da madeira. Este material tem por norma uma vida útil de 30 a 60 anos. A sua utilização verifica-se vantajosa devido a vários factores, tais como a sua durabilidade no caso de usar madeira de boa qualidade e bem curada, baixo custo, facilidade de elaboração, amplas variedades de acabamentos e cores e bom isolamento térmico. Contrariamente, possui um elevado custo de manutenção – pintar, envernizar – sendo difícil manter a

sua qualidade. É muito afectada pela humidade, podendo mesmo apodrecer, devido à criação de fungos e presença de insectos devendo nestes casos proteger-se e tratar a madeira de acordo com a utilização prevista para aumentar a sua durabilidade. Constitui uma barreira visual devido à espessura do caixilho.

A madeira é um material anisotrópico, e como tal, algumas das suas propriedades físicas variam com a direcção. A variação das propriedades mecânicas com a orientação das fibras e a expansão e a retracção da madeira com o teor em humidade e com a disposição das suas fibras são exemplos da anisotropia deste material. A maior resistência dá-se na direcção das fibras, podendo no entanto sofrer variações higrométricas no sentido ortogonal a essas.

A madeira apresenta diversas vantagens e desvantagens, quando utilizada como material de construção. Sousa Coutinho aponta as seguintes vantagens: [42]

- As reservas são renováveis, tornando o material permanentemente disponível;
- Pode ser produzida em peças de dimensões estruturais que podem ser rapidamente desdobradas em peças mais pequenas;
- Pode ser trabalhada com ferramentas simples e reempregue várias vezes;
- Resiste tanto a esforços de tracção como de compressão;
- Possui baixa massa volúmica e elevada resistência mecânica (a resistência ao corte e à tracção podem ser superiores à do betão);
- Apresenta boas condições naturais de isolamento térmico e acústico;
- Apresenta uma grande variedade de padrões.

Em oposição, aponta as seguintes desvantagens:

- É um material heterogéneo e anisotrópico;
- É vulnerável aos agentes externos e a durabilidade é limitada quando não são tomadas medidas preventivas;
- É combustível;
- Aumenta ou diminui de dimensão com a variação de humidade;
- As dimensões são limitadas.

Em função do tipo de madeira e da sua densidade, a condutibilidade térmica pode variar entre 0,13 e 0,18 W/m.K.

Segundo Joana Coutinho, ao longo dos anos foram desenvolvidos processos de melhoramento que anularam as características negativas que a madeira apresenta no seu estado natural, tornando-a num material moderno de construção com condições de atender aos requisitos que terá de cumprir. [42]

Relativamente às potencialidades e estrutura da madeira, podem estabelecer-se dois grandes grupos: elementos maciços de madeira natural e elementos folheados e laminados. Por variados motivos, a utilização dos primeiros é mais aconselhável, não sendo no entanto, a mais praticada, devido ao seu elevado custo associado.

Os elementos folheados concluem-se com um preço mais reduzido devido à sua composição. Elaboram-se a partir de uma estrutura (“miolo”) constituída por madeira de pior qualidade, sobre a qual se coloca um revestimento decorativo elaborado com uma folha de madeira nobre, de melhor qualidade, colada com uma cola resistente e prensada. Existem também os laminados de tipo plástico, que se verificam imitações fiéis da madeira natural. São exemplos deste tipo de laminado a fórmica e similares. Estes materiais apresentam-se vantajosos devido ao seu baixo custo e à sua maior resistência

aos agentes que afectam a madeira natural e também aos riscos e golpes, a que estão regularmente sujeitos. [23]

Relativamente à madeira natural, constata-se que as mais utilizadas em elementos maciços são as de pinho e carvalho. Nos folheados, o miolo é habitualmente construído com o caixilho em madeira de pinho e o revestimento com folhas de madeira nobre (pinho, carvalho, castanho, teca africana). Existem também as madeiras importadas, que se caracterizam geralmente pela sua elevada qualidade, associada também ao seu elevado custo. [23]

O tempo de vida das caixilharias está dependente da forma como a madeira foi anteriormente tratada. A sua durabilidade será superior se a madeira tiver sido perfeitamente seca e se tiver sofrido vários tratamentos internos com substâncias adequadas.

Existem três métodos de protecção, sendo eles, nomeadamente: deslocação da seiva por um produto em solução; difusão do produto em solução através das membranas de celulose; impregnação das células de madeira seca. Devido à sua rapidez de execução e economia, este último método de protecção verifica-se ser o mais utilizado. [23]

Por diferentes motivos, quer as pinturas claras, quer as opacas podem ser utilizadas como protecção superficial. As primeiras, devido ao seu maior índice de reflexão, e as segundas, por formar uma capa contínua de impermeabilização, comportando-se melhor e mais eficazmente nos meios agressivos do clima. No entanto, e inexplicavelmente, apesar das pinturas opacas apresentarem um melhor comportamento, assiste-se a um abandono gradual destas, em detrimento da utilização de vernizes. [23]

A utilização de tintas e vernizes demonstra ser eficaz contra as fendas que o sol pode provocar na protecção superficial, favorecendo o ataque de fungos e insectos, deteriorando-se. Na sua selecção dever-se-á ter em conta as intempéries a que o caixilho irá estar exposto, bem como o tipo de isolamento requerido. [21][23]

Na figura seguinte apresenta-se uma representação esquemática de uma caixilharia de madeira e os seus constituintes.

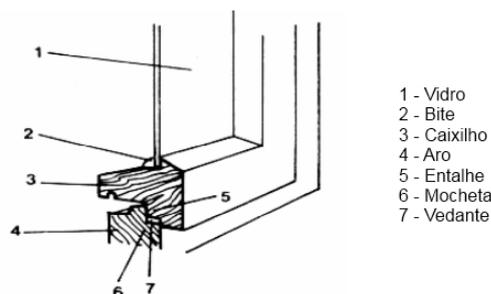


Figura 2.31 – Perfil de uma caixilharia de madeira [23]

2.4.2.2. Caixilharia Metálica

As caixilharias metálicas podem dividir-se em dois tipos, segundo o material utilizado: o ferro e o alumínio.

A caixilharia de ferro nunca foi muito utilizada no nosso país porque o ferro era caro, difícil de trabalhar e pouca ou nenhuma vantagem tinha comparativamente a outros materiais substitutos. De facto, a madeira e os novos materiais de construção que foram desenvolvidos, como o alumínio e o PVC, são mais leves, mais baratos e permitem uma maior versatilidade de formas e formatos. Com o

aparecimento destes materiais, o ferro foi remetido para outras aplicações. Nas nossas cidades são poucos os exemplos de caixilharias de ferro, sendo mais fácil encontrar exemplares em algumas casas tradicionais nas nossas aldeias. As caixilharias de ferro apresentam diversas desvantagens, como por exemplo:

- elevado preço;
- peso;
- difícil de trabalhar;
- dificuldade em arranjar mão de obra especializada;
- ligações toscas entre perfis;
- ferragens grosseiras;
- manutenção;
- difícil de controlar os problemas térmicos, acústicos e as infiltrações



Figura 2.32 – Perfil de uma caixilharia de alumínio [25]

O alumínio é, a seguir ao ferro, o metal mais utilizado no mundo. O processo de obtenção do alumínio consiste na extracção da alumina presente na bauxite que posteriormente é transformada em alumínio por um processo de redução. As principais características do alumínio são: [22][23]

- densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$;
- reduzida massa volúmica (cerca de $1/3$ da massa volúmica do aço)
- fraca resistência eléctrica;
- elevada condutibilidade térmica;
- elevado coeficiente de dilatação térmica ($23,8 \times 10^{-6} \text{ mm/}^\circ\text{C}$)
- baixo módulo de elasticidade ($E = 6,9 \text{ GPa}$);
- temperatura de fusão de 658°C ;
- reduzida massa volúmica;
- boa resistência aos agentes atmosféricos (devido á formação de um filme auto-protector de alumina);
- elevado poder reflector;
- É reciclável

Por ser um material leve, fácil de trabalhar e resistente, tem aplicação em diversas áreas, inclusive na construção civil, como material de construção (por exemplo: caixilharias). Os perfis de alumínio são obtidos através de um processo denominado de **extrusão** que consiste em fazer passar uma massa de alumínio (biletas), aquecida até aproximadamente 450°C , por uma abertura ou molde que ao arrefecer consolida e origina o **perfil**. Este processo permite obter uma vasta gama de perfis e formas. [22]

No fabrico das caixilharias, os perfis passam por um processo de tratamento de superfície que consiste na formação de uma camada protectora superficial para resistir aos factores de degradação a que estarão submetidos ao longo da sua vida útil e aumentar a sua durabilidade. Entre os processos de tratamento de superfície citar-se-á a **anodização** e a **lacagem**. [22]

A anodização é um processo de oxidação e consiste num tratamento electroquímico dos perfis com o objectivo de criar artificialmente uma capa de alumina (óxido de alumínio). Esta capa é impenetrável a agentes químicos, ao ar e à água.

A lacagem consiste na aplicação em estufa de uma tinta em pó (polímero à base de poliéster). A aplicação de tinta nos perfis é feita por projecção electrostática formando uma película contínua e uniforme com uma espessura entre os 45 e os 110µm. A lacagem permite um conjunto de cores e texturas diferentes, do tipo brilhante, metalizado, textura com efeito de madeira, entre outros. [22]

Devido à sua resistência, leveza e baixa manutenção, as caixilharias em alumínio são as mais correntemente usadas no nosso país. A capacidade resistente do alumínio permite suportar vidros pesados em caixilharias com uma espessura reduzida, além disso, o alumínio é um material resistente à corrosão e aos agentes atmosféricos e não necessita de uma manutenção regular. Por outro lado, sendo o alumínio um bom condutor de calor é um péssimo isolante térmico e, por esse motivo, era usual as caixilharias de alumínio apresentarem problemas de condensação.



Figura 2.33 – Perfil de uma caixilharia de alumínio tradicional (sem corte térmico)

Para controlar as perdas de calor do alumínio e limitar as condensações, o desenho da caixilharia foi repensado e foram desenvolvidas caixilharias com ruptura da ponte térmica. Estas caixilharias eram constituídas por dois semi-perfis de alumínio unidos por peças de baixa condutibilidade (ex: poliamida), designados por elementos de corte térmico. Na figura 2.... está representado uma caixilharia de alumínio com corte térmico e identificam-se os seus elementos constituintes.

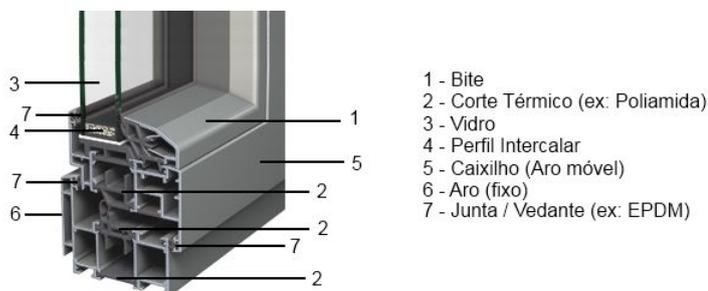


Figura 2.34 – Perfil de uma caixilharia de alumínio com corte térmico e seus elementos constituintes (adaptado de [25])

Os **Bites** são os perfis de pequena secção necessários para fixar os vidros na caixilharia e mantê-los na sua posição.

As **juntas** proporcionam estanqueidade à janela. Elas situam-se entre a folha e o aro e entre o vidro e a caixilharia. Estas juntas são fabricadas com um material especial desenhado para aguentar os grandes esforços a que está submetida a janela (ex: borracha sintética – EPDM).

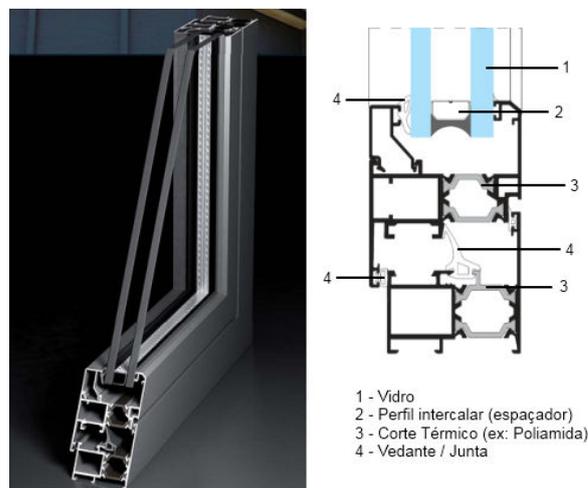


Figura 2.35 – Caixilharia de alumínio com corte térmico e representação esquemática (adaptado de [38])

Com esta solução, conseguiu-se isolar o semi-perfil interior do semi-perfil exterior e baixou-se consideravelmente o coeficiente de transmissão térmica da caixilharia de alumínio, mantendo o calor onde é necessário e minimizou-se a condensação no interior. [22][23]

2.4.2.3. Caixilharia de Plástico



Figura 2.36 – Caixilharia de plástico (PVC)

O policloreto de vinilo (PVC) é muito utilizado na construção e recentemente tem sido aplicado no fabrico de caixilharias. O policloreto de vinilo é uma combinação química de carbono, hidrogénio e cloro e provém do cloreto de sódio (sal comum) e do etileno, um derivado do petróleo. É obtido por polimerização do cloreto de vinilo cujo fabrico é realizado através do cloro e do etileno. É um termoplástico, isto é, amolece sob a acção do calor podendo ser moldado e quando arrefece recupera a consistência inicial mantendo a nova forma.

As principais características do PVC são as seguintes: [23][39]

- Material leve ($1,4\text{g/cm}^3$), o que facilita o seu manuseio e aplicação;
- Resistente aos agentes biológicos e à maioria dos agentes químicos;
- Bom isolante térmico, eléctrico e acústico;
- Resistente ao choque;
- Impermeável aos gases e líquidos;
- Resistente às intempéries;
- Durável: a sua vida útil em construções é superior a 50 anos;
- Não propaga as chamas, é auto-extinguível;
- Versátil e ambientalmente correcto;
- Reciclável;
- Fabricado com baixo consumo de energia;
- Contém cerca de 57% de cloro (derivado do cloreto de sódio) e 43% de petróleo.

O policloreto de vinilo é produzido por **extrusão**. Antes de entrar na extrusora a matéria-prima passa por uma **misturadora** onde são adicionados estabilizadores, produtos lubrificantes, aditivos para aumentar a dureza e pigmentos, até se obter uma homogeneização completa. A matéria-prima é depois depositada num cilindro com um eixo helicoidal, designado de extrusora. O material avança ao longo do cilindro onde é aquecido a uma temperatura elevada, comprimido e desgaseificado. A matéria fundida passa finalmente, à saída da extrusora, por um bocal onde é dada a forma desejada ao perfil e onde é criado no seu interior um sistema de câmaras múltiplas. Este processo designa-se de **perfilagem**. À saída da extrusora, o perfil extrusado, ainda quente, é submetido a um arrefecimento controlado e procede-se ao **corte** conferindo ao perfil as suas medidas definitivas e recebem um reforço em aço no interior dos perfis para suportar as pressões de vento e outras cargas de utilização. Depois de trabalhados e reforçados, os perfis são soldados, originando uma caixilharia monobloco com uma estanquidade elevada.

A degradação deste produto é complexa, dependendo de inúmeros factores e até o momento não se encontra totalmente definida. A degradação do PVC pode ser encarada como um conjunto de alterações lentas e irreversíveis na sua estrutura molecular, responsáveis pela modificação das propriedades físicas e químicas do material. O primeiro sinal de degradação do PVC é a liberação do cloreto de hidrogénio (HCL). Essa liberação é acompanhada de alteração de cor, atribuída ao aparecimento de duplas ligações de HCl que vão se formando ao longo da cadeia molecular. À medida que as duplas ligações aumentam, a cadeia absorve luz com maiores comprimentos de onda, sendo necessárias setes duplas ligações conjugadas para que a absorção dessa luz se torne visível e produza uma alteração na cor, causando um escurecimento gradual do PVC, que vai do amarelo, passando pelo castanho, até ao negro. A radiação solar possui influencia o processo de degradação dos polímeros de duas formas. Os raios ultravioletas possuem energia suficiente para romper as ligações químicas existentes, no entanto, podem ser bloqueados através da introdução de aditivos no polímero que funcionem como filtros. Por outro lado, os raios infravermelhos, podem elevar a temperatura superficial do material, favorecendo as reacções químicas de degradação.

Os perfis de PVC apresentam uma condutibilidade térmica baixa ($0,17\text{ W/m.K}$) quando comparada com a de outros materiais como o alumínio (160 W/m.K), proporcionando um melhor isolamento térmico. Além disso, o PVC apresenta uma vida útil superior à da madeira e do alumínio, apresentam facilidade de manutenção e limpeza, são resistentes aos agentes atmosféricos, biológicos e produtos utilizados na construção como o cimento e a cal. Por ser um termoplástico, é um material totalmente reciclável e permite que as janelas de PVC sejam produzidas com variadas formas geométricas e arcos de vários tipos com perfis brancos ou acabamentos de madeira ou em diversas cores, reproduzindo o

aspecto original de janelas antigas beneficiando das qualidades deste material. A elevada concentração de cloro na sua composição, faz com que o PVC apresente um baixo índice de inflamabilidade e uma elevada capacidade de extinção de chamas quando se encontra em combustão tornando-o indicado em aplicações onde é necessário uma elevada resistência ao fogo. [21][23][39]

As caixilharias de PVC são duráveis, leves, resistentes às intempéries, fáceis de instalar e limpar, não exigem praticamente manutenção. Outra das principais características deste material é a ausência de arestas ou ângulos pontiagudos. A cor branca resiste melhor à alta incidência de raios ultravioletas do que as caixilharias coloridas com pigmento. As caixilharias de PVC podem ser constituídas por várias câmaras que melhoram o seu desempenho térmico. Actualmente, existem algumas propostas de caixilharias que aplicam nas câmaras ocas (cavidades), um material de enchimento com uma condutibilidade baixa que melhoram ainda mais o desempenho térmico destas caixilharias.

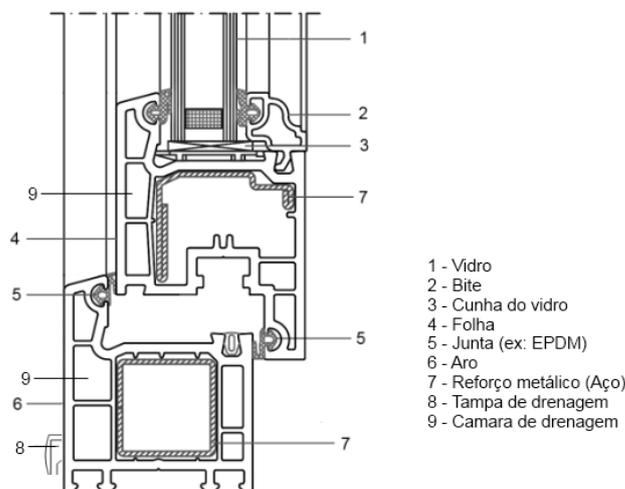


Figura 2.37 – Perfil de uma caixilharia de PVC (adaptado de [37])

As **câmaras de drenagem** são orifícios que conduzem a água para o exterior sem interferir com as ferragens da janela e outras partes metálicas.

A **tampa de drenagem** protege do vento o orifício por onde é feita a drenagem para garantir que a água desagua eficazmente para o exterior.

Como o PVC possui uma condutibilidade muito baixa, quando comparado com o alumínio, não necessita de elementos de corte térmico, como as caixilharias metálicas.

2.4.2.4. Caixilharia Composta

Além das caixilharias existentes nos materiais mencionados, os fabricantes disponibilizam também caixilharias com uma combinação destes materiais (ex: madeira-alumínio, madeira-PVC). Estas caixilharias desempenham boas prestações ao nível do isolamento, especialmente quando associadas a vidros múltiplos. Além das evidentes vantagens estéticas, este tipo de caixilharia permite conjugar as vantagens de cada material, colocando no exterior os materiais que resistem melhor às intempéries e que necessitam de menor manutenção. Nas caixilharias de madeira-alumínio ou madeira-PVC, o alumínio (ou o PVC) ficam expostos aos agentes atmosféricos e a madeira fica protegida das

intempéries, e proporciona conforto interior. Nas figuras seguintes estão alguns exemplos de caixilharias compostas comercializadas no nosso país.



Figura 2.38 – Caixilharia composta de alumínio-madeira [43]



Figura 2.39 – Caixilharia composta de PVC-madeira [25]



Figura 2.40 – Caixilharia composta de PVC-alumínio [25]

Existem inclusive, alguns exemplos de caixilharias compostas com os três materiais (alumínio-PVC-madeira).



Figura 2.41 – Caixilharia composta de alumínio-PVC-madeira de uma janela de correr [25]

2.4.2.5. Novos Materiais

O sector das caixilharias está em constante inovação para dar resposta aos projectos mais exigentes. Actualmente estão a ser desenvolvidas caixilharias em fibra de vidro. Estas caixilharias podem ser pintadas, são duráveis e são resistentes às intempéries, necessitando de pouca manutenção. Além disso, a fibra de vidro, tal como o alumínio, é um material muito resistente, podendo fabricar-se perfis muito estreitos e aumentar a área envidraçada. O desempenho térmico destas caixilharias pode vir melhorado se as cavidades que existem no interior destas caixilharias forem preenchidas com um material de condutibilidade reduzida.

Esta tecnologia ainda é muito recente e dispendiosa e a sua aplicação é pouco expressiva.

2.4.3. PERFIL INTERCALAR (ESPAÇADOR)

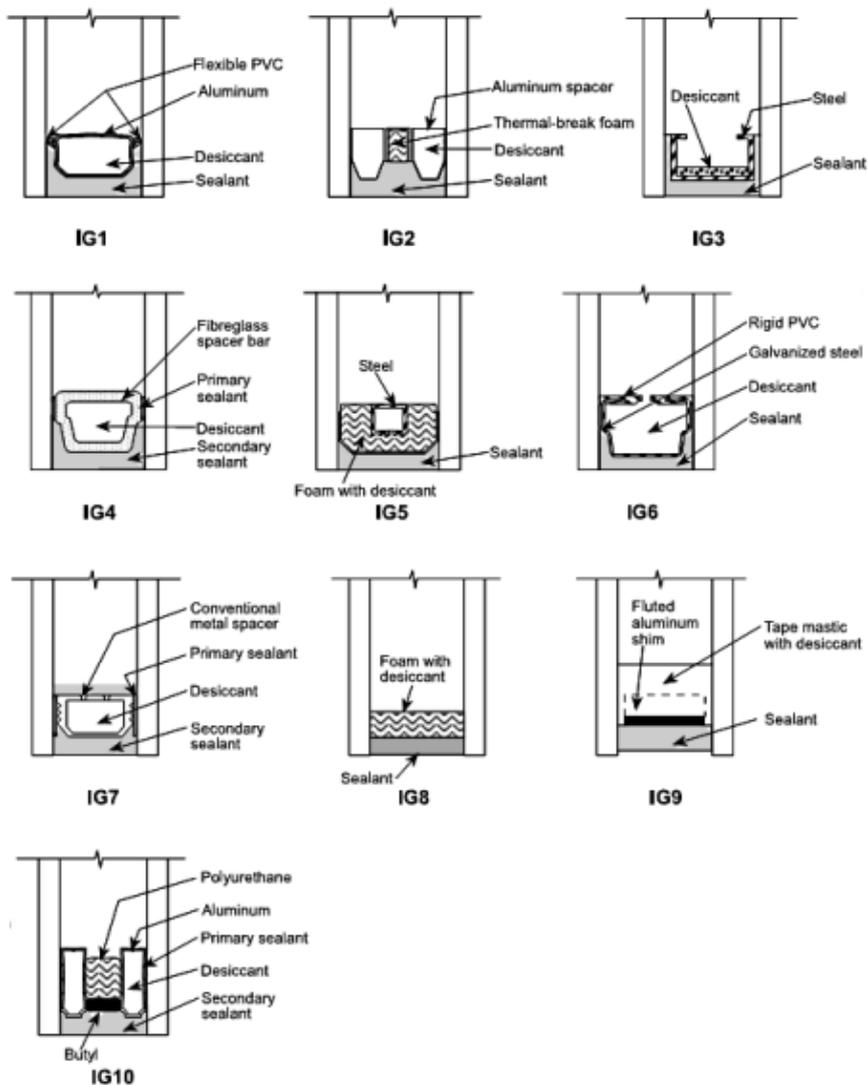


Figura 2.42 – Perfis Intercalares [28]

Os perfis intercalares são os elementos que separam as folhas de vidro num sistema de vidros múltiplos (ex: vidro duplo ou triplo) e geralmente são em alumínio ou aço. A condutibilidade térmica elevada destes materiais metálicos criam uma ponte térmica no vão envidraçado, uma fragilidade na perspectiva da térmica dos edifícios. A existência desta ponte térmica aumenta o risco de ocorrência de condensações, especialmente no contorno da área envidraçada.

2.4.3.1. Intercalares de baixa condutividade

Ao longo da última década têm surgido no mercado intercalares com novos materiais e novas tecnologias construtivas. São intercalares com melhor desempenho térmico, que aumentam a resistência térmica do envidraçado, reduzindo assim o risco de ocorrência de condensações e designam-se por WET (“Warm-Edge Technology”). Estes intercalares possuem materiais com condutibilidade térmica baixa (ex: poliuretano) ou são montados nos envidraçados com elementos de corte térmico. Quando utilizados com vidros de isolamento térmico (IGU) com películas de baixa emissividade e gases pesados como o kripton e o argón, selados na camada intermédia, podem reduzir consideravelmente a transferência global de calor pelo vão envidraçado e o risco de ocorrência de condensações. [35]

2.4.4. DISPOSITIVOS DE OCLUSÃO E SOMBREAMENTO

Os dispositivos de oclusão e sombreamento actuam como sistemas de sombreamento contra a radiação solar. Além disso, os dispositivos de oclusão podem ajudar a diminuir o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados, melhorando o isolamento térmico global e por extensão, o conforto térmico no interior da habitação. Ao longo dos anos, tem-se assistido a uma melhoria no desempenho térmico dos vãos envidraçados, resultado da aplicação de vidros múltiplos e películas de baixa emissividade e da melhoria da performance térmica das caixilharias. Contudo, a introdução de folhas adicionais de vidros ou de películas de baixa emissividade podem reduzir os ganhos solares. Na estação de arrefecimento, esta situação é desejável, no entanto, na estação de aquecimento os ganhos solares são vantajosos porque aquecem passivamente o interior da habitação poupando energia. Por outro lado, o coeficiente de transmissão térmica deverá ser baixo para reduzir as perdas por condução sobretudo durante o período nocturno. [54]

Nas figuras seguintes apresentam-se alguns exemplos de dispositivos de sombreamento.



Figura 2.43 – Exemplos de dispositivos de sombreamento – Portadas (edifício da foz do porto à esquerda, residência universitária de Coimbra à direita) [46]



Figura 2.44 –Portadas de um edifício de habitação em Carabanchel [47]

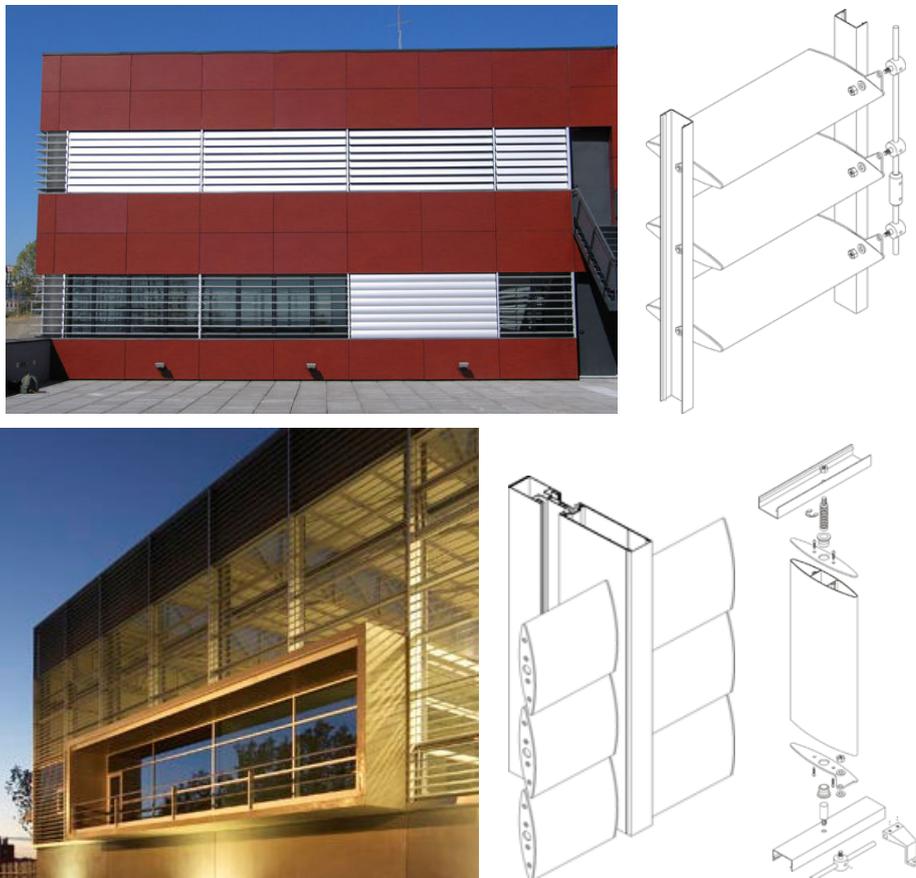


Figura 2.45 – Exemplos de dispositivos de sombreamento – Brise-Soleils [34]

Actualmente não é tecnicamente possível ter vidros com um factor solar alto e baixo. Uma forma de controlar os ganhos solares pelos envidraçados é introduzir dispositivos de oclusão ou de sombreamento. Os dispositivos de sombreamento permitem encerrar os vãos envidraçados durante a noite e proteger os vãos envidraçados dos raios solares, no verão. [54]

Os sistemas de sombreamento são classificados em função da posição que ocupam no edifício, podendo ser aplicados no exterior ou no interior ou entre folhas de vidros, e em função da possibilidade de manuseamento, sendo classificados como fixos ou móveis. As palas verticais e horizontais, as galerias, arcadas e as paredes reticulares constituem alguns exemplos de elementos fixos de sombreamento. [48]

Existem diversos sistemas de sombreamento no mercado nacional. Segundo Jesus Palinha, os dispositivos de sombreamento mais utilizados no mercado português são: [48]

- **Palas horizontais e verticais** - são elementos fixos de sombreamento aplicados pelo exterior e muitas vezes, elementos do próprio corpo da fachada que se projectam ou que estão em consola. É especialmente vantajosa quando orientada a sul impedindo a entrada dos raios solares quando o sol se encontra na posição mais elevada. Podem funcionar como “light shelves”, evitando a entrada de luz directa, reflectindo-a para o tecto, no interior do edifício melhorando as condições de iluminação natural.



Figura 2.46 – Palas horizontais e verticais da Cité-Refuge de l’Armée du Salut, de Le Corbusier, em Paris [52]

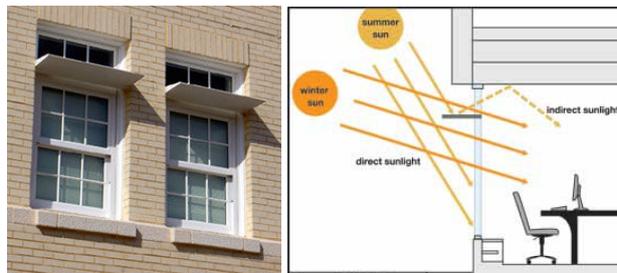


Figura 2.47 – Exemplo de pala horizontal a funcionar como “light shelf” [50][51]

- **Lamelas ou Brise-Soleils** – Sistema de sombreamento composto por um conjunto de lamelas de madeira, plástico ou metal de dimensões variáveis e instalado na vertical ou horizontalmente no plano da fachada para impedir a acção directa do sol. Nos sistemas em que as lamelas são orientáveis, podem-se mover para otimizar o fluxo de calor e a intensidade de luz natural, conforme a vontade do ocupante do compartimento, permitindo diferentes graus de sombreamento e iluminação. Actualmente existem sistemas de brise-soleils que incorporam sistemas fotovoltaicos nas suas lamelas que geram energia e simultaneamente fornecem sombreamento.



Figura 2.48 – Brise-soleils [49]

- **Portadas** – Consiste num sistema de portas de deslizar ou de batente, estas últimas, geralmente, de folha dupla ou simples. Podem localizar-se no interior ou no exterior do edifício. Quando são aplicadas pelo exterior, podem bloquear por completo a entrada dos raios solares no vão envidraçado. Podem ser de alumínio, PVC ou madeira. Além de sombrear, pode cerrar por completo o vão, aumentando a segurança e a privacidade dos ocupantes. As portadas com lamelas permitem regular a intensidade luminosa que entra no compartimento.



Figura 2.49 – Portadas [25]

- **Venezianas** – É um conjunto de lâminas de dimensões pouco variáveis. Quando o sistema é utilizado no interior, as lâminas são pequenas e feitas de materiais mais frágil e leve, quando são colocadas pelo exterior, as lâminas são maiores e mais resistentes. Neste sistema, as laminas podem ser recolhidas, através de um controlo manual ou automático, expondo totalmente o vão envidraçado. Este sistema é bastante versátil, pois permite controlar a entrada de luz natural e proteger o interior da exposição directa aos raios solares, através da orientação das lâminas.



Figura 2.50 – Venezianas [49]

- **Persianas** – Este sistema consiste num conjunto de réguas que se movem na vertical por enrolamento. As réguas possuem pequenos orifícios que permitem a ventilação e podem ser fabricadas em PVC ou alumínio. É o sistema mais usual nos edifícios de habitação do nosso país.



Figura 2.51 – Réguas horizontais e estores [25][48]

- **Telas de rolo** – Consiste num material liso e flexível (PVC, poliéster ou fibra de vidro) mais ou menos transparente que pode localizar-se, quer no interior, quer no exterior do edifício e que impede a passagem dos raios solares. Este sistema é mais eficaz no controlo da transferência de calor quando aplicado pelo exterior. Quando aplicado pelo interior, funciona melhor como um dispositivo de regulação da luminosidade.



Figura 2.52 – Telas de rolo aplicadas no exterior e interior [49]

- **Cortinas** – sistema utilizado no interior do edifício. Pela sua localização, normalmente é utilizado em conjunto com outro sistema de maior eficácia no sombreamento. Este sistema tem uma forte componente decorativa do espaço. Os materiais usados nas cortinas são bastante diversificados: tecidos, poliéster e PVC. O mecanismo de funcionamento pode ser manual ou automático.



Figura 2.53 – Cortinas de bandas verticais e romana [49]

- **Toldos** – Este sistema é utilizado unicamente no exterior do edifício. Por vezes, a sua aplicação, deve-se ao facto de ser necessário uma protecção solar eficaz numa zona da fachada, termicamente mal dimensionada. Porém, muitas vezes, a sua utilização deve-se a uma necessidade de ampliação do espaço interior para o exterior para o desenvolvimento de uma actividade temporária. Estes sistemas podem ser fixos ou móveis e em diversos materiais.



Figura 2.54 – Toldos [49]

- **Vidros avançados de controlo solar** – Este sistema consiste na introdução de um dispositivo de oclusão entre duas folhas de vidros (ex: veneziana). O sistema assim formado oferece as vantagens de um sistema de venezianas, proporcionando protecção solar e a regulação da entrada de luz. Uma vez que não necessita de manutenção, este sistema mostra-se vantajoso quando comparado com o sistema de venezianas pelo exterior. Contudo, o último possibilita uma melhor protecção solar.



Figura 2.55 – Vidros avançados de controlo solar [49]

2.5. DESEMPENHO TÉRMICO DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS

Habitualmente os vãos envidraçados são apontados como o elemento crítico da envolvente dos edifícios para o seu desempenho térmico e energético global. Se por um lado, os envidraçados podem permitir uma melhoria da ambiência interior através de ganhos solares na estação de aquecimento é também através deles que ocorrem perdas térmicas significativas para o exterior. Ao seleccionar um envidraçado, deve garantir-se que o desempenho térmico será satisfatório tanto para a estação de aquecimento como para a estação de arrefecimento. Segundo Rodrigues, “se na estação de aquecimento, uma boa capacidade de isolamento térmico dos envidraçados é uma exigência fundamental, na estação de arrefecimento podem ter que ser exigidas aos vidros propriedades adicionais de controlo de radiação solar, nomeadamente, em caso de protecção solar insuficiente, por elementos complementares ao vão.” [18]

Os vãos envidraçados separam dois ambientes com condições térmicas muito distintas que influenciam as trocas energéticas entre si. Os parâmetros climáticos que determinam a transferência de calor através dos vãos envidraçados são a temperatura do ar exterior e a radiação solar. As condições do ambiente exterior e o desempenho térmico da envolvente dos edifícios determinam a ordem de grandeza das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento a satisfazer para garantir um determinado nível de conforto térmico no interior dos edifícios.

O método mais comum de classificar o desempenho térmico de um vão envidraçado é através do seu coeficiente de transmissão térmica (U) e do factor solar (g_{\perp}). O coeficiente de transmissão térmica é

uma medida da quantidade do fluxo de calor que se perde e o factor solar é a fracção de energia solar transmitida através do vão envidraçado.

2.5.1. O VIDRO E A ENERGIA

Visto os vãos envidraçados serem os elementos críticos da envolvente dos edifícios, onde ocorrem as maiores transmissões de calor, as suas áreas deverão ser as adequadas. Quanto maior for a área envidraçada maiores serão os ganhos solares no Inverno e maiores serão as perdas térmicas por condução, pelo que é fundamental compatibilizar estes dois comportamentos fazendo o dimensionamento dos vãos envidraçados e dos respectivos sistemas de protecção, tendo em consideração a sua orientação e o percurso que o sol descreve ao longo do ano e o tipo de radiação solar (directa ou difusa) que irá predominar em cada instante.

A diferença de temperatura entre o ambiente interior e o exterior originam o estabelecimento de fluxos de energia entre si, sob a forma de calor. Estes fluxos de energia ocorrem nos dois sentidos, isto é, no inverno (período de aquecimento) o fluxo de calor dá-se, fundamentalmente, do interior para o exterior originando perdas térmicas e no verão (período de arrefecimento) o fluxo tende a inverter o seu sentido, dando origem a ganhos térmicos. As perdas térmicas que ocorrem no inverno são responsáveis pelas necessidades de aquecimento dos edifícios, pois, reduzem a temperatura interior. Para melhorar as condições de conforto nos edifícios e racionalizar os consumos energéticos, o projectista de térmica deverá prever e implementar medidas eficazes que permitam reduzir as perdas térmicas, quer através do isolamento térmico dos elementos opacos da envolvente, quer através da utilização de vãos envidraçados com resistência térmica elevada e baixa emissividade.

2.5.1.1. Perdas Térmicas

O vidro conduz relativamente bem o calor. O risco de condensação de um vidro simples, reduz ainda mais a sua já baixa resistência térmica. Para aumentar a sua resistência térmica é necessário introduzir outras folhas de vidro separadas por espaços intermédios (ex: vidro duplo). “O princípio do vidro duplo consiste em encerrar entre dois vidros uma lâmina de ar seco e imóvel com o objectivo de limitar as transferências térmicas por convecção e de tirar vantagem da baixa conductividade térmica do ar.” [53] O coeficiente de transmissão térmica (U_g) é a unidade de medida utilizada para determinar as perdas térmicas de um elemento de construção e representa o fluxo de calor que atravessa uma área de um m^2 da superfície quando existe uma diferença de temperatura de um grau entre ambas as faces do elemento.

Quando um elemento está em contacto com o ar, troca calor por condução e por convecção com o ar e por radiação com todo o seu ambiente circundante. Para o vidro, o coeficiente de transmissão térmica é determinado através da sua condutibilidade térmica e através de dois outros parâmetros, designados por condutância térmica superficial interior e exterior (h_i e h_e). Estes coeficientes, são uma medida da transferência de calor por convecção e radiação que ocorrem entre o elemento e o ambiente interior e exterior. Os valores normalizados para os coeficientes de transmissão térmica superficial interior e exterior de superfícies verticais são, segundo a norma EN 673:

$$h_e = 23 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$$

$$h_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$$

O valor convencional do coeficiente de transmissão térmica global do vidro (U_g) é obtido através destes parâmetros. Quanto mais pequeno for o coeficiente de transmissão térmica, menores serão as perdas de calor e melhor será o isolamento do vidro.

2.5.1.2. Ganhos Solares

A energia solar é transmitida sob a forma de ondas electromagnéticas aquecendo a superfície terrestre por radiação. A quantidade de energia solar recebida varia consoante a orientação do sol, a hora do dia e a altura do ano considerada e designa-se por insolação. A radiação solar aquece a envolvente opaca dos edificios e esta, por sua vez, aquece o ambiente interior dos edificios por condução, convecção e radiação, contudo, é através da entrada dos raios solares pelos dos vãos envidraçados que se obtêm os maiores ganhos solares. O sol é uma fonte de calor gratuita e como tal, deve-se potenciar a sua utilização. No inverno, constitui uma fonte de calor importante, contribuindo para o aumento da temperatura interior dos edificios, principalmente através dos envidraçados, reduzindo os custos com a energia necessária para o aquecimento. No verão é necessário atenuar os efeitos da radiação solar pois, os ganhos solares podem provocar o sobreaquecimento do ambiente interior. Esta dualidade entre benefícios versus inconvenientes coloca sérios desafios para a concepção dos edificios.

É importante compreender de que forma a radiação solar interage com a envolvente dos edificios e principalmente, como é que se processa a transmissão de calor pelos vãos envidraçados.

Existem dois tipos de radiação solar: a radiação directa e a radiação difusa. A radiação directa, conforme o nome indica, é a radiação que provém directamente do sol através de um raio solar. A radiação difusa é a que resulta da difracção das ondas electromagnéticas provocada por moléculas de água, poeiras em suspensão e outros obstáculos na atmosfera.

A radiação solar é composta por três gamas de frequências do espectro electromagnético: os ultravioletas (UV), a luz visível (banda entre os 380nm e os 780nm) e os infravermelhos (IV). Todos os corpos, incluindo o vidro, emitem e absorvem energia na forma de ondas electromagnéticas. À temperatura normal, os corpos emitem calor na banda dos infravermelhos. [55]

Quando as ondas electromagnéticas da radiação solar atingem a superfície do vidro uma parte é reflectida, outra transmitida e outra absorvida pelo vidro. Estes fluxos de energia permitem fazer um balanço da energia solar incidente no vidro, através da expressão seguinte:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.22)$$

Sendo, α o coeficiente de absorção, ρ o coeficiente de reflexão e τ o coeficiente de transmissão. A soma dos três coeficientes é igual à unidade. Na figura 2.56 estão representados os fluxos de energia incidentes no vidro devido à radiação solar.

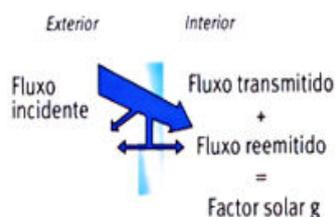


Figura 2.56 – Balanço da energia solar incidente [53]

Para quantificar os ganhos solares através de um vão envidraçado, utiliza-se uma grandeza designada de factor solar (g_{\perp}). Segundo o RCCTE, o factor solar de uma vão envidraçado é o quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respectivo dispositivo de protecção e a energia da radiação solar que nele incide.

Evidenciada a importância da radiação solar na concepção do edifício, é essencial procurar otimizar os ganhos solares, limitando os riscos de sobreaquecimento através da localização, orientação e dimensão dos vãos envidraçados nas fachadas dos edifícios, assim como, através da utilização de dispositivos de sombreamento eficazes.

2.5.1.3. Risco da Ocorrência de Condensações

As condensações ocorrem quando o vapor de água presente no ar se deposita sobre uma superfície fria, cuja temperatura esta abaixo da temperatura ponto de orvalho, tal como o vidro ou a caixilharia quando expostos a um ambiente interior com uma humidade relativa elevada. Os factores que condicionam a condensação superficial são:

- Clima exterior;
- Temperatura do ar interior;
- Produção de humidade do edifício;
- Débito da ventilação;
- Temperatura superficial da parede

O ar pode conter quantidades variáveis de vapor de água ou humidade. Quanto mais quente estiver o ar, mais humidade pode conter. O grau de humidade contido no ar, expresso como uma percentagem da quantidade máxima que o ar consegue conter para uma dada temperatura, é designado de humidade relativa. Por razões de saúde e conforto, o ar deve conter alguma humidade.[36]

A humidade relativa de um compartimento pode aumentar, se aumentar a produção de vapor de água ou se reduzir a temperatura. Quando a humidade relativa alcança os 100% ocorrem condensações. A temperatura a partir da qual ocorre a condensação designa-se por temperatura ponto de orvalho do ar.

Quando o vapor de água contido no ar entra em contacto com uma superfície fria da habitação, pode arrefecer até à sua temperatura ponto de orvalho, originando condensações na superfície.

As condensações geralmente ocorrem em primeiro lugar nas janelas. Isto ocorre porque as janelas possuem uma resistência térmica inferior à das paredes, tectos e chão, resultando numa temperatura superficial inferior à destes elementos durante a estação de aquecimento. Se o ar de uma habitação tiver humidade suficiente, a água presente no ar irá condensar quando entrar em contacto com a superfície da janela. [36][14]

A figura seguinte ilustra as condições para a ocorrência de condensações no centro de 5 sistemas envidraçados. Os valores baseiam-se em condições de inverno (EUA): temperatura interior de 70°F (21°C) e sem radiação solar incidente. Nos pontos em cada curva e acima de cada uma delas, as condições são propícias à ocorrência de condensações. Abaixo de cada uma das curvas não deverá ocorrer condensação nos envidraçados.

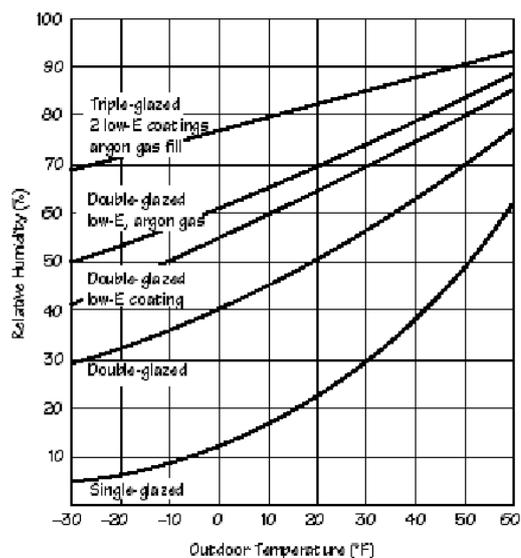


Figura 2.57 – Umidade relativa e temperatura exterior para a ocorrência de condensação em vários sistemas envidraçados, para uma temperatura de 70°F [36]

Observando o gráfico podemos concluir que o risco da ocorrência de condensação diminui à medida que aumenta a capacidade de isolamento térmico do vidro. Por outro lado, mesmo a uma temperatura exterior negativa de -30°F (-34°C), é necessário que a umidade relativa seja cerca de 70% para que ocorram condensações no envidraçado triplo com duas películas de baixa emissividade e preenchido com argon nos espaços de ar. Por sua vez, no vidro simples formam-se condensações, para uma temperatura exterior de 10°F (-12°C) e uma umidade relativa de apenas 18%.

A utilização de um perfil intercalar metálico para selar o vidro duplo cria uma ponte térmica. O efeito desfavorável dessa ponte térmica será tanto maior quanto mais isolante for o vidro e quão melhor a performance térmica da caixilharia. Devido às pontes térmicas originadas pelos perfis intercalares, a condensação nos vãos envidraçados com vidros duplos produz efeitos diferentes, consoante se desenvolva no interior ou no exterior. A condensação superficial no interior, geralmente inicia-se nos cantos. O interior do compartimento está a uma temperatura superior à temperatura exterior gerando-se um fluxo de calor para o exterior. A existência da ponte térmica na zona onde se encontra o perfil intercalar conduz o calor rapidamente para o exterior fazendo diminuir a temperatura superficial em torno do perfil intercalar. Essa diminuição da temperatura pode originar condensações nos cantos. [53]

No exterior do envidraçado ocorre o fenómeno inverso. A ponte térmica, devido ao perfil intercalar, conduz rapidamente o calor para o exterior aumentando a temperatura superficial da periferia do vidro exterior. O centro do vidro encontra-se agora a uma temperatura inferior à da periferia, podendo ocasionar-se condensações na parte central do vidro. [53]

A condensação não é um problema dos climas frios. Nos edifícios, com ar condicionado, nos climas quentes e húmidos, a umidade pode condensar na superfície exterior de uma janela com resistência térmica baixa.

Se os riscos de condensação não forem minimizados, poderão surgir problemas nas caixilharias e nos dispositivos de oclusão internos. A água pode deteriorar a pintura e as mobílias, reduzindo a durabilidade dos elementos.

Os riscos de ocorrência de condensação reduzem-se quando as janelas são eficientes. Neste tipo de janelas, é pouco provável que o ar, ao entrar em contacto com a sua superfície, diminua a sua temperatura ao ponto de atingir a sua temperatura ponto de orvalho porque, ao longo da estação de aquecimento, as suas temperaturas superficiais mantêm-se mais altas do que nas janelas com vidro simples, ou com perfis intercalares metálicos. [36]

2.5.2. SIMULAÇÃO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA ATRAVÉS DAS CAIXILHARIAS

O desempenho térmico do vão envidraçado é a soma ponderada do desempenho térmico das suas partes. As caixilharias ocupam cerca de 20% a 30% da área do vão envidraçado. Apesar de ocuparem apenas um terço da área do vão envidraçado, o desempenho térmico das caixilharias tem um contributo significativo no coeficiente de transmissão térmico global do vão envidraçado. Portanto, é de todo o interesse desenvolver modelos de cálculo que permitam medir o desempenho térmico de cada uma das partes.

2.5.2.1. Estrutura e o Desempenho Térmico

A quantificação da quantidade de calor que atravessa uma caixilharia sólida pode ser facilmente determinada resolvendo a equação que traduz a transferência de calor por condução. O procedimento para determinar o fluxo de calor através das caixilharias que contêm cavidades ocas no seu interior é mais complexo. As caixilharias de PVC e alumínio contêm cavidade ôcas que influenciam significativamente a capacidade de isolamento das caixilharias. O fluxo de calor nestas caixilharias envolve os três modos de transferência de calor (condução, convecção e radiação). As caixilharias de alumínio precisam de ser convenientemente montadas para terem um bom desempenho térmico. De facto, o alumínio, sendo um óptimo condutor de calor, tem de ser aplicado em conjunto com outros materiais de corte térmico (ex: poliamida) para melhorar o desempenho térmico da caixilharia. Estes dois materiais e a estrutura reticulada devido às cavidades ocas da caixilharia formam uma geometria complexa e difícil de modelar. Para determinar o coeficiente de transmissão térmico da caixilharia é preciso estimar o efeito da transferência de calor por convecção natural e por radiação no interior das cavidades. [16]

Gustavsen constatou que até há uns anos atrás, muitos dos trabalhos para desenvolver um método preciso para descrever o fluxo de calor através dos envidraçados focava-se na cavidade entre os panos de vidro. [16] O objectivo inicial era o de desenvolver correlações precisas para os efeitos da convecção natural no interior das camadas de vidros múltiplos.

2.5.2.2. Método europeu VS Método Americano

Actualmente existem dois métodos que permitem determinar o coeficiente de transmissão térmica das janelas e caixilharias, designados comumente pelo método do ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) e o método ISO (descrito na norma ISO 10077-2). O método do ASHRAE e o método ISO estão também descritos na norma ISO 15099. Estes dois métodos diferem na forma como consideram o contributo do perfil intercalar para a transferência térmica através da caixilharia e do vidro na zona de bordo. Estas duas normas dão valores diferentes para o coeficiente de transmissão térmica das caixilharias. Esta diferença deve-se ao facto de na norma ISO 10077-2 se introduzir um isolante térmico, conforme se explica mais adiante, no lugar do vidro para determinar o U da caixilharia enquanto no método do ASHRAE, o U da caixilharia é determinado

com o vidro na caixilharia. [15] Blanusa, comparou os dois métodos e concluiu que dão valores diferentes para o U da caixilharia e da janela. A diferença é maior em janelas pequenas. Blanusa ainda refere que a diferença máxima entre o U das janelas obtido pelos dois métodos é de 3%. [56]

2.5.2.3. Simulação do Efeito das Cavidades na Transferência de Calor

A transmissão térmica da caixilharia também pode ser determinada através de programas de cálculo automático que, recorrendo a métodos de cálculo numérico (elementos finitos e diferenças finitas) especificados nas normas internacionais, determinam as características térmicas das caixilharias. Além do método numérico, as normas especificam métodos de ensaio para determinar o coeficiente de transmissão térmica das caixilharias (ex: método de “Hot-Box”).

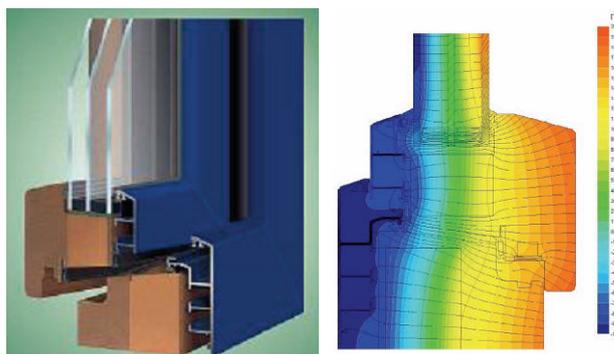


Figura 2.58 – Perfil de uma caixilharia de madeira-metal e representação das linhas isotérmicas [15]

O método mais utilizado no mercado nacional português para determinar o coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados é o especificado na norma internacional ISO 10077. A norma divide-se em duas partes ISO 10077 – 1 (Geral) e ISO 10077-2 (Métodos numéricos para caixilharias). A segunda parte de norma descreve um método para determinar o coeficiente de transmissão térmica das caixilharias e estabelece critérios de validação para o desenvolvimento de programas de cálculo automático. O valor obtido pode depois ser utilizado nos procedimentos descritos na primeira parte da norma para determinar o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados.

A norma ISO 10077-2 define uma condutibilidade térmica efectiva para calcular o coeficiente de transmissão térmica através das cavidades. A condutibilidade efectiva, é dada por:

$$\lambda_{eq} = \frac{L}{R} \quad (2.23)$$

Sendo, L a dimensão da cavidade na direcção do fluxo e R a resistência térmica dada por:

$$R = \frac{1}{h_a + h_r} \quad (2.24)$$

h_a e h_r representam a condutância térmica de convecção e radiação, respectivamente.

A norma ISO 10077-2 prevê um método para transformar uma cavidade não rectangular, numa cavidade rectangular equivalente. Na figura 2.59 está esquematizado como se poderá determinar a cavidade rectangular equivalente.

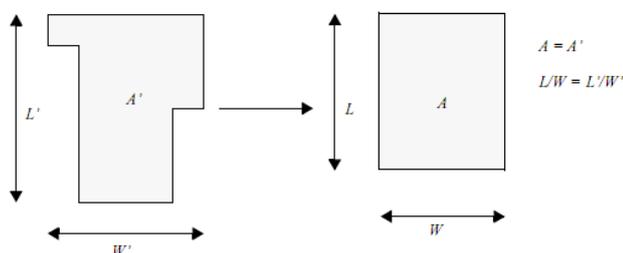


Figura 2.59 – Transformar uma cavidade não rectangular numa cavidade rectangular equivalente, segundo a norma ISO 10077-2 [15]

Para calcular o coeficiente de transmissão térmico da caixilharia, a norma determina que se substitua o envidraçado por um painel de um material de baixa condutibilidade (\$\lambda=0.035\$ W/m.K), respeitando todos os espaçamentos mencionados na figura 2.60.

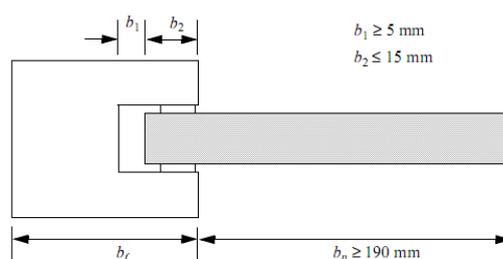


Figura 2.60 – Caixilharia com painel isolante. Modelo de cálculo de \$U_f\$. ISO 10077-2 [15]

A equação que permite determinar o coeficiente de transmissão térmica da caixilharia é dada por:

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p \cdot b_p}{b_f} \quad (2.25)$$

Sendo, \$U_p\$, a transmissão térmica no centro do painel, \$b_f\$ é a largura em projecção da caixilharia e \$b_p\$ é a largura visível do painel. \$L_f^{2D}\$ representa a transmissão de calor bidimensional através da secção da caixilharia da figura 2.58. \$L_f^{2D}\$ é calculado a partir do fluxo total por metro através da secção dividido pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior conforme a ISO 10211 – *Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations*.

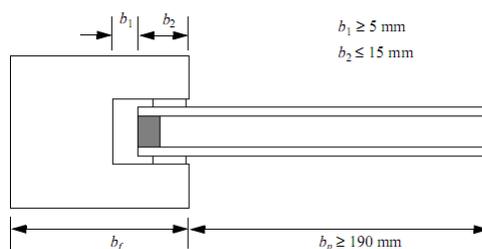


Figura 2.61 – Caixilharia com o vidro duplo. Modelo de cálculo de ψ . ISO 10077-2 [15]

A transmissão térmica linear (ψ), na interacção entre a caixilharia e o vidro pode ser determinada por:

$$\psi = L_{\psi}^{2D} - U_f \cdot b_f - U_g \cdot b_g \quad (2.26)$$

Onde, L_{ψ}^{2D} representa a transmissão de calor bidimensional através do elemento, U_g é o coeficiente de transmissão térmico do vidro na zona central, b_g é a largura visível do vidro e U_f é dado pela expressão anterior. A transmissão térmica do vão envidraçado (U_{tot}), virá:

$$U_{tot} = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_{tot}} \quad (2.27)$$

2.5.3. EFEITO DA CAIXILHARIA E DO PERFIL INTERCALAR NO U DO VÃO ENVIDRAÇADO

O desempenho térmico da caixilharia contribui para o desempenho térmico global do vão envidraçado, pois, o coeficiente de transmissão térmico da Janela é uma média ponderada das áreas individuais de cada componente (caixilharia, perfil intercalar e envidraçado).

Na figura 2.62, estão representados os resultados de um ensaio realizado com os intercalares representados na figura 2.42 para determinar a influência de cada intercalar na transmissão térmica do envidraçado.

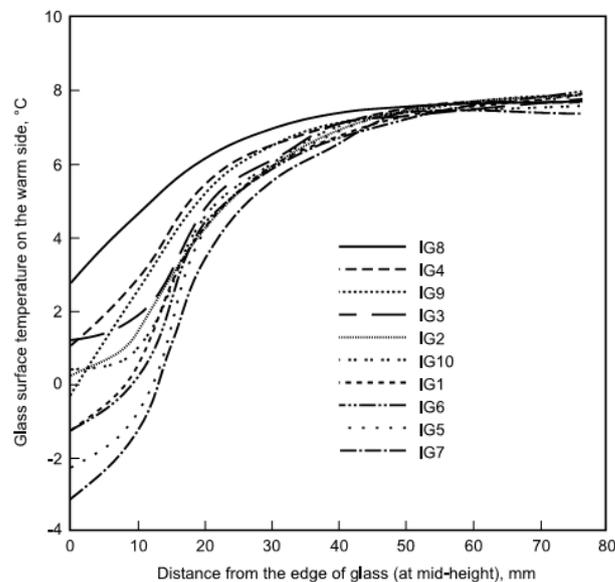


Figura 2.62 – Efeito na temperatura da superfície interior do envidraçado devido ao uso de diferentes perfis intercalares [35]

Para isso, montaram-se os 10 intercalares num vidro duplo, preenchidos por ar, sem a caixilharia e submetem-se os envidraçados a um gradiente de temperaturas (21°C no interior e -18°C) no exterior, obtendo-se o gráfico seguinte. Observando o gráfico, constata-se que o intercalar IG8 originou a temperatura mais elevada no bordo do vidro, tornando-o a melhor opção para o controlo da

condensação. O perfil IG4 e IG9 chegaram sensivelmente à mesma diferença de temperatura e tiveram a segunda melhor temperatura. O intercaler IG7 (intercaler convencional) teve o pior desempenho. A Figura 2.62 ainda mostra que quanto mais afastado se estiver do bordo do vidro, mais próximas se tornam as temperaturas superficiais interiores do vidro. [35]

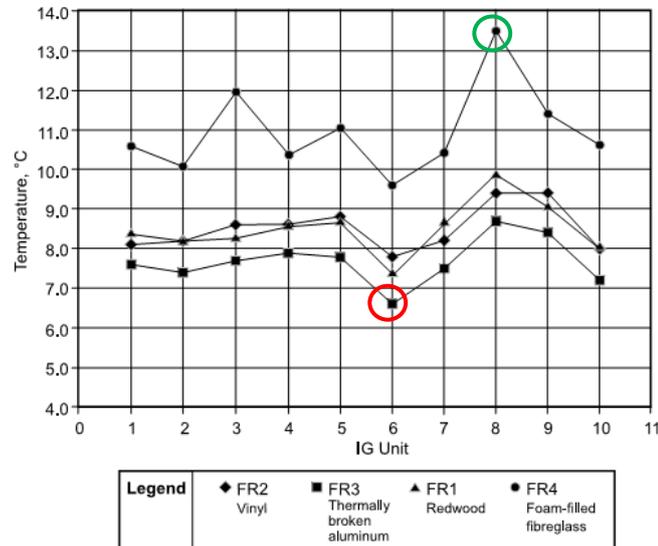


Figura 2.63 – Efeito do material da caixilharia, com diferentes perfis intercalares, para a temperatura na superfície interior do envidraçado [35]

Seguidamente, os 10 perfis intercalares, juntamente com o envidraçado, foram montados em 4 tipos de caixilharia diferentes (PVC, Alumínio com corte térmico, Madeira e Fibra de vidro) para avaliar o desempenho dos intercalares numa janela completa. A figura 2.63 apresenta os resultados das temperaturas medidas a 10mm do bordo do envidraçado, obtidos por cada intercaler e por cada tipo de caixilharia quando submetidos a uma diferença de temperatura de 38K. Observando o gráfico, constata-se que a janela com o intercaler IG8 montado na caixilharia FR4: Fibras de vidro, garante a temperatura superficial interior mais elevada no envidraçado, reduzindo o risco de condensação. [35]

2.5.4. EFEITO DO DISPOSITIVO DE OCLUSÃO E DE SOMBREAMENTO NA PERFORMANCE DO VÃO ENVIDRAÇADO

Os dispositivos de oclusão e sombreamento permitem regular a quantidade de luz natural e controlar os ganhos solares que incidem sobre os vãos envidraçados, interceptando a radiação solar antes de esta atingir a janela e dissipando o calor absorvido no exterior do edifício através de correntes de ar. Isto significa que os dispositivos de oclusão dão um contributo significativo para a redução da factura energética permitindo evitar o recurso a sistemas mecânicos de arrefecimento (ex: ar-condicionado).

O sombreamento pelo interior geralmente é menos eficaz porque quando os raios solares atravessam o vidro alteram o seu comprimento de onda e ficam retidos no espaço interior, aquecendo-o (efeito de estufa). No sombreamento exterior, os raios solares ao interceptarem os elementos, dispersam antes de atingirem o vidro, reduzindo até 80% os ganhos de calor. [48]

Os sistemas de sombreamento exteriores podem permitir a ventilação do espaço de ar entre o vão envidraçado e o sistema de sombreamento, ajudando no arrefecimento dos compartimentos. Por outro lado, durante a estação de aquecimento, alguns dispositivos de oclusão (ex: estores e portadas) podem funcionar como isolantes térmicos diminuindo as perdas térmicas para o exterior. De facto, as frinchas

no contorno destes dispositivos de sombreamento podem ser tão pequenas que originam uma camada de ar imóvel entre este e o vão envidraçado. Esta camada de ar imóvel pode introduzir um acréscimo na resistência térmica global do vão envidraçado contribuindo para a redução da transmissão do calor por condução.

Segundo Kinney, os dispositivos de oclusão convencional proporcionavam privacidade, segurança e sombreamento, mas como não foram desenvolvidos para funcionarem como isolantes térmicos não ajudam a reduzir as perdas de calor pelos vãos envidraçados nas noites frias de inverno. [54]

Actualmente, alguns dispositivos de oclusão encerram os vãos reduzindo bastante a sua permeabilidade ao ar. A camada de ar aprisionada entre o dispositivo de oclusão e o envidraçado pode introduzir um acréscimo de resistência térmica, melhorando o desempenho térmico global do vão.

Kinney realizou diversas simulações, com o software “RESFEN”, aplicando um dispositivo de oclusão e sombreamento em diversos tipos de janelas para avaliar o seu contributo para o desempenho térmico global do vão envidraçado na estação de aquecimento. Kinney considerou envidraçados com 100Sq ft (9,29 m²) em todas as orientações e dispositivos de oclusão preenchidos com 2 polegadas (cerca de 5,1cm) de uretano com uma resistência térmica de 13,5hr.ft²°F/Btu (R = 2,38W/m².K). No quadro seguinte estão mencionadas as características principais das janelas utilizadas no simulador.

Quadro 2.4 – Características térmicas das janelas utilizadas na simulação (adaptado de [54])

Sistema Envidraçado	Sem Dispositivo de Oclusão			Com Dispositivo de Oclusão R-13.5		
	U Value (W/m ² .K)	U Factor (Btu/hr.ft ² °F)	SHGC	U Value (W/m ² .K)	U Factor (Btu/hr.ft ² °F)	SHGC
Single pane, aluminium frame	6,59	1,16	0,76	0,40	0,070	0,01
Double pane, thermally broken aluminium frame	3,58	0,63	0,62	0,37	0,066	0,01
Double pane, wood frame	2,67	0,47	0,62	0,36	0,064	0,01
Double pane, low E, vynil frame	2,10	0,37	0,38	0,35	0,062	0,01
Alpen TC88 heat mirror, multi-layer, krypton fill, fiberglass frame	1,02	0,18	0,42	0,30	0,053	0,01
Alpen SC75 heat mirror, multi-layer, krypton fill, fiberglass frame	0,91	0,16	0,19	0,29	0,051	0,01

O parâmetro SHGC (Solar Heat Gain Coefficient), utilizado nos Estados Unidos, representa a mesma grandeza física que o factor solar (g_{\perp}), utilizado nas normas europeias mas são determinados de formas distintas. Portanto, os seus valores não deverão ser usados indiscriminadamente.

O simulador calculou os ganhos e as perdas de energia horárias para as condições climáticas (sol e temperatura) típicas da cidade de Denver nos EUA. Nas simulações, assumiu-se que o dispositivo de

oclusão estava fechado durante a noite e aberto durante o dia. Os resultados foram determinados para a estação de aquecimento e estão expostos na figura seguinte, expressos em múltiplos de 100000 Btu (“therms”).



Figura 2.64 – Resultados da simulação para seis sistemas envidraçados com e sem dispositivo de oclusão [54]

Os valores positivos representam perdas de energia e os negativos representam ganhos. Kinney concluiu que a introdução de um dispositivo de oclusão tem um contributo mais significativo no desempenho energético de janelas ineficientes e menor nas janelas de elevada performance. Contudo, em todos os casos analisados, a introdução do dispositivo de oclusão trouxe ganhos energéticos. [54]

2.6. REGULAMENTOS E TABELAS TÉCNICAS NACIONAIS

2.6.1. TABELA DO ITE 50 – U DE VÃOS ENVIDRAÇADOS

O ITE50 apresenta 5 tabelas com os coeficientes de transmissão térmica dos vãos envidraçados mais representativos das soluções correntemente utilizadas em Portugal. O ITE 50 preconiza um coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite (U_{wdn}) que se aplica a vãos envidraçados de locais com ocupação diurna e nocturna importante. Neste caso dever-se-á considerar a contribuição de eventuais dispositivos de oclusão para a resistência térmica do vão envidraçado, admitindo que se encontram fechados no período nocturno. [11]

VÃOS ENVIDRAÇADOS - Tabelas (Caixilharia de Madeira)

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janelas	Esp. da lâmina de ar [mm]	$U_w^{(1)}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]	$U_{wdn}^{(2)}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]		
					Dispositivo de oclusão nocturna		
					Cortina interior opaca	Outros dispositivos	
Simples (1 janela)	1 (vidro simples)	Fixa, giratória ou de correr	-	5,1	4,3	3,9	3,4
	2 (vidro duplo)		6	3,3	2,9	2,8	2,5
			16	2,8	2,5	2,4	2,2
Duplo (2 janelas)	1 (vidro simples) em cada janela	50 a 100 mm (dist. entre janelas)	16 low e (3)	2,6	2,4	2,3	2,0
				2,5	2,3	2,2	2,0

Figura 2.65 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia de madeira [57]

O ITE 50 prevê também um valor U_{wdn} , consoante a permeabilidade do dispositivo de oclusão seja baixa ou elevada. “A permeabilidade ao ar do dispositivo é determinada pela largura e estanquidade ao ar das juntas construtivas e de montagem, existentes entre eventuais elementos móveis ou no contorno do edifício”. Um dispositivo de oclusão terá baixa permeabilidade, se criar um espaço de ar não ventilado ou muito fracamente ventilado entre o dispositivo e a janela (ex: portadas opacas, estores exteriores enroláveis, quando bem executados). [11]

VÃOS ENVIDRAÇADOS - Tabelas (Caixilharia Metálica sem corte térmico)

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	$U_w^{(1)}$ [W/(m ² .°C)]	$U_{wdn}^{(2)}$ [W/(m ² .°C)]		
					Dispositivo de oclusão nocturna		
					Cortina interior opaca	Outros dispositivos	
Com permeabilidade de ao ar elevada	Com permeabilidade ao ar baixa						
Simples (1 janela)	1 (vidro simples)	fixa	-	6,0	4,9	4,5	3,8
		giratória	-	6,2	5,0	4,6	3,9
		correr	-	6,5	5,2	4,8	4,1
	2 (vidro duplo)	fixa	6	3,9	3,4	3,2	2,8
			16	3,5	3,1	2,9	2,6
			16 low ε ⁽³⁾	3,1	2,8	2,6	2,3
		giratória	6	4,3	3,7	3,4	3,0
			16	3,8	3,3	3,1	2,7
			16 low ε ⁽³⁾	3,6	3,2	3,0	2,6
		correr	6	4,5	3,9	3,6	3,1
16 low ε ⁽³⁾	4,0		3,5	3,3	2,9		
Duplo ⁽⁴⁾ (2 janelas)	1 (vidro simples em cada janela)	fixa, giratória ou de correr	50 a 100 mm (dist. entre janelas)	3,1	2,8	2,6	2,3

Figura 2.66 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia de metálica [57]

VÃOS ENVIDRAÇADOS - Tabelas (Caixilharia Metálica com corte térmico)

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	$U_w^{(1)}$ [W/(m ² .°C)]	$U_{wdn}^{(2)}$ [W/(m ² .°C)]		
					Dispositivo de oclusão nocturna		
					Cortina interior opaca	Outros dispositivos	
Com permeabilidade de ao ar elevada	Com permeabilidade ao ar baixa						
Simples (1 janela)	1 (vidro simples)	fixa, Giratória ou de correr	-	5,4	4,5	4,1	3,6
			6	3,7	3,3	3,1	2,7
	2 (vidro duplo)	16 low ε ⁽³⁾	3,3	2,9	2,8	2,5	
			3,0	2,7	2,6	2,3	

⁽¹⁾ U_w , coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado, aplicável a locais sem ocupação nocturna (vd. texto 4.5).

⁽²⁾ U_{wdn} , coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite do vão envidraçado (inclui a contribuição dos eventuais dispositivos de oclusão nocturna), aplicável a locais com ocupação nocturna (vd. Texto 4.5). Se o vão envidraçado não dispõe de dispositivos de oclusão nocturna, $U_{wdn} = U_w$.

⁽³⁾ Para os vidros com baixa emissividade (low ε) considera-se uma emitância ε = 0,40. Para outros valores de ε vd. texto 4.5.

⁽⁴⁾ Nas janelas duplas admite-se que ambas as janelas têm o mesmo tipo de vidro simples e de caixilho. Para outras combinações de janelas vd. texto 4.5.

Figura 2.67 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia metálica com corte térmico [57]

Para as janelas duplas, as tabelas do ITE 50 só contemplam as situações em que ambas as janelas são do mesmo material e com vidro simples. Contudo, o ITE 50, permite calcular o U_w para as janelas duplas quando estas não são do mesmo tipo, através da expressão:

$$U_w = \frac{1}{\left(U_{w1} - R_{si} - R_{se} + R_{ar} + \frac{1}{U_{w2}} \right)} \quad (2.28)$$

Sendo, U_w o coeficiente de transmissão térmica da janela dupla ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), U_{w1} e U_{w2} os coeficientes de transmissão térmica de cada uma das janelas simples ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), R_{si} e R_{se} as resistências térmicas superficiais interior e exterior, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$) e R_{ar} a resistência térmica do espaço de ar criado entre as janelas, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

VÃOS ENVIDRAÇADOS - Tabelas (Caixilharia de Plástico)

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	$U_w^{(1)}$ [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]	$U_{wdn}^{(2)}$ [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]		
					Dispositivo de oclusão nocturna		
					Cortina interior opaca	Outros dispositivos	
Com permeabilidade ao ar elevada	Com permeabilidade ao ar baixa						
Simples (1 janela)	1 (vidro simples)	13 Fixa, giratória ou de correr	-	4,9	4,1	3,8	3,3
	2 (vidro duplo)		6	3,2	2,9	2,7	2,4
			16 16 low ϵ ⁽³⁾	2,7 2,5	2,5 2,3	2,3 2,2	2,1 2,0
Duplo ⁽⁴⁾ (2 janelas)	1 (vidro simples) em cada janela		50 a 100 mm (dist. entre janelas)	2,4	2,2	2,1	1,9

⁽¹⁾ U_w , coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado, aplicável a locais sem ocupação nocturna (vd. texto 4.5).

⁽²⁾ U_{wdn} , coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite do vão envidraçado (inclui a contribuição dos eventuais dispositivos de oclusão nocturna), aplicável a locais com ocupação nocturna (vd. Texto 4.5). Se o vão envidraçado não dispõe de dispositivos de oclusão nocturna, $U_{wdn} = U_w$.

⁽³⁾ Para os vidros com baixa emissividade (low ϵ) considera-se uma emitância $\epsilon = 0,40$. Para outros valores de ϵ vd. texto 4.5.

⁽⁴⁾ Nas janelas duplas admite-se que ambas as janelas têm o mesmo tipo de vidro simples e de caixilho. Para outras combinações de janelas vd. texto 4.5.

Figura 2.68 – Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados verticais com caixilharia de plástico [57]

No caso das janelas com vidro duplo, considera-se a situação mais corrente de duas folhas de vidro separadas por um perfil intercalar metálico, formando um espaço com ar desidratado. Caso o vidro duplo seja de baixa emissividade considera-se ainda que $\epsilon = 0,40$.

Para outros sistemas de vãos envidraçados que não estão preconizados nas tabelas das figuras anteriores (ex: vidros duplos com gás), o ITE 50 recomenda que se consulte as normas nacionais e europeias para calcular o coeficiente de transmissão térmica. Desde logo, ficam em evidência as limitações do ITE 50 para o cálculo do U_w dos vãos envidraçados.

2.6.2. RCCTE – REGULAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE CONFORTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS

A crise do petróleo de 1973 devido ao embargo do fornecimento de petróleo para os estados unidos e Europa, pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (Opep), colocou em evidência a volatilidade dos preços e a dependência mundial desta matéria-prima. Após o embargo a Opep limitou o fornecimento de petróleo e os preços subiram consideravelmente. Portugal sendo um país com uma elevada dependência energética torna-se vulnerável a situações de crise nos mercados petrolíferos. Foi nessa época, que surgiu a preocupação com o consumo de energia e que se começaram a adoptar medidas para a racionalização e a poupança de energia. Nessa altura, o consumo total de energia no sector dos edificios representava cerca de 20% enquanto nos transportes o consumo era de 30% e na indústria de 40% [58]. E foi precisamente no sector industrial nacional que o governo português começou a desenvolver políticas para a utilização de novas formas de energia e para a redução do seu consumo, através da atribuição de subsídios para incentivar à utilização de tecnologias menos consumidoras nos seus processos produtivos e dando apoio à produção de energia com base em recursos renováveis.

Só em 1990, através do D.L 40/90 de 6 de Fevereiro, é que foi reconhecido pelo governo a necessidade de criar um documento legislativo que regulamentasse as condições térmicas do sector residencial. Nasce assim o Regulamento das Características de Conforto Térmico de Edifícios (RCCTE), o primeiro suporte regulamentar para a melhoria da qualidade dos edifícios através da adopção de medidas e tecnologias construtivas que satisfaçam as condições de conforto higrotérmico, sem aumentar o consumo de energia, e que previnam o aparecimento de patologias de origem térmica.

Em 2006, surgiu a nova versão do RCCTE (D.L nº 80/2006 de 4 de Abril de 2006) com um novo pacote de medidas que visam a redução dos consumos energéticos com os equipamentos de controlo da ambiência interior, através de maiores exigências de qualidade térmica da envolvente dos edifícios. Deste modo, os utilizadores beneficiam de melhores condições de conforto a um custo mais baixo. Nesta nova versão do RCCTE as metodologias para o cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento foram modificadas e definidas novas condições ambientais de referência (temperatura e ventilação) e novos coeficientes de transmissão térmica de referência. [59] No quadro 2.5 estão os valores dos coeficientes de transmissão térmica de referência e a sua evolução para cada elemento da envolvente.

Quadro 2.5 – Evolução dos coeficientes de transmissão térmica de referência na zona I1

Elemento da Envolvente	RCCTE (D.L 40/90)	RCCTE (D.L 80/2006)
Zona opaca vertical	1,4	0,70
Zona opaca horizontal	1,1	0,50
Envidraçados	4,2	4,3

Observando o quadro constata-se que os valores de referência, nas zonas opacas reduziram cerca de 50%. Embora não sejam valores obrigatórios, a construção deverá evoluir no sentido de reduzir a transmissão térmica por estes elementos. Ainda no quadro 2.5 podemos verificar que o coeficiente de transmissão térmica de referência para os envidraçados e as zonas opacas são muito diferentes. Devido à grande diferença que existe entre estes coeficientes, as perdas de energia através dos envidraçados poderão ser substancialmente superiores às perdas de energia que ocorrem através da envolvente opaca.

Portanto, a redução do coeficiente de transmissão térmico dos vãos envidraçados pode ser um factor importante para a redução do consumo energético global de um edifício. É importante conhecer os vãos envidraçados e compreender e quantificar de que forma poderão contribuir para o desempenho térmico global do edifício.

2.7. SOFTWARES DE CÁLCULO AUTOMÁTICO UTILIZADOS ACTUALMENTE

Existem vários programas de cálculo que permitem determinar o coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados. Na generalidade dos programas, os elementos que compõem o vão envidraçado são determinados basicamente da mesma forma, à excepção das caixilharias. A caixilharia pode ser determinada segundo a norma ISO 15099 ou ISO 10077-2, através do métodos dos elementos finitos (ex: FEM) ou diferenças finitas. Estas normas servem de base à generalidade dos softwares para criar

os modelos de cálculo automático da condução, convecção e radiação nas cavidades. É possível determinar o fluxo de calor nas caixilharias recorrendo aos simuladores da dinâmica dos fluidos.

2.7.1. WIS

O WIS (Windows Information System) é uma ferramenta de cálculo automático gratuito que permite determinar as características térmicas, solares e ópticas de vãos envidraçados e seus componentes. Esta ferramenta possui uma extensa base de dados com as características de diversos componentes.

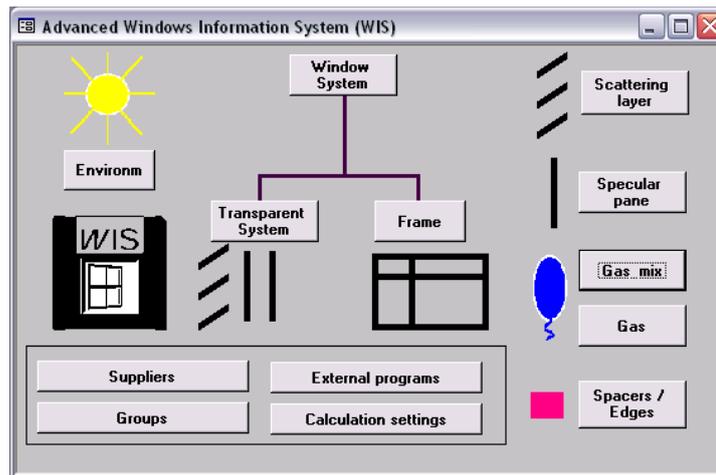


Figura 2.69 – Ecrã inicial do WIS

O WIS utiliza os mais recentes procedimentos preconizados nas normas europeias para determinar as propriedades térmicas dos vãos envidraçados. O programa está dividido em diversos módulos:

- Vão Envidraçado (Window System)
- Vidro (Transparent System)
- Dispositivos de Oclusão (Scatering Layer)
- Transmitâncias e reflectâncias (Specular pane)
- Perfil Intercalar (Spacer / Edges)
- Mistura de gases (Gas Mix)
- Gas
- Caixilharia (Frame)
- Ambiente (Enviroment)

Na figura seguinte estão representados dois dos módulos existentes no programa.

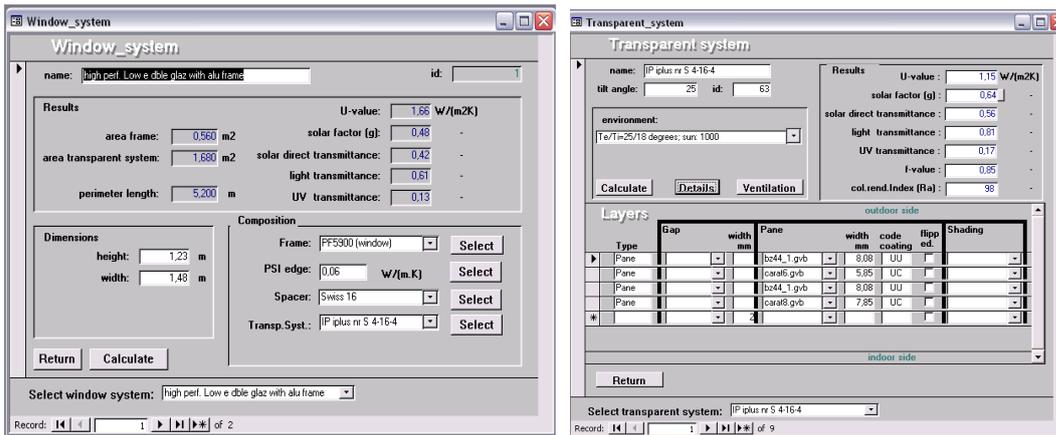


Figura 2.70 – Módulos (Vão Envidraçado e vidro)

Os resultados obtidos pelo WIS são apresentados num relatório escrito. Em alguns dos módulos é possível obter relatórios gráficos. O programa calcula os seguintes elementos:

- U do envidraçado, e da caixilharia
- Factor solar do vidro
- Transmitância e reflectância
- Velocidade do ar, fluxo e temperaturas
- Coeficientes de convecção e radiação
- Temperaturas superficiais
- Fluxo de calor

2.7.2. THERM 6 E O WINDOW 6

O WINDOW 6 e o THERM 6 são softwares de cálculo automático que permitem determinar as propriedades térmicas e ópticas solares de vidros e janelas. O programa foi desenvolvido pelo Lawrence Berkley National Laboratory (LBNL) para engenheiros, arquitectos e estudantes. Window 6 permite definir e calcular as propriedades térmicas e ópticas dos envidraçados e dispositivos de oclusão. O therm permite simular a transferência de calor bidimensional em sistemas envidraçados. O THERM 6 baseia-se no método dos elementos finitos para determinar a condução de calor através de geometrias complexas. Após calculadas as propriedades dos envidraçados com o Window 6, estas podem ser integradas no Therm 6 para determinar o desempenho de todo o vão envidraçado.

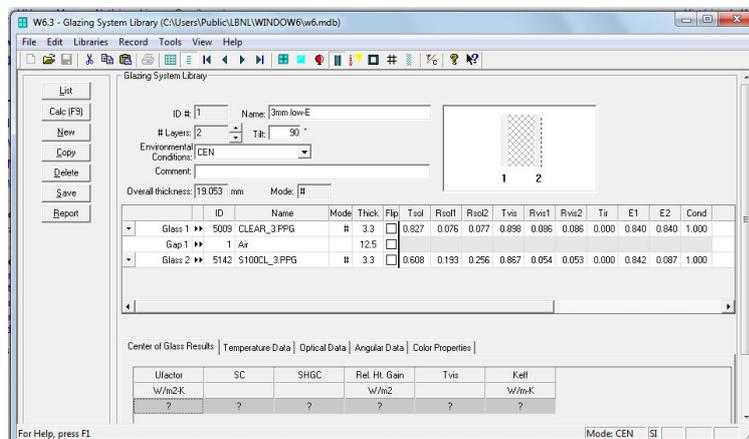


Figura 2.71 – Interface para a definição das características do envidraçado (Window 6)

Estes programas são habitualmente utilizados pelos fabricantes americanos de janelas para avaliar o desempenho térmico dos seus produtos. Estes programas foram escolhidos pelo NFRC (National Fenestration Rating Council) - organismo americano responsável pela classificação do desempenho das janelas produzidas nos estados unidos – para o desenvolvimento da classificação energética das janelas.

Nas figuras seguintes, está representado o resultado de uma simulação efectuada a uma janela com determinadas condições de fronteira especificadas pelo utilizador. Na figura 2.72 estão representadas as isotérmicas que se formam no interior da janela.

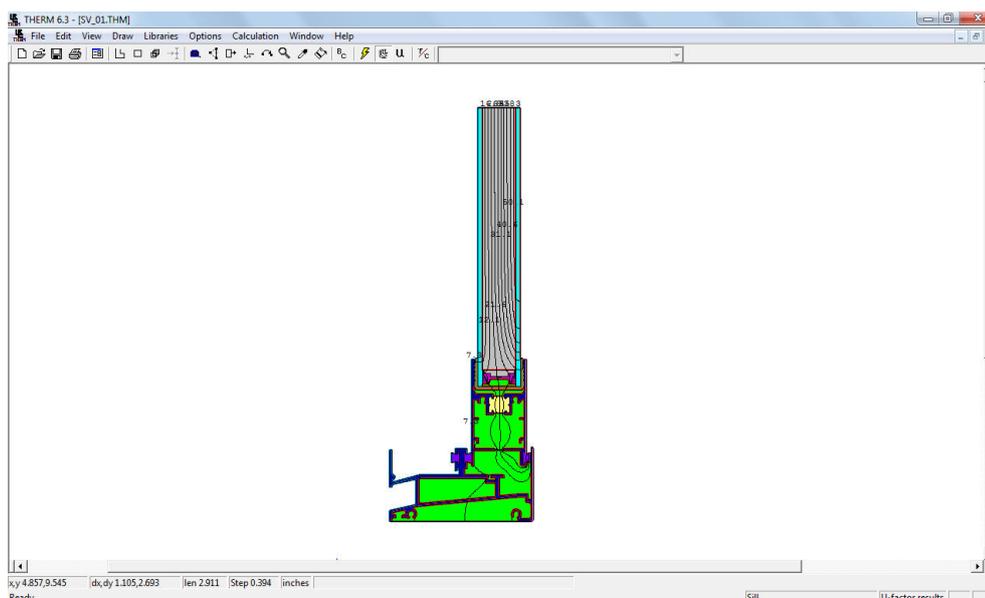


Figura 2.72 – Simulação de um sistema envidraçado – isolinhas de temperaturas (Therm 6)

Na figura 2.73 está representada a mesma janela do exemplo anterior, mas em vez das isotérmicas, as temperaturas que se verificam no interior da janela estão representadas por cores.

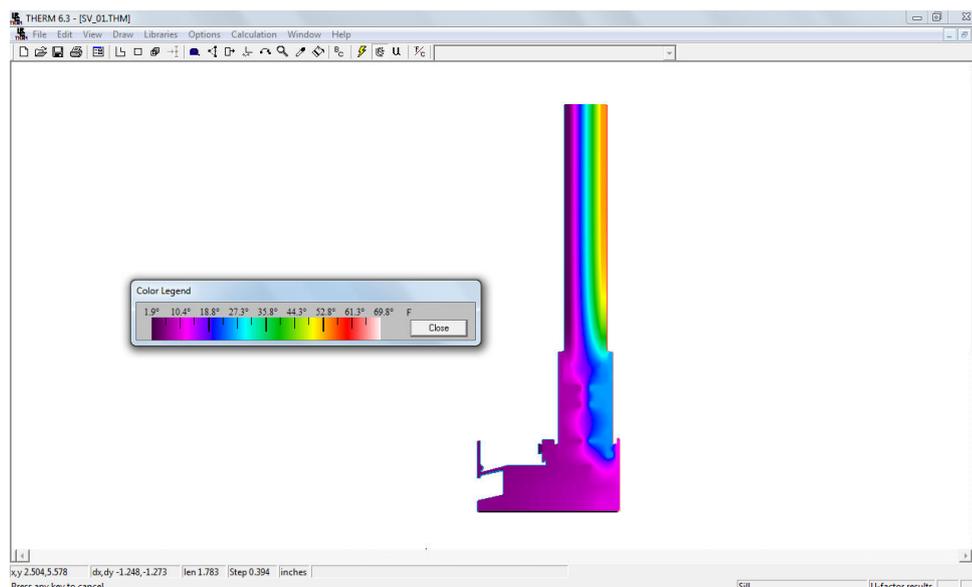


Figura 2.73 – Interface para a simulação dos sistemas envidraçados (Therm 6)

3

CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA SEGUNDO A NORMA EN10077

3.1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, tem-se verificado uma enorme evolução na indústria da construção, quer ao nível das técnicas construtivas, quer dos materiais empregues. Os edifícios afastam-se da sua concepção tradicional e o acto de projectar e construir há muito que não se baseia em conhecimentos meramente empíricos.

Os paradigmas das sociedades actuais e a crescente consciência de que o progresso, o conforto e o bem-estar não se podem dissociar do critério de desenvolvimento ambientalmente sustentável, determinou o aparecimento de novos produtos, e com eles o acto de projectar e construir tornou-se mais técnico e especializado. Foi neste contexto que se desenvolveram as ferramentas e a regulamentação normativa com a finalidade de dotar o projectista de técnicas e metodologias para avaliar o desempenho térmico dos edifícios e dos seus elementos constituintes.

Desde meados dos anos 80 que a Organização Internacional de Normalização (ISO), em parceria com o Comité Europeu de Normalização (CEN), têm vindo a desenvolver metodologias para determinar a transmissão térmica através dos vãos envidraçados. Entre as normas desenvolvidas pelo CEN/ISO, será descrito o método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica de janelas, portas e dispositivos de oclusão, preconizado na norma europeia EN 10077.

3.2. MÉTODOS DE CÁLCULO

A norma EN10077 divide-se em duas partes. Na primeira parte, é descrito o **método geral** de cálculo do coeficiente de transmissão térmica de janelas, portas e dispositivos de oclusão e são apresentados valores tabelados para configurações específicas de vãos envidraçados.

Na segunda, a norma determina que o cálculo é realizado através de um **método numérico bidimensional**, sendo geralmente o método dos elementos finitos ou o das diferenças finitas. Define os dados de entrada para o cálculo da transmissão térmica através das caixilharias e através da ligação entre a caixilharia e o vidro ou painel (transmissão térmica linear). Além disso, estabelece os critérios para a validação dos métodos numéricos utilizados no cálculo da transmissão térmica. Para a aplicação deste método é necessário o recurso a ferramentas informáticas que sejam capazes de realizar uma análise térmica bidimensional.

O uso conjunto das duas partes da norma permite a caracterização da transmissão térmica de diversos tipos de vãos envidraçados.

Ao longo deste capítulo será descrito o método de cálculo preconizado na primeira parte da norma – **método geral** – que será o método desenvolvido ao longo deste trabalho.

3.3. CAMPO DE APLICAÇÃO

A norma é aplicável a:

- Diferentes tipos de superfícies translúcidas (vidro ou plástico; simples ou múltiplo; com ou sem películas de baixa emissividade; com os espaços entre as superfícies translúcidas preenchidos por ar ou outros gases);
- Vários tipos de caixilharias;
- Ao cálculo da resistência térmica adicional induzido por diferentes tipos de dispositivos de oclusão, consoante a sua permeabilidade ao ar.

A norma não se aplica a fachadas-cortina e outros envidraçados que não estejam contidos numa caixilharia.

No caso de clarabóias, a transmissão térmica poderá ser determinada através desta norma, desde que a transmissão térmica da caixilharia seja determinada em laboratório (método de “Hot-Box”) ou por cálculo numérico (método dos elementos finitos ou das diferenças finitas).

Os principais fluxos de calor que ocorrem através das janelas devem-se a:

- Perdas e ganhos de calor por condução, convecção e radiação;
- Ganhos solares sobre a forma de radiação;
- Ventilação natural

O método de cálculo preconizado na norma apenas inclui as perdas por condução, convecção e radiação.

3.4. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO ENVIDRAÇADO

3.4.1. ÁREA DO VIDRO/PAINEL

A área do vidro (A_g) ou do painel (A_p) é a menor das áreas visíveis pelo interior e exterior da janela ou porta.

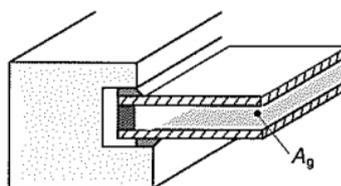


Figura 3.1 – Área do vidro/painel [7]

3.4.2. PERÍMETRO DO VIDRO/PAINEL

O perímetro total do vidro (l_g) ou do Painel (l_p) é a maior das somas dos perímetros visíveis em ambas as faces da janela ou porta.

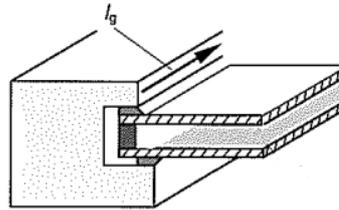


Figura 3.2 – Perímetro do vidro/painel [7]

3.4.3. ÁREA DA CAIXILHARIA

A área da caixilharia é dada por,

$$A_f = \max(A_{f,i}; A_{f,e}) \quad (3.1)$$

Sendo $A_{f,i}$ a área interior da caixilharia e $A_{f,e}$ a área exterior da caixilharia, em projecção. A área da caixilharia inclui a área do aro e da folha.

A norma define ainda duas outras áreas - $A_{d,i}$ e $A_{d,e}$ ($A_{d,i}$ - área de desenvolvimento interno da caixilharia; $A_{d,e}$ - área de desenvolvimento externo da caixilharia) - referentes à caixilharia.

Posteriormente, constatar-se-á em 3.6.3, que estas áreas são necessárias para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica de caixilharias metálicas.

Na figura 3.3, estão representadas as diversas áreas.

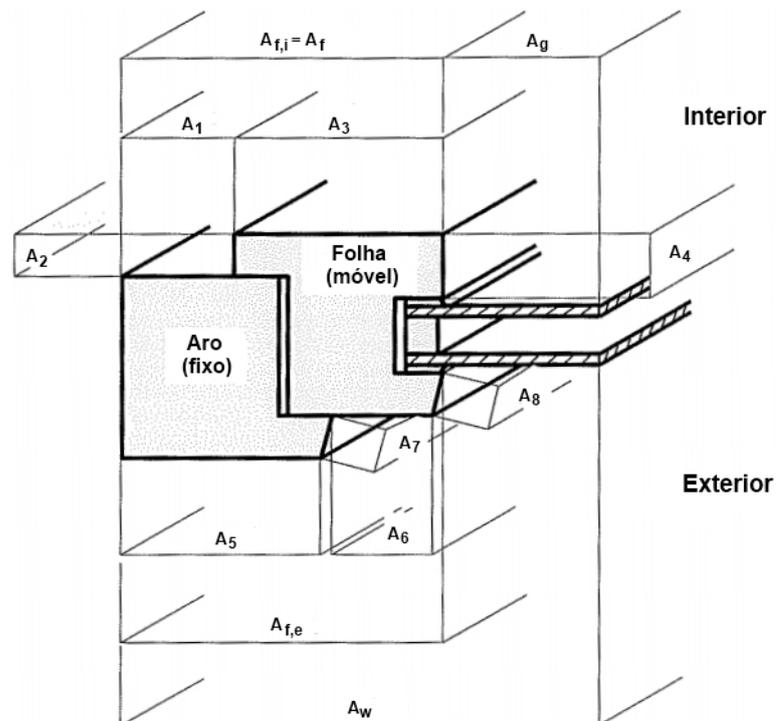


Figura 3.3 – Representação das várias áreas [7]

$$A_{d,i} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (3.2)$$

$$A_{d,e} = A_5 + A_6 + A_7 + A_8 \quad (3.3)$$

3.4.4. ÁREA DA JANELA

A área total da janela é a soma da área do vidro ou do painel com a área da caixilharia.

$$A_w = A_f + A_g \quad (3.4)$$

3.5. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA DO VIDRO

Um sistema envidraçado pode ser constituído por um vidro simples ou múltiplo, sendo geralmente neste último caso, vidro duplo ou triplo. Para determinar a transmissão térmica destes dois tipos de vidro, a norma apresenta as seguintes expressões:

Para o vidro simples e laminado,

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{si}} \quad (3.5)$$

Sendo R_{se} e R_{si} a condutância térmica superficial exterior e interior, d_j a espessura do vidro j e λ_j a condutibilidade do vidro j .

Para o vidro múltiplo,

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_j R_{s,j} + R_{si}} \quad (3.6)$$

Sendo $R_{s,j}$ a resistência térmica do espaço de ar j .

Para o caso dos vidros múltiplos o coeficiente de transmissão térmica pode ser determinado recorrendo à norma EN 673 ([3] e [4]). No ponto 3.5.2 será detalhado o procedimento de cálculo preconizado pela mesma.

3.5.1. RESISTÊNCIA TÉRMICA DE ESPAÇOS DE AR NÃO VENTILADOS

O vidro simples, por si só, não oferece muita resistência ao fluxo de calor. De facto, para além de outros factores envolvidos e não contabilizados, observando meramente o denominador da expressão (3.5) se depreende que, a resistência térmica do vidro simples depende maioritariamente da fina película de ar à superfície do vidro, quer no interior (R_{si}), quer no exterior (R_{se}).

Ao confinar uma camada de ar seco, com uma condutibilidade térmica de 0,025 W/m.K entre duas folhas de vidro, como é corrente aplicar em vidros duplos, consegue-se reduzir consideravelmente o coeficiente de transmissão térmica do vidro.

No quadro 3.1 estão representados alguns valores para a resistência térmica de espaços de ar para vidros duplos e para janelas duplas, ou janelas de dupla folha no mesmo aro.

Os valores apresentados no quadro seguinte foram determinados segundo a norma EN 673:2000 [3] e aplicam-se a:

- janelas verticais;
- espaço entre folhas de vidro preenchidos por ar;
- janelas com ou sem película low-E;
- para uma temperatura média do vidro de 283K e uma diferença de temperatura entre a superfície exterior e interior de 15K.

Quadro 3.1 – Resistência térmica R_s de espaços de ar não ventilados, em $m^2.K/W$ (adaptado de [7])

Espessura do espaço de ar (mm)	Película de baixa emissividade numa face				Sem películas de baixa emissividade
	$\epsilon = 0,1$	$\epsilon = 0,2$	$\epsilon = 0,4$	$\epsilon = 0,8$	
6	0,211	0,190	0,163	0,132	0,127
9	0,298	0,259	0,211	0,162	0,154
12	0,376	0,316	0,247	0,182	0,173
15	0,446	0,363	0,276	0,197	0,186
50	0,406	0,335	0,260	0,189	0,179
100	0,376	0,315	0,247	0,182	0,173
300	0,333	0,284	0,228	0,171	0,163

Para espaços de ar com uma espessura superior a 300mm, o cálculo recomendado pela norma EN673 não é aplicável.

3.5.2. EN 673 – VIDRO NA CONSTRUÇÃO. MÉTODO DE CÁLCULO DO U

3.5.2.1. Campo de Aplicação

O procedimento descrito na norma EN 673 aplica-se a:

- Vidros revestidos e não revestidos e materiais que não são transparentes para a radiação infravermelha distante;
- Envidraçados múltiplos contendo os vidros e os materiais mencionados no ponto anterior.

3.5.2.2. Fórmula Base do U

Para efeitos de aplicação desta norma o coeficiente de transmissão térmica é definido como,

“Parâmetro de um envidraçado que caracteriza a transmissão de calor através da sua parte central, isto é, sem efeitos de bordo, e especifica a densidade da relação da transmissão de calor em regime estacionário por diferença de temperatura entre as temperaturas ambientes de cada um dos lados desse envidraçado. O coeficiente U exprime-se em watt por metro quadrado Kelvin $[W/(m^2.K)]$ ” (transcrito de [3]).

Os efeitos de bordo mencionados no parágrafo anterior referem-se à ponte térmica devido ao perfil intercalar entre as folhas de vidro e através do caixilho da janela.

O U do vidro é determinado pela expressão seguinte:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} \quad (3.7)$$

Sendo h_e e h_i os coeficientes superficiais exterior e interior de transmissão de calor e h_t a condutância térmica total do envidraçado.

3.5.2.3. Condutância térmica total do envidraçado

A condutância térmica total do envidraçado é função da condutância de cada camada de gás e da resistência térmica de cada material.

$$\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j . r_j \quad (3.8)$$

Sendo N o número de espaços de ar não ventilados, M o número de camadas de materiais, r_j a resistividade térmica de cada material, h_s a condutância térmica de cada camada de gás e d_j a espessura do vidro.

A resistividade térmica é uma medida da oposição que a matéria oferece ao fluxo de calor, sendo também o inverso da condutibilidade térmica. A condutibilidade térmica é uma propriedade de um material e representa a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente uma superfície de espessura unitária, em regime estacionário (ou permanente), quando existe uma diferença de temperatura de uma unidade entre ambas as superfícies desse material. Para o vidro comum (vidro sodacálcico), $\lambda = 1,0 \text{ m.K/W}$

$$r_j = \frac{1}{\lambda_j} \quad (3.9)$$

3.5.2.4. Condutância térmica da camada de gás

A condutância térmica de cada camada de gás (h_s) é determinada pela soma da condutância por radiação (h_r) e a condutância do gás (h_g)

$$h_s = h_r + h_g \quad (3.10)$$

O inverso de h_s é a resistência térmica da camada de gás (também denominado de resistência térmica de espaços de ar não ventilados, quando o gás é o ar)

A condutância por radiação é dada por,

$$h_r = 4 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \cdot T_m^3 \quad (3.11)$$

T_m representa a temperatura média absoluta de cada camada de gás e ε_1 e ε_2 as emissividades corrigidas à temperatura (T_m) das faces dos elementos que confinam a camada de gás. σ é a constante de stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$). [9]

A condutância do gás é determinada pela expressão seguinte,

$$h_g = Nu \cdot \frac{\lambda}{s} \quad (3.12)$$

onde s é a largura da camada de gás e Nu o número de Nusselt.

$$Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (3.13)$$

Se o número de Nusselt, determinado pela expressão anterior for superior a 1, significa que existe convecção na camada de gás, logo, o fluxo total de calor é maior. Caso contrário, (número de Nusselt inferior a 1), não existe convecção e o fluxo de calor estabelece-se unicamente por condução. Neste caso, para efeitos de aplicação da norma, Nu simplifica-se e toma o valor unitário. [9]

Na expressão anterior Gr representa o número de Grashof e Pr o número de Prandtl que são obtidos através das expressões seguintes:

$$Gr = \frac{9,81 \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \quad (3.14)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \quad (3.15)$$

Sendo ρ a densidade do gás, μ a viscosidade dinâmica, c a capacidade calorífica específica e ΔT a diferença de temperaturas entre as superfícies dos vidros que delimitam a camada de gás.

Na expressão (3.13) A e n são parâmetros que dependem do sentido do fluxo térmico e, por conseguinte, da orientação do envidraçado. No caso de envidraçados verticais, A e n tomam os seguintes valores:

$$A = 0,035$$

$$n = 0,38$$

No caso de envidraçados horizontais e inclinados, A e n adoptam os valores seguintes:

Envidraçado Horizontal:

$$A = 0,16$$

$$n = 0,28$$

Envidraçado a 45°:

$$A = 0,10$$

$$n = 0,31$$

Para outras inclinações, A e n podem ser estimados recorrendo a uma interpolação linear. [9]

3.5.2.5. Emissividade Normal e Corrigida

A emissividade normal das superfícies que confinam com os gases tem de ser corrigida através de relações tabeladas [9]. A emissividade normal do vidro comum (vidro sodacálcico), com as superfícies não revestidas ou com um revestimento que não afecte a sua emissividade, é de 0,89 e a emissividade corrigida vem:

$$\varepsilon = 0,89 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} \quad (3.16)$$

Quadro 3.2 – Relações para o cálculo da emissividade corrigida a partir da emissividade normal (adaptado de [9])

Emissividade Normal ε_n	Relação $\varepsilon/\varepsilon_n$
0,03	1,22
0,05	1,18
0,1	1,14
0,2	1,10
0,3	1,06
0,4	1,03
0,5	1,00
0,6	0,98
0,7	0,96
0,8	0,95
0,9	0,94

Pelo quadro 3.2, verificamos que a relação que corrige a emissividade normal do vidro sodacálcico, sem películas de baixa emissividade é 0,94, logo, a emissividade corrigida vem:

$$\varepsilon = 0,89 \times 0,94 = 0,837 \quad (3.17)$$

Segundo a norma, outras relações podem ser determinadas por interpolação linear ou extrapolação, para emissividades normais intermédias.

A norma faz ainda referência a um procedimento para determinar a emissividade normal de uma superfície revestida, para uma temperatura média de 283 K, consistindo na medição da sua curva de reflectância espectral com um espectrofotómetro para 30 comprimentos de onda normalizados.

Através da curva das reflectâncias espectrais $R_n(\lambda)$ determina-se a reflectância normal (R_n), tomando a média aritmética das reflectâncias espectrais medidas para os 30 comprimentos de onda de referência. [9]

$$R_n = \frac{1}{30} \cdot \sum_{i=1}^{30} R_n(\lambda_i) \quad (3.18)$$

A emissividade normal ε_n a $T_m = 283$ K é dada por,

$$\varepsilon_n = 1 - R_n \quad (3.19)$$

3.5.2.6. Propriedades do gás

Para determinar o número de Grashof e de Prandtl é necessário conhecer algumas das propriedades do gás presente na camada de ar. As propriedades necessárias são as seguintes:

- Condutibilidade térmica;
- Densidade;
- Viscosidade dinâmica;
- Capacidade calorífica específica.

No quadro seguinte estão mencionados os valores das propriedades de alguns gases.

Quadro 3.3 – Propriedade de gases utilizados em envidraçados selados (adaptado de [9])

Gás	Temperatura v (°C)	Densidade ρ (kg/m ³)	Viscosidade dinâmica μ (kg/m.s)	Condutibilidade λ (W/m.K)	Capacidade calorífica específica c (J/kg.K)
Ar	-10	1,326	$1,661 \times 10^{-5}$	$2,336 \times 10^{-2}$	$1,008 \times 10^3$
	0	1,277	$1,711 \times 10^{-5}$	$2,416 \times 10^{-2}$	
	10	1,232	$1,761 \times 10^{-5}$	$2,496 \times 10^{-2}$	
	20	1,189	$1,811 \times 10^{-5}$	$2,576 \times 10^{-2}$	
Argon	-10	1,829	$2,038 \times 10^{-5}$	$1,584 \times 10^{-2}$	$0,519 \times 10^3$

	0	1,762	$2,101 \times 10^{-5}$	$1,634 \times 10^{-2}$	
	10	1,699	$2,164 \times 10^{-5}$	$1,648 \times 10^{-2}$	
	20	1,640	$2,228 \times 10^{-5}$	$1,734 \times 10^{-2}$	
SF6	-10	6,844	$1,383 \times 10^{-5}$	$1,119 \times 10^{-2}$	$0,614 \times 10^3$
	0	6,602	$1,421 \times 10^{-5}$	$1,197 \times 10^{-2}$	
	10	6,360	$1,459 \times 10^{-5}$	$1,275 \times 10^{-2}$	
	20	6,118	$1,497 \times 10^{-5}$	$1,354 \times 10^{-2}$	
Krypton	-10	3,832	$2,260 \times 10^{-5}$	$0,842 \times 10^{-2}$	$0,245 \times 10^3$
	0	3,690	$2,330 \times 10^{-5}$	$0,870 \times 10^{-2}$	
	10	3,560	$2,400 \times 10^{-5}$	$0,900 \times 10^{-2}$	
	20	3,430	$2,470 \times 10^{-5}$	$0,926 \times 10^{-2}$	
Xenon	-10	6,121	$2,078 \times 10^{-5}$	$0,494 \times 10^{-2}$	$0,161 \times 10^3$
	0	5,897	$2,152 \times 10^{-5}$	$0,512 \times 10^{-2}$	
	10	5,689	$2,226 \times 10^{-5}$	$0,529 \times 10^{-2}$	
	20	5,495	$2,299 \times 10^{-5}$	$0,546 \times 10^{-2}$	

Para todas as misturas de gases utilizados na prática, as propriedades podem ser estimadas, com aproximação suficiente, com base nas fracções em volume de cada gás na mistura. [9]

Gás 1: F_1 ; Gás 2: F_2 ; etc...

$$P = P_1.F_1 + P_2.F_2 \quad (3.20)$$

F_1 e F_2 representam as fracções em volume de cada gás na mistura; P_1 , P_2 , a propriedade relevante do gás 1 e 2; e P representa o valor da propriedade na mistura.

3.5.2.7. Condutância Térmica Superficial Interior e Exterior

A condutância térmica superficial interior e exterior (h_e) é função da velocidade do vento junto do envidraçado, da emissividade e de outros factores climáticos. Para que seja possível a comparação do U dos envidraçados, o valor de h_e está normalizado em $23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, para superfícies envidraçadas verticais, com uma emissividade de 0,837. [9]

Para determinar o h_e de superfícies não verticais, a norma faz referência à *ISO/DIS 6946-1*, “*Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method*”(1995)

O inverso de h_e denomina-se resistência térmica superficial exterior (R_{se}),

$$R_{se} = \frac{1}{h_e} \quad (3.21)$$

O valor normalizado de R_{se} é,

$$R_{se} = \frac{1}{23} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot K / W \quad (3.22)$$

A condutância térmica superficial interior (h_i), é dada por,

$$h_i = h_r + h_c \quad (3.23)$$

h_r representa a condutância por radiação e h_c a condutância por convecção.

Para o vidro comum (sodacálcico), sem revestimento, a condutância por radiação é de $4,4 \text{ W/m}^2 \cdot K$

Se o vidro possuir uma película de baixa emissividade na superfície interna, a condutância por radiação é obtida, fazendo uma proporção simples entre a condutância por radiação do vidro sodacálcico sem revestimento ($\varepsilon = 0,837$) e emissividade corrigida da superfície revestida. [9]

$$h_r = \frac{4,4 \cdot \varepsilon}{0,837} \quad (3.24)$$

Conforme demonstrado na expressão (3.17), $\varepsilon = 0,837$ é a emissividade corrigida dos vidros sodacálcicos.

A expressão anterior apenas se aplica se não existirem condensações na superfície revestida.

A condutância por convecção (h_c) é um valor constante de $3,6 \text{ W/m}^2 \cdot K$, no caso de convecção livre. Se existir uma corrente de ar sobre o envidraçado, o valor da condutância por condução virá superior. [9]

A norma também define um valor normalizado, para efeitos de comparação de coeficientes U de envidraçados.

$$h_i = 4,4 + 3,6 = 8,0 \text{ W / m}^2 \cdot K \quad (3.25)$$

O inverso de h_i é a resistência térmica superficial interior (R_{si}),

$$R_{si} = \frac{1}{h_i} \quad (3.26)$$

O valor normalizado de R_{si} é,

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot K / W \quad (3.27)$$

3.5.2.8. Método Iterativo – Cálculo do U de envidraçados com mais de uma camada de gás

Para envidraçados com mais de uma camada de gás, terá de se calcular o U através de um método iterativo, admitindo uma T_m de 283 K.

Procedimento:

O método inicia-se admitindo uma diferença de temperatura $\Delta T = 15$ K para cada camada de gás. De seguida, determinam-se as h_s de cada camada. Se os valores de h_s forem iguais, o método iterativo é desnecessário e as diferenças de temperatura são dadas por $\Delta T = 15$ K. Caso contrário, os novos valores de ΔT_s de cada camada podem ser calculados pela equação: [9]

$$\Delta T_s = 15 \cdot \frac{\frac{1}{h_s}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_s}} \quad (3.28)$$

Os novos valores ΔT_s são utilizados na iteração seguinte. Determinam-se os novos h_s e os respectivos ΔT_s de cada camada e assim sucessivamente. O método iterativo termina quando a resistência do envidraçado $\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_s} \right)$ convergir no terceiro algarismo significativo.

A resistência determinada é substituída nas equações (3.8) e (3.7) para calcular o coeficiente U.

3.5.2.9. U de projecto vs U declarado

A norma distingue um valor para o coeficiente de transmissão térmica do vidro de projecto e um valor para fins promocionais (U declarado). O valor de U declarado é obtido para determinadas condições fronteiras normalizadas, enumeradas a seguir: [9]

r – resistividade térmica do vidro sodacálcico ($r = 1,0$ m.K/W)

ε – emissividade corrigida de superfícies não revestidas de vidro sodacálcico e borosilicatado ($\varepsilon = 0,837$)

ΔT – diferença de temperatura entre superfícies de vidro fronteiras ($\Delta T = 15$ K)

T_m – temperatura média da camada de gás ($T_m = 283$ K)

σ – constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/m².K⁴)

h_e – Condutância térmica superficial exterior ($h_e = 23$ W/m².K)

h_i – Condutância térmica superficial interior ($h_i = 8$ W/m².K)

A – constante ($A = 0,035$)

N – expoente ($n = 0,38$)

As condições fronteiras normalizadas, para as propriedades dos gases, são dadas no quadro 3.3, para uma temperatura $T_m = 283$ K (10 °C)

Em projecto de edifícios, consoante a posição do envidraçado e as condições ambientais, a utilização do valor U declarado pode levar a resultados pouco exactos. Nesse caso, deverá determinar-se o U de projecto usando valores de fronteira correctos para h_s , h_e e h_i , os quais devem ser declarados.

O coeficiente de transmissão térmica (U) vem em $W/m^2.K$ e arredondado a uma casa decimal.

3.6. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA DA CAIXILHARIA

Embora as caixilharias representem cerca de 20% a 30% da área total do vão envidraçado, o contributo da caixilharia para as trocas de calor é bastante significativo. É tanto mais expressiva quanto menor for o coeficiente de transmissão do vidro (ex: vidros baixo emissivos).

Os coeficientes de transmissão térmica da caixilharia (U_f) determinados através de métodos numéricos que cumpram os requisitos da norma EN10077-2, poderão ser utilizados como dados de entrada para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica de janelas, portas e clarabóias, assim como poderão ser também utilizados os valores de U_f medidos através do método de Hot-Box.

Caso não exista informação disponível, pode estimar-se o U_f das janelas através das tabelas e gráficos existentes na norma. Neste caso, os valores da norma referentes à caixilharia, só se aplicam a janelas na posição vertical. [7]

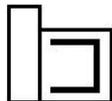
Os valores das tabelas e gráficos baseiam-se num grande número de medições assim como em valores avaliados através de métodos numéricos.

Os valores dos coeficientes de transmissão térmica das caixilharias que não estão descritas na norma deverão ser determinados por medição ou avaliados através de métodos numéricos. [7]

3.6.1. CAIXILHARIA DE PLÁSTICO

No quadro seguinte estão representadas as caixilharias em plástico consideradas na norma e os respectivos coeficientes de transmissão térmica.

Quadro 3.4 – Transmissão térmica para caixilharias de plástico com reforços metálicos (adaptado de [7])

Material da caixilharia	Tipo de caixilharia	U_f $W/(m^2.K)$
Poliuretano	Com núcleo de metal	2,8
	Com duas câmaras ocas	
		2,2
PVC – Perfil ôco	Com 3 câmaras ocas	
		2,0

Os valores no quadro só são aplicáveis se a distância entre as paredes de cada câmara oca for superior ou igual a 5mm (Fig.3.4). Para outras caixilharias de plástico, o U_f deve ser medido ou calculado.

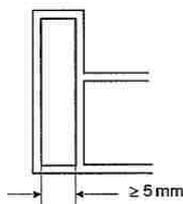


Figura 3.4 – Espaço mínimo entre paredes das câmaras ocas [7]

3.6.2. CAIXILHARIA DE MADEIRA

A transmissão térmica da caixilharia de madeira é dada em função da densidade da madeira e da espessura da caixilharia em perfil.

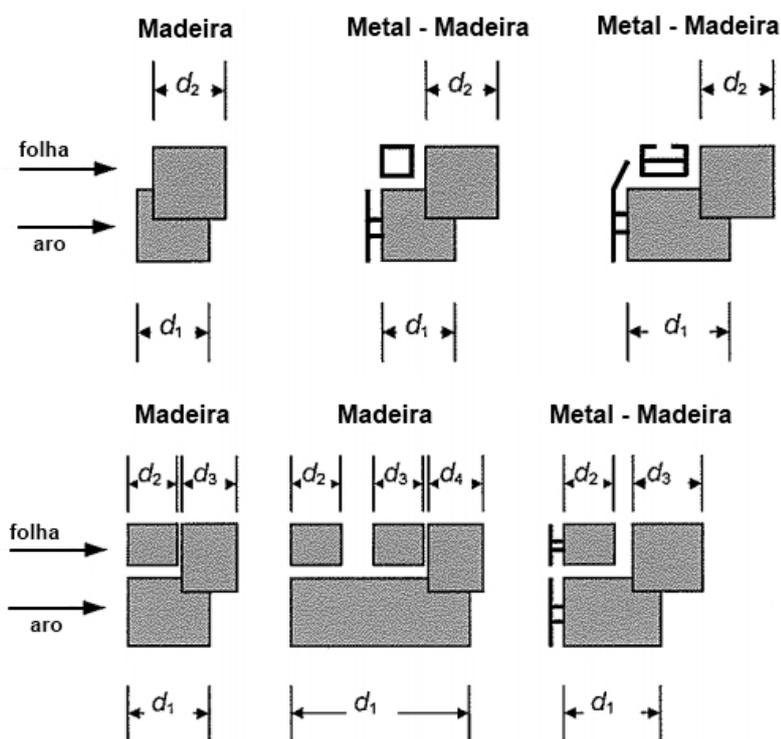


Figura 3.5 – Espessuras da caixilharia para vários sistemas envidraçados [7]

A espessura da caixilharia dos 3 perfis no topo da fig.3.5 é dada por,

$$d_f = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.29)$$

A espessura da caixilharia dos perfis representados no fundo da fig.3.5 é dada por,

$$d_f = \frac{\sum d_{j,sa} + \sum d_{j,f}}{2} \quad (3.30)$$

Sendo $d_{j,sa}$ a espessura da folha j e $d_{j,f}$ a espessura do aro j

Após determinar a dimensão da caixilharia, o valor de U_f lê-se directamente no gráfico (Fig.3.6), na curva cuja densidade e condutibilidade térmica corresponde à da madeira da caixilharia em estudo.

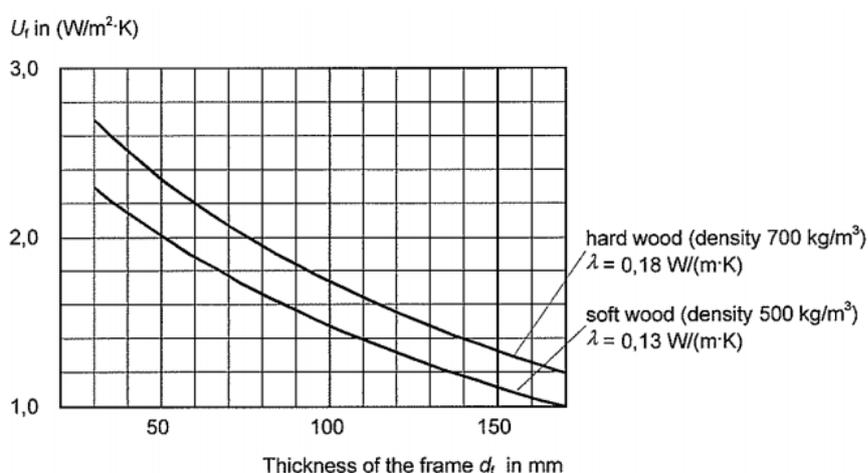


Figura 3.6 – U_f das caixilharias de madeira e metal-madeira em função da espessura da caixilharia [7]

3.6.3. CAIXILHARIA DE METAL

Os metais são condutores de calor e portanto, favorecem as trocas térmicas. Para ultrapassar este efeito indesejável, foram desenvolvidas caixilharias com corte térmico. Este tipo de caixilharia é constituído por dois perfis separados por elementos de corte térmico (ex: poliamida). Esses elementos separam por completo o perfil em contacto com a zona fria do perfil em contacto com a zona quente. Desta forma consegue-se reduzir consideravelmente o fluxo térmico através da caixilharia.

A complexidade da geometria, o material e as cavidades contidas nos perfis influenciam consideravelmente a transmissão térmica da caixilharia e tornam o seu valor difícil de estimar.

Se não for possível determinar o coeficiente de transmissão térmica da caixilharia através de métodos numéricos ou por medição segundo o método de hot-box, então U_f pode ser determinado pelo método descrito a seguir.

Este método é aplicável a caixilharias metálicas sem corte térmico e com corte térmico. Estas últimas, representadas nas fig.3.8 e 3.9, estão sujeitas às restrições definidas para a condutibilidade térmica e à espessura dos elementos de corte térmico. [7]

A transmissão térmica da caixilharia metálica é obtida pela expressão seguinte:

$$U_f = \frac{1}{R_{si} \cdot \frac{A_{f,i}}{A_{d,i}} + R_f + R_{se} \cdot \frac{A_{f,e}}{A_{d,e}}} \quad (3.31)$$

O método só se aplica a envidraçados verticais, logo, $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ e $R_{sei} = 0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. $A_{f,i}$, $A_{f,e}$, $A_{d,i}$, $A_{d,e}$ são as áreas da caixilharia, conforme descrito no ponto 3.4.3.

R_f é a resistência da caixilharia e é dado por,

$$R_f = \frac{1}{U_{f0}} - 0,17 \quad (3.32)$$

U_{f0} é a transmissão térmica em $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, calculado como se as áreas de desenvolvimento fossem iguais às áreas projectadas.

$$U_{f0} = \frac{1}{0,13 + R_f + 0,04} \quad (3.33)$$

O valor de U_{f0} depende da menor distância entre os perfis opostos de alumínio (d), na secção do material de corte térmico. U_{f0} retira-se da linha a cheio, do gráfico representado na fig.3.7. [7]

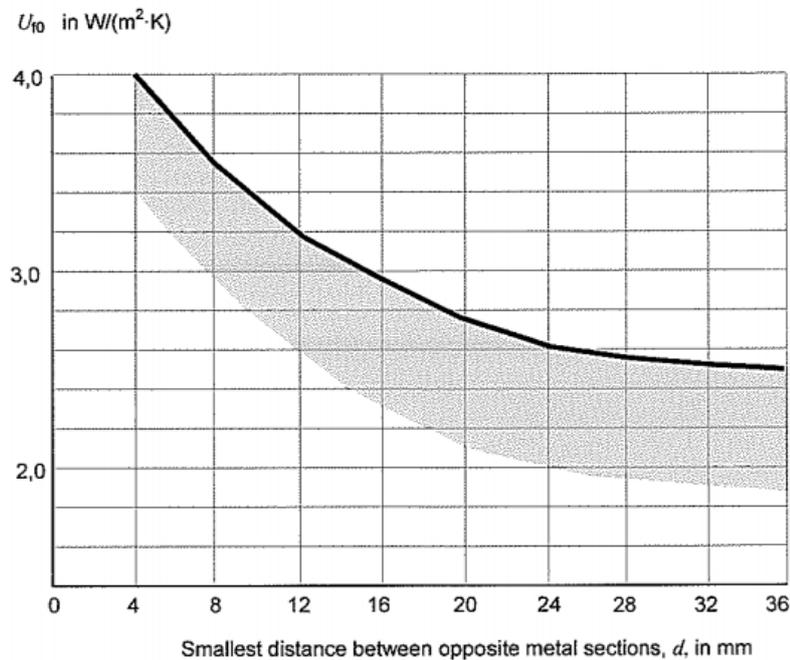


Figura 3.7 – Valores de U_{f0} para caixilharias metálicas com corte térmico [7]

Para caixilharias sem corte térmico, $U_{f0} = 5,9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

A aplicação deste método fica sujeito às seguintes restrições:

- O somatório das espessuras dos cortes térmicos presentes no perfil 1 tem de verificar a seguinte condição,

$$\sum_j b_j \leq 0,2 \cdot b_f \quad (3.34)$$

Sendo,

b_j – espessura do corte térmico j ;

b_f – espessura da caixilharia.

Além disso, a condutibilidade do corte térmico será limitada a, $0,2 < \lambda \leq 0,3 \text{ W/(m.K)}$

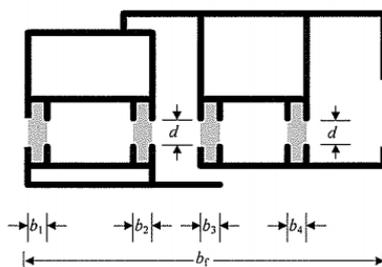


Figura 3.8 – Perfil tipo 1: corte térmico com $0,2 < \lambda \leq 0,3 \text{ W/(m.K)}$ [7]

- O somatório das espessuras dos cortes térmicos presentes no perfil 2 tem de verificar a seguinte condição,

$$\sum_j b_j \leq 0,3 \cdot b_f \quad (3.35)$$

A condutibilidade do corte térmico no perfil 2 será limitada a, $0,1 < \lambda \leq 0,2 \text{ W/(m.K)}$

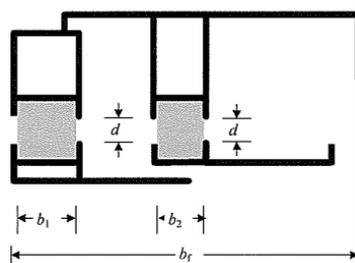


Figura 3.9 – Perfil tipo 2: corte térmico com $0,1 < \lambda \leq 0,2 \text{ W/(m.K)}$ [7]

3.7. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR DA INTERACÇÃO ENTRE CAIXILHARIA/VIDRO/PERFIL INTERCALAR

O perfil intercalar é o elemento que separa as folhas de vidro e geralmente contribui para a redução da transmissão térmica do envidraçado. Os perfis intercalares mais comuns são os de alumínio. Por ser um metal, o alumínio possui uma condutibilidade térmica elevada que faz aumentar as perdas térmicas ao longo do perímetro do vidro. De facto, a existência desta ponte térmica no bordo do vidro, torna-se

visível quando ocorrem condensações. A parte central do vidro apresenta sensivelmente a mesma temperatura por toda a sua área e tende a diminuir na zona de bordo do vidro, precisamente, no local onde estão os perfis intercalares, potenciando a ocorrência de condensações. Este efeito, denominado efeito de bordo, é tão mais importante, quanto mais isolante for a parte central do vidro e quão melhor for o U_f do caixilho em que está inserido. O coeficiente de transmissão térmica do vidro, cujo método de cálculo foi desenvolvido em 3.5.2, aplica-se à área central do vidro, não incluindo o efeito devido ao perfil intercalar.

O coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) descreve as trocas de calor adicionais devido à interacção entre o vidro, a caixilharia e o perfil intercalar.

Na norma encontram-se tabelados valores de ψ para combinações usuais de caixilharia, vidro e perfil intercalar. O ψ de perfis intercalares não tabelados na norma, pode ser determinado através de métodos numéricos. [7]

Para o vidro simples $\psi = 0$ (não há perfil intercalar).

3.7.1. PERFIS INTERCALARES DE ALUMÍNIO E AÇO

Os perfis intercalares mais comuns são os de alumínio. A norma fornece um quadro (3.5) contendo os valores dos coeficientes de transmissão térmica lineares destes perfis, para uma gama específica de tipos de caixilharia e tipos de vidro.

Quadro 3.5 – Valores de ψ para perfis intercalares metálicos correntes (ex: alumínio e aço) (adaptado de [7])

Tipo de caixilharia	Tipo de vidro	
	Duplo ou triplo Sem película Low-E Preenchido com ar ou gás	Duplo ou triplo com película Low-E (numa folha, para vidro duplo) (duas folhas, para vidro triplo Preenchido com ar ou gás)
Madeira / PVC	0,06	0,08
Metálica c/ corte térmico	0,08	0,11
Metálica s/ corte térmico	0,02	0,05

3.7.2. PERFIS INTERCALARES COM DESEMPENHO TÉRMICO MELHORADO

Com o desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas construtivas, apareceram no mercado os perfis intercalares com desempenho térmico melhorado, assim designados por conduzirem menos calor do que os perfis intercalares convencionais. Geralmente, este tipo de perfis possui um corte térmico (fig.3.10) ou é feito de um material com uma condutibilidade térmica baixa (fig.3.11).

Para efeitos de aplicação da norma, um perfil intercalar é considerado como sendo de desempenho térmico melhorado, se verificar a seguinte condição: [7]

$$\sum(dx\lambda) \leq 0,007 \text{ W / K} \quad (3.36)$$

Sendo,

d - espessura da parede do perfil intercalar, em m;

λ - condutibilidade térmica da parede do perfil intercalar em W/(m.K)

Os valores para a condutibilidade térmica podem ser retirados de [6] ou [2]. No anexo A, estão tabeladas as condutibilidades térmicas de alguns materiais (retirado de [6]). Nas figuras seguintes demonstra-se, como se poderá determinar se um perfil intercalar oco ou sólido é de desempenho térmico melhorado.

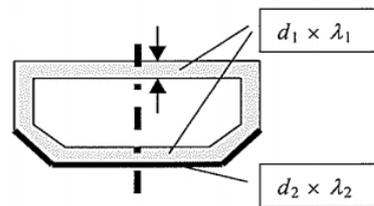


Figura 3.10 – perfil intercalar oco [7]

A expressão seguinte, permite determinar o critério para avaliar se o perfil intercalar oco, da fig.3.10, é de desempenho térmico melhorado.

$$\sum(dx\lambda) = 2 \times (d_1 \times \lambda_1) + d_2 \times \lambda_2 \quad (3.37)$$

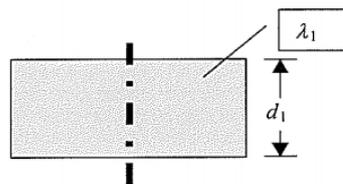


Figura 3.11 – perfil intercalar sólido [7]

Para os perfis intercalares sólidos, a expressão vem,

$$\sum(dx\lambda) = d_1 \times \lambda_1 \quad (3.38)$$

No quadro seguinte, estão os valores do coeficiente de transmissão térmica linear para os perfis intercalares de desempenho melhorado, que verificam a expressão 3.36. Os valores foram determinados para combinações usuais de tipos de caixilharia e de vidro.

Quadro 3.6 – Valores de ψ para perfis intercalares de desempenho térmico melhorado (adaptado de [7])

Tipo de caixilharia	Tipo de vidro	
	Duplo ou triplo sem película Low-E preenchido com ar ou gás	Duplo ou triplo com película Low-E (numa folha, para vidro duplo) (duas folhas, para vidro triplo preenchido com ar ou gás)
Madeira / PVC	0,05	0,06
Metálica c/ corte térmico	0,06	0,08
Metálica s/ corte térmico	0,01	0,04

3.8. RESISTÊNCIA TÉRMICA ADICIONAL DE DISPOSITIVOS DE OCLUSÃO NOCTURNA

Os dispositivos de oclusão, quando fechados, confinam entre si e o envidraçado uma camada de ar que, juntamente com o próprio dispositivo de oclusão, aumenta a resistência térmica total da janela. Esse acréscimo de resistência, designa-se por resistência térmica adicional (ΔR).

3.8.1. PERMEABILIDADE

Para determinar a resistência térmica adicional, primeiro é necessário avaliar a permeabilidade ao ar do dispositivo de oclusão.

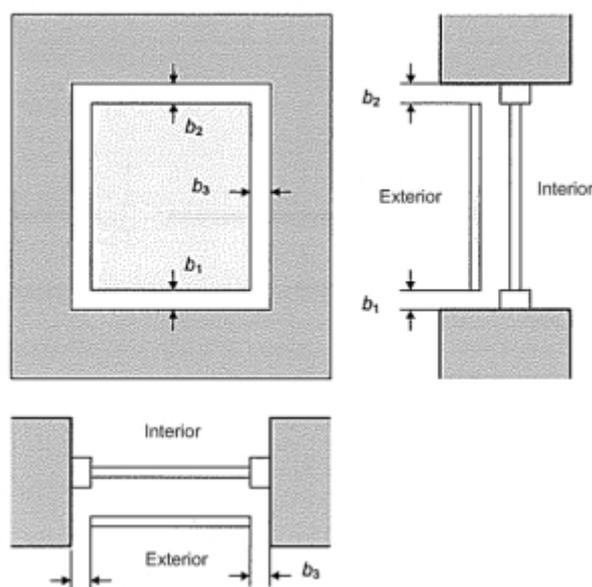


Figura 3.12 – Definição das frinchas [7]

O critério usado na norma para definir a permeabilidade ao ar, baseia-se na dimensão total efectiva das frinchas (b_{sh}) entre o dispositivo de oclusão e o vão do envidraçado.

$$b_{sh} = b_1 + b_2 + b_3 \quad (3.39)$$

Onde b_1 , b_2 e b_3 são os valores médios das frinchas em baixo, no topo e ao lado do dispositivo de oclusão. b_3 refere-se apenas a um dos lados do dispositivo de oclusão, porque a influência das frinchas laterais para a permeabilidade é pequena quando comparado com as frinchas no topo e em baixo.

No quadro seguinte, estão estabelecidas as relações entre a dimensão das frinchas e a permeabilidade do dispositivo de oclusão.

Quadro 3.7 – Relação entre a permeabilidade e a dimensão total efectiva das frinchas entre o dispositivo de oclusão e o vão (adaptado de [7])

Classe	Permeabilidade do dispositivo de oclusão	b_{sh} mm
1	Permeabilidade muito alta	$b_{sh} > 35$
2	Permeabilidade alta	$15 \leq b_{sh} < 35$
3	Permeabilidade média	$8 \leq b_{sh} < 15$
4	Permeabilidade baixa	$b_{sh} \leq 8$
5	Permeabilidade muito baixa	$b_{sh} \leq 3$ e $b_1 + b_3 = 0$ ou $b_2 + b_3 = 0$

Para classes de permeabilidade iguais e superiores a 2, não deverá existir nenhuma abertura no próprio dispositivo de oclusão.

Para dispositivos de oclusão de classe 5, a norma estabelece os seguintes critérios:

- Estores de enrolar:
As frinchas laterais e em baixo são consideradas iguais a 0 se forem fornecidos vedantes nas calhas laterais e na régua final. A frincha no topo é considerada nula se à entrada da caixa de estore existir um vedante ou juntas em ambos os lados do estore.
- Outros dispositivos de oclusão:
Deverá existir vedantes em três lados do contorno do dispositivo de oclusão e no quarto lado, a frincha deverá ser inferior a 3mm.

3.8.2. RESISTÊNCIA TÉRMICA ADICIONAL

Quando a resistência térmica do dispositivo de oclusão (R_{sh}) é conhecida, a resistência térmica adicional (ΔR) é função da permeabilidade e deve ser calculada através das equações presentes no quadro 3.8. Se o valor de R_{sh} não for conhecido, a norma fornece valores de ΔR para os dispositivos de oclusão usualmente utilizados (ver quadro 3.9).

Quadro 3.8 – Expressões para o Cálculo de ΔR em função da permeabilidade (adaptado de [7])

Permeabilidade do dispositivo de oclusão	ΔR ($m^2.K/W$)
Permeabilidade muito alta	$\Delta R = 0,08 m^2.K/W$
Permeabilidade alta	$\Delta R = 0,25.R_{sh} + 0,09 m^2.K/W$
Permeabilidade média	$\Delta R = 0,55.R_{sh} + 0,11 m^2.K/W$
Permeabilidade baixa	$\Delta R = 0,80.R_{sh} + 0,14 m^2.K/W$
Permeabilidade muito baixa	$\Delta R = 0,95.R_{sh} + 0,17 m^2.K/W$

As equações do quadro 3.8 são válidas para $R_{sh} < 0,3 m^2.K/W$. Para dispositivos de oclusão interiores, calcular ΔR substituindo o valor de R_{sh} por 0.

Quadro 3.9 – Resistência térmica adicional, ΔR , para janelas com dispositivos de oclusão (adaptado de [7])

Tipo de dispositivo de oclusão	R_{sh} ($m^2.K/W$)	ΔR ($m^2.K/W$)		
		Permeabilidade alta	Permeabilidade média	Permeabilidade baixa
Estore de enrolar de alumínio	0,01	0,09	0,12	0,15
Estore de enrolar de madeira e plástico	0,10	0,12	0,16	0,22
Estore de enrolar de madeira e plástico com espuma	0,15	0,13	0,19	0,26
Disp. de oclusão de madeira (25 a 30mm de espessura)	0,20	0,14	0,22	0,30

3.9. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO TÉRMICA DA JANELA

3.9.1. JANELA/PORTA SIMPLES

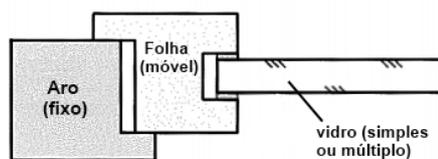


Figura 3.13 – Ilustração de uma janela simples (adaptado de [7]).

A transmissão térmica (U_w) da janela simples é determinada através da equação:

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi}{A_g + A_f} \quad (3.40)$$

Sendo, U_g a transmissão térmica do vidro e U_f a transmissão térmica da caixilharia.

No caso de uma porta, sem painel, a expressão para o cálculo da transmissão térmica da porta (U_D) é igual. Caso a Janela/porta seja constituída por caixilharia, vidro e painel opaco, a expressão a utilizar é a seguinte:

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_p \cdot U_p + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g + l_p \cdot \psi_p}{A_g + A_p + A_f} \quad (3.41)$$

Sendo A_p a área do painel, U_p o coeficiente de transmissão térmica do painel, l_p o perímetro do painel e ψ_p o coeficiente de transmissão térmica linear do painel.

3.9.2. JANELA/PORTA DUPLA

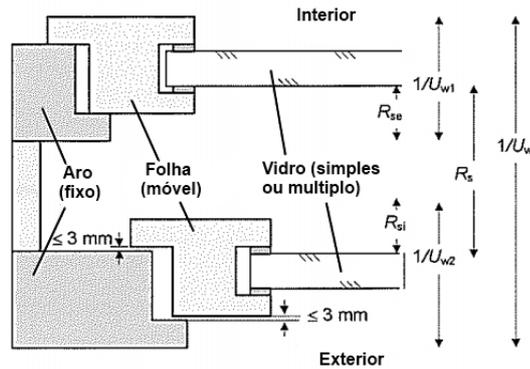


Figura 3.14 – Ilustração de uma janela dupla (adaptado de [7]).

A transmissão térmica de um sistema envidraçado constituído por duas janelas separadas, deverá ser determinado pela equação:

$$U_w = \frac{1}{\frac{1}{U_{w1}} - R_{si} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{w2}}} \quad (3.42)$$

Sendo os valores U_{w1} , U_{w2} as transmissões térmicas da janela exterior e interior, que são determinados pela equação do U_w da janela simples.

R_{si} , R_{se} , são as resistências térmicas superficiais da janela interior e exterior, respectivamente, quando consideradas isoladamente. R_s é a resistência térmica do espaço de ar considerado não ventilado, entre as duas janelas. [7]

3.9.3. JANELA/PORTA DE DUPLA FOLHA NO MESMO ARO

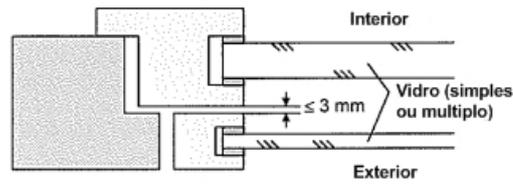


Figura 3.15 – Ilustração de uma janela de dupla folha no mesmo aro (adaptado de [7]).

A transmissão térmica U_w de um sistema envidraçado constituído por duas folhas no mesmo aro deverá ser calculada pela equação (3.40), das janelas simples.

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + I_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f} \quad (3.43)$$

Para determinar a transmissão térmica devido ao efeito conjunto dos dois vidros, deverá usar-se a expressão seguinte:

$$U_g = \frac{1}{\frac{1}{U_{g1}} - R_{si} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{g2}}} \quad (3.44)$$

R_{si} , R_{se} , são as resistências térmicas superficiais do vidro interior e exterior, respectivamente, quando considerados isoladamente. R_s é a resistência térmica do espaço de ar considerado não ventilado, entre os dois vidros.

Sendo os valores U_{g1} , U_{g2} as transmissões térmicas do vidro exterior e interior, que são determinados pela equação do U dos vidros (3.7 e 3.8).

3.9.4. JANELA COM DISPOSITIVO DE OCLUSÃO FECHADO

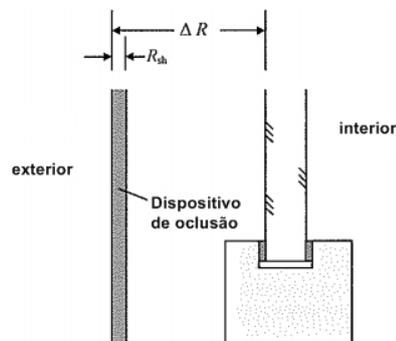


Figura 3.16 – Ilustração de uma janela com dispositivo de oclusão exterior fechado (adaptado de [7]).

A transmissão térmica de uma janela com dispositivo de oclusão fechado U_{WS} , é calculada através da expressão seguinte:

$$U_{WS} = \frac{1}{\frac{1}{U_{W1}} + \Delta R} \quad (3.45)$$

Sendo U_{WS} a transmissão térmica da janela e ΔR a resistência térmica adicional devido à camada de ar entre o dispositivo de oclusão e a janela e devido ao próprio dispositivo de oclusão. [7]

4

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1. JANELA SIMPLES EM MADEIRA – METAL COM VIDRO DUPLO LOW-E

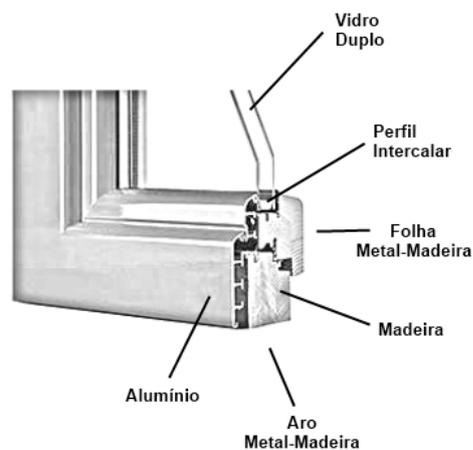


Figura 4.1 – Janela simples em madeira-metal (adaptado de [43])

4.1.1. DADOS INICIAIS

Características geométricas: Área do vão = 2m^2 ,
Área do vidro = $1,60\text{m}^2$,
Área da caixilharia = $0,40\text{m}^2$,
Perímetro do vidro = $5,64\text{m}$.

Vidro: Vidro Comum (Sodacálcico) – $\lambda = 1,0 \text{ W/m.K}$,
Duplo 4-6-4,
Película Low- ϵ na camada de gás – $\epsilon_n = 0,4$,
Gás – Krypton (90%) o restante é Ar (10%),
Orientação vertical,
Sem dispositivo de oclusão.

Caixilharia: Madeira (Metal-Madeira),
Madeira densa,

Dimensões ($d_{\text{aro}} = 50\text{mm}$; $d_{\text{folha}} = 40\text{mm}$).

Perfil intercalar: Alumínio

4.1.2. TRANSMISSÃO TÉRMICA DO VIDRO DUPLO U_g

O cálculo de U_g será realizado para as condições fronteiras normalizadas de temperatura definidas na EN 673 ($\Delta T = 15\text{K}$ e $T_m = 283\text{K}$).

A transmissão térmica é função da condutância térmica de total e da condutância térmica superficial interior e exterior e é dada por:

$$\frac{1}{U_g} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}$$

Sendo, U_g o coeficiente de transmissão térmica, h_e , e h_i as condutâncias térmicas superficiais exterior e interior e h_t a condutância total.

A emissividade normal tem de ser convertida numa emissividade corrigida, conforme especificado na norma EN 673, ver quadro 3.2 no capítulo 3.

$\varepsilon_n = 0,4$ (Emissividade normal da película low- ε)

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} = 1,03$$

$$\varepsilon = 0,4 \times 1,03 = 0,412$$

$\varepsilon_n = 0,89$ (Emissividade normal do vidro comum)

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} = 0,94$$

$$\varepsilon = 0,89 \times 0,94 = 0,837$$

Para condições normalizadas a temperatura média da camada de gás é de 10°C ($T_m = 283\text{K}$).

Condutância por radiação (h_r):

$$\begin{aligned} h_r &= 4 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \cdot T_m^3 \\ &= 4 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1}{0,837} + \frac{1}{0,412} - 1 \right)^{-1} \times 283^3 \\ &= 1,960 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Propriedades da mistura de gases à temperatura normalizada:

Krypton: $\rho = 3,560 \text{ kg/m}^3$

$$\mu = 2,400 \times 10^{-5} \text{ Kg/(m.s)}$$

$$\lambda = 0,900 \times 10^{-2} \text{ W/(m.K)}$$

$$c = 0,245 \times 10^3 \text{ J/(kg.K)}$$

Ar: $\rho = 1,232 \text{ kg/m}^3$

$$\mu = 1,761 \times 10^{-5} \text{ Kg/(m.s)}$$

$$\lambda = 2,496 \times 10^{-2} \text{ W/(m.K)}$$

$$c = 1,008 \times 10^3 \text{ J/(kg.K)}$$

Sendo, ρ a densidade (kg/m^3), μ a viscosidade dinâmica (kg/m.s), λ a condutibilidade (W/m.K) e c a capacidade calorífica específica.

As propriedades da mistura dos gases são determinadas pela expressão seguinte:

$$P = P_1 \cdot F_1 + P_2 \cdot F_2$$

Sendo, P_1 e P_2 a propriedades relevante de cada um dos gases e F_1 , F_2 as proporções de cada gás na mistura. As propriedades da mistura tomam os seguintes valores:

$$\rho = 0,90 \times \rho_{Kp} + 0,10 \times \rho_{Ar} = 3,327 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,90 \times \mu_{Kp} + 0,10 \times \mu_{Ar} = 2,336 \times 10^{-5} \text{ Kg/(m.s)}$$

$$\lambda = 0,90 \times \lambda_{Kp} + 0,10 \times \lambda_{Ar} = 1,060 \times 10^{-2} \text{ W/(m.K)}$$

$$c = 0,90 \times c_{Kp} + 0,10 \times c_{Ar} = 0,321 \times 10^3 \text{ J/(kg.K)}$$

Cálculo do número de Grashof, Prandtl e Nusselt:

Para condições normalizadas $\Delta T = 15\text{K}$

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{9,81 \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \\ &= \frac{9,81 \times 0,006^3 \times 15 \times 3,327^2}{283 \times (2,336 \times 10^{-5})^2} \\ Gr &= 2278,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \\ &= \frac{2,336 \times 10^{-5} \times 0,321 \times 10^3}{1,060 \times 10^{-2}} \\ &= 0,708 \end{aligned}$$

Para envidraçados orientados verticalmente, $A = 0,035$ e $n = 0,38$

$$\begin{aligned} Nu &= A \cdot (Gr \cdot Pr)^n \\ &= 0,035 \times (2278,18 \times 0,707)^{0,38} \\ Nu &= 0,580 < 1 \Rightarrow Nu = 1 \end{aligned}$$

Como o número de nusselt dá inferior a 1, significa que não ocorre convecção na camada de gás. A transferência de calor dá-se apenas por condução.

Condutância do gás (h_g):

$$\begin{aligned} h_g &= Nu \cdot \frac{\lambda}{s} \\ &= 1 \times \frac{1,060 \times 10^{-2}}{0,006} \\ &= 1,766 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Condutância térmica da camada de gás (h_s):

$$\begin{aligned} h_s &= h_r + h_g \\ &= 1,960 + 1,766 \\ &= 3,726 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Condutância térmica total do envidraçado (h_t):

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{h_t} &= \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j \cdot r_j \\
 &= \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M \frac{d_j}{\lambda_j} \\
 &= \sum_1^1 \frac{1}{h_s} + \sum_1^2 \frac{d_j}{1,0} \\
 &= \frac{1}{3,726} + \frac{0,004}{1} \times 2 \\
 &= 0,276 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}
 \end{aligned}$$

Coeficiente de transmissão térmica do vidro (U_g):

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{U_g} &= \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} \\
 &= \frac{1}{23} + 0,276 + \frac{1}{8} \\
 &= 0,445 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \\
 U_g &= \frac{1}{0,445} = 2,25 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}
 \end{aligned}$$

4.1.3. TRANSMISSÃO TÉRMICA DA CAIXILHARIA DE MADEIRA

A caixilharia de madeira é semelhante à representada na figura.

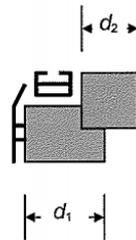


Figura 4.2 – caixilharia com madeira e metal

$$\begin{aligned}
 d_1 &= 50 \text{ mm} \\
 d_2 &= 40 \text{ mm} \\
 d_f &= \frac{d_1 + d_2}{2} = 45 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Pelo gráfico da figura do coeficiente de transmissão térmica das caixilharias de madeira (fig.3.6), retira-se o valor de U_f , através da curva correspondente à madeira densa.

$$U_f = 2,43 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

4.1.4. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR ψ

O coeficiente de transmissão térmica linear, devido à interação entre o perfil intercalar de alumínio, o vidro duplo e a caixilharia de madeira, retira-se do quadro 3.5

$$\psi = 0,08 \text{ W / m.K}$$

4.1.5. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA U_w DA JANELA

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f}$$

$$= \frac{1,6 \times 2,25 + 0,4 \times 2,43 + 5,64 \times 0,08}{1,6 + 0,4}$$

$$= 2,51 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_w = 2,5 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

4.2. JANELA SIMPLES EM ALUMÍNIO COM VIDRO TRIPLO LOW-E

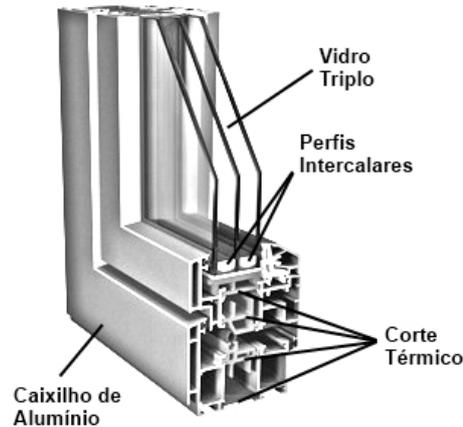


Figura 4.3 – Janela simples em alumínio (adaptado de [25])

4.2.1. DADOS INICIAIS

Características geométricas: Área do vão = 2m^2 ,
 Área do vidro = $1,40\text{m}^2$,
 Área da caixilharia = $0,60\text{m}^2$,
 $A_{f,i} = A_{f,e} = 0,60\text{m}^2$
 $A_{d,i} = A_{d,e} = 0,65\text{m}^2$
 Perímetro do vidro = $5,64\text{m}$.

Vidro: Vidros Comuns (Sodacálcico) – $\lambda = 1,0 \text{ W/m.K}$,
 Triplo 4-12-4-12-4,
 Película Low- ϵ na 2ª camada – $\epsilon_n = 0,087$,
 Gás – SF6 (100%) em ambas as camadas,
 Orientação vertical,
 Sem dispositivo de oclusão.

Caixilharia: Alumínio com corte térmico em poliuretano,
 $\lambda_{\text{corte térmico}} = 0,21 \text{ W/m.K}$
 espessura do caixilho $b_f = 125\text{mm}$,
 $d_{\text{min}} = 10\text{mm}$ (distância mínima entre perfis de alumínio, nas secções onde estão aplicados os cortes térmicos,
 espessura dos elementos de corte térmicos ($b_1 = 10\text{mm}$; $b_2 = b_3 = b_4 = 5\text{mm}$).

Perfil intercalar: Alumínio

4.2.2. TRANSMISSÃO TÉRMICA DO VIDRO TRIPLO U_g

O cálculo de U_g será realizado para as condições fronteiras normalizadas de temperatura definidas na EN 673 ($\Delta T = 15\text{K}$ e $T_m = 283\text{K}$)

A emissividade normal tem de ser convertida numa emissividade corrigida, conforme especificado na norma EN 673, ver quadro 3.2 no capítulo 3.

$$\epsilon_n = 0,087 \text{ (Emissividade normal da película low-}\epsilon\text{)}$$

Fazendo uma interpolação,

$$\frac{0,087 - 0,05}{\frac{\epsilon}{\epsilon_n} - 1,18} = \frac{0,1 - 0,05}{1,14 - 1,18}$$

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_n} = 1,1504$$

$$\epsilon = 0,087 \times 1,1504 = 0,1$$

$$\epsilon_n = 0,89 \text{ (Emissividade normal do vidro comum)}$$

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_n} = 0,94$$

$$\epsilon = 0,89 \times 0,94 = 0,837$$

Condutância por radiação (h_r):

Para condições normalizadas a temperatura média da camada de gás é de 10°C ($T_m = 283\text{K}$)

1ª camada de gás

$$\begin{aligned}
 h_r &= 4 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \cdot T_m^3 \\
 &= 4 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1}{0,837} + \frac{1}{0,837} - 1 \right)^{-1} \times 283^3 \\
 &= 3,6965 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}
 \end{aligned}$$

2ª camada de gás

$$\begin{aligned}
 h_r &= 4 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \cdot T_m^3 \\
 &= 4 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,837} - 1 \right)^{-1} \times 283^3 \\
 &= 0,5046 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}
 \end{aligned}$$

Propriedades do gás SF6 à temperatura normalizada:

$$\rho = 6,360 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,459 \times 10^{-5} \text{ Kg/(m.s)}$$

$$\lambda = 1,275 \times 10^{-2} \text{ W/(m.K)}$$

$$c = 0,614 \times 10^3 \text{ J/(kg.K)}$$

Número de Grashof Prandtl e Nusselt:

Como o gás e a espessura das camadas de gás são iguais, o número de Grashof, de Prandtl e Nusselt são o mesmo para ambas as camadas.

$$\begin{aligned}
 Gr &= \frac{9,81 \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \\
 &= \frac{9,81 \times 0,012^3 \times 15 \times 6,360^2}{283 \times (1,459 \times 10^{-5})^2} \\
 Gr &= 170734,4723 \\
 Pr &= \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \\
 &= \frac{1,459 \times 10^{-5} \times 0,614 \times 10^3}{1,275 \times 10^{-2}} \\
 &= 0,7026
 \end{aligned}$$

Para envidraçados orientados verticalmente, A = 0,035 e n = 0,38

$$\begin{aligned}
 Nu &= A.(Gr.Pr)^n \\
 &= 0,035 \times (170734,47 \times 0,7026)^{0,38} \\
 Nu &= 2,9792 > 1
 \end{aligned}$$

Como o número de nusselt dá maior que 1, significa que não ocorre convecção na camada de gás.

Condutância do gás (h_g):

$$\begin{aligned}
 h_g &= Nu \cdot \frac{\lambda}{s} \\
 &= 2,9792 \times \frac{1,275 \times 10^{-2}}{0,012} \\
 &= 3,1654 \text{ W / m}^2 \cdot K
 \end{aligned}$$

Condutância térmica da camada de gás (h_s):

1ª camada de gás

$$\begin{aligned}
 h_s &= h_r + h_g \\
 &= 3,6965 + 3,1654 \\
 &= 6,8619 \text{ W / m}^2 \cdot K
 \end{aligned}$$

2ª camada de gás

$$\begin{aligned}
 h_s &= h_r + h_g \\
 &= 0,5046 + 3,1654 \\
 &= 3,6700 \text{ W / m}^2 \cdot K
 \end{aligned}$$

Condutância térmica total do envidraçado (h_t):

Método iterativo:

$$\Delta T_s = 15 \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_s}}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{h_t} &= \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j \cdot r_j \\
 &= \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M \frac{d_j}{\lambda_j}
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{U_g} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}$$

No quadro seguinte, estão os resultados intermédios da aplicação do método iterativo para a determinação do U_g do vidro triplo.

Quadro 4.1 – Resultados intermédios do método iterativo

Resultados intermédios do método iterativo						
Iteração		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Camada 1	$\frac{1}{h_s}$	0,1457	0,1719	0,1715	0,1716	0,1716
	ΔT_s	5,23	5,32	5,30	5,30	5,30
Camada 2	$\frac{1}{h_s}$	0,2725	0,3130	0,3140	0,3138	0,3138
	ΔT_s	9,77	9,68	9,70	9,70	9,70
	$\sum \frac{1}{h_s}$	0,4182	0,4850	0,4855	0,4854	0,4854
	U_g	1,67	1,50	1,50	1,50	1,50

Coefficiente de transmissão térmica do vidro (U_g):

$$U_g = 1,50 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

4.2.3. TRANSMISSÃO TÉRMICA DA CAIXILHARIA DE ALUMÍNIO

A caixilharia de alumínio é semelhante à representada na figura.

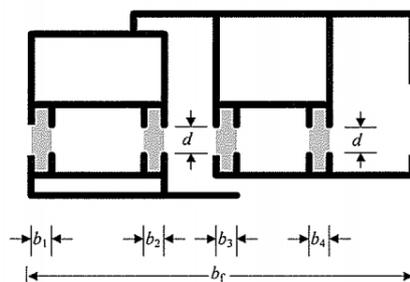


Figura 4.4 – Caixilharia de alumínio

Verificar a condutividade do elemento de corte térmico ($0,2 < \lambda \leq 0,3 \text{ W/(m.K)}$):

$$\lambda_{\text{corte térmico}} = 0,21 \text{ W/m.K (Ok.)}$$

Comparar as espessuras dos elementos de corte térmico e a espessura da caixilharia

$$\begin{aligned} \sum b_j &\leq 0,2 \cdot b_f \\ 10 + 5 + 5 + 5 &\leq 0,2 \times 125 \\ 25 &\leq 25 \text{ mm (Ok)} \end{aligned}$$

Pelo gráfico da figura 3.7, retira-se o valor de U_{f0} ,

$$U_{f0} = 3,4 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Cálculo do coeficiente de transmissão térmica da caixilharia metálica:

Resistência térmica:

$$\begin{aligned} R_f &= \frac{1}{U_{f0}} - 0,17 \\ &= \frac{1}{3,4} - 0,17 \\ &= 0,124 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_f &= \frac{1}{0,13 \cdot \frac{0,60}{0,65} + 0,124 + 0,04 \cdot \frac{0,60}{0,65}} = \\ &= 3,56 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$U_f = 3,56 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

4.2.4. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR ψ

O coeficiente de transmissão térmica linear, devido à interação entre o perfil intercalar de alumínio, o vidro triplo e a caixilharia de metal com corte térmico, retira-se do quadro 3.5

$$\psi = 0,11 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

4.2.5. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA U_w DA JANELA

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f}$$
$$= \frac{1,4 \times 1,50 + 0,6 \times 3,56 + 5,64 \times 0,11}{1,4 + 0,6}$$
$$= 2,44 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_w = 2,4 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

5

MODELO DE CÁLCULO AUTOMÁTICO PROPOSTO - U_wVal

5.1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reduzir os consumos de energia aumentou o interesse na eficiência energética dos edifícios. O relevo que estas questões foram adquirindo ao longo dos anos motivou o desenvolvimento de ferramentas computacionais de cálculo automático, mais ou menos complexas, que simulavam as trocas de energia nos edifícios ou nos seus componentes.

Os vãos envidraçados foram e continuam a ser objecto de diversos estudos que procuram desenvolver modelos matemáticos que permitam integrar, nas ferramentas computacionais, os modos de transferência de calor que ocorrem nos vãos envidraçados, de forma cada vez mais realista. Existem diversos programas de cálculo automático, com características e aplicações diversas, que simulam trocas de calor em duas ou três dimensões, baseados em métodos de análise numérica (método dos elementos finitos e das diferenças finitas). Todos os programas computacionais são conjuntos de comandos e expressões que podem facilmente ocupar milhares de linhas de programação tornando os programas quase tão complexos quanto a realidade que pretendem explicar.

Actualmente existem poucas ferramentas que permitam realizar, de forma rápida e simplificada, o cálculo automático do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados sem ser necessário recorrer à simulação. Além disso, as normas que especificam o método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados não são de fácil aplicação. Surgiu assim a necessidade de sistematizar um método de cálculo simplificado e implementá-lo sob a forma de um software de cálculo automático.

O software aqui apresentado, denominado por U_wVal , foi desenvolvido através do Visual Basic 2008, uma linguagem de programação criada pela Microsoft, caracterizada por conter um ambiente de desenvolvimento integrado totalmente gráfico que facilita a construção da interface permitindo uma interação amigável entre o utilizador e o programa.

5.2. CAMPO DE APLICAÇÃO

A ferramenta desenvolvida permite estimar o coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados, nomeadamente janelas e/ou portas, constituídos por vidro e/ou painel embutidos numa caixilharia, com ou sem dispositivo de oclusão. O programa foi desenvolvido segundo a metodologia de cálculo definida na norma ISO 10077-1. As condições de aplicação são as mesmas da norma que o originou.

O programa é aplicável a:

- Diferentes tipos de superfícies translúcidas (vidro ou plástico; simples, duplo ou triplo; com ou sem películas de baixa emissividade; com os espaços entre as superfícies translúcidas preenchidos por ar ou outros gases);
- Vários tipos de caixilharias (madeira; plástico; metálica com ou sem corte térmico; ou qualquer combinação de materiais);
- Ao cálculo da resistência térmica adicional induzido por diferentes tipos de dispositivos de oclusão, consoante a sua permeabilidade ao ar.

O U_w Val pode ser utilizado em conjunto com outros simuladores cujos métodos numéricos tenham sido validados com os critérios especificados na norma ISO 10077-2.

O programa desenvolvido não se aplica a fachadas cortina nem a outros vidros estruturais que não estejam enquadrados numa caixilharia.

As clarabóias podem ser calculadas pelo U_w Val desde que o coeficiente de transmissão térmica da sua caixilharia tenha sido obtido por medição em laboratório ou por cálculo numérico.

O efeito da ponte térmica entre a janela ou a porta e o vão não são incluídos no cálculo do coeficiente de transmissão térmica.

5.3. DESCRIÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO AUTOMÁTICO DESENVOLVIDO

O U_w Val foi desenhado para correr numa plataforma com sistemas operativos da Microsoft. Está optimizado para correr com o Windows Vista e o Windows 7, podendo ser utilizado noutras versões mais antigas deste sistema operativo.

5.3.1. ESTRUTURA DO PROGRAMA

O programa é constituído essencialmente por dois módulos, um principal e um secundário. O programa inicialmente era constituído por um único módulo, desenvolvido para calcular o coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados. Mais tarde foi adicionado um módulo secundário que efectua uma análise económica comparativa entre sistemas envidraçados. Este módulo, designado de “Análise Económica” é acedido através de um botão existente na barra de ferramentas integrada na janela do módulo principal.

Além destes módulos, o programa tem sub-módulos que desempenham determinadas funções de edição, informação e visualização.

Os sub-módulos designam-se por:

- “Identifica” - Identifica o autor dos projectos realizados com U_w Val e permite assinar os relatórios produzidos. Os relatórios só poderão ser criados se os campos deste módulo estiverem todos preenchidos.
- “Definições” – Permite ao utilizador modificar a interface do programa
- “Manual” – Permite o acesso ao manual do U_w Val
- “Acerca” - Contém informação acerca da versão e autoria do U_w Val

Esses sub-módulos estão facilmente acessíveis através de botões existentes na barra de ferramentas.

5.3.2. CARACTERIZAÇÃO GERAL

O U_wVal foi desenhado para ser um software simples, intuitivo e acessível. Ao clicar no botão para iniciar o programa, aparece uma janela que identifica o programa enquanto este carrega todos os elementos necessários para ser executado. Ao fim de alguns segundos a janela desaparece e o programa inicia. Na figura seguinte está representada a janela de início.



Figura 5.1 – Janela de início

Ao iniciar o programa, visualiza-se uma barra de ferramentas no topo da janela da aplicação. A barra de ferramentas é constituída por dez botões, cuja função está identificada pela imagem que contém e através de uma dica que aparece junto do cursor do rato quando passa sobre cada um desses botões. À medida que o cursor do rato passa sobre os botões da barra de ferramentas, estes vão modificando de cor para ajudarem a assinalar qual o botão seleccionado e onde se encontra o cursor do rato. O valor calculado para o coeficiente da transmissão térmica dos vãos envidraçados e a área do vão podem ser visualizados em qualquer momento, na barra de ferramentas, no campo reservado para o “Resultado Final”. Desta forma, sempre que se modifique algum parâmetro do vão envidraçado, pode-se recalcular rapidamente o seu valor, bastando para isso clicar no botão U_w . Na figura seguinte, vê-se a barra de ferramentas do programa.



Figura 5.2 – Barra de ferramentas

No canto inferior do programa está localizada uma barra de estado que vai fornecendo algumas informações acerca dos processos que estão a decorrer na janela. Na figura seguinte está representada a barra de estado, com a informação de que foi criado um novo projecto (“Novo”)



Figura 5.3 – Barra de estado

Para tornar o programa simples e melhorar a sua funcionalidade, os dados de entrada são todos introduzidos numa única janela ao longo de oito separadores, situados no topo. Na figura seguinte está representada a interface onde terão de ser introduzidos os dados de entrada para o cálculo do U_w .

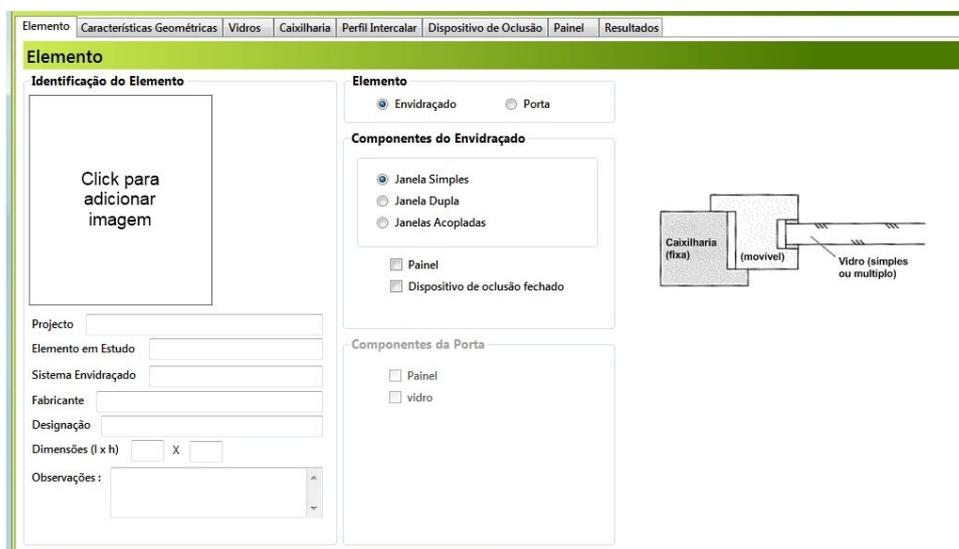


Figura 5.4 – Interface para introduzir os dados de entrada

Cada separador representa um determinado tipo de dados, identificados pela designação inscrita no próprio separador. Sempre que se selecciona um separador, os objectos contidos na janela de interface modificam-se e os dados de entrada já são outros. A disposição dos separadores não implica um encadeamento sucessivo de janelas, pelo que permite ao utilizador escolher quais os dados que irá preencher e a ordem pela qual o vai fazer.



Figura 5.5 – Separadores da interface para introduzir os dados de entrada

O U_w Val contém as funções habituais de criar novo projecto, guardar, abrir e imprimir. A qualquer momento o utilizador pode seleccionar o botão “Guardar”, na barra de ferramentas e guardar o seu trabalho num ficheiro com a extensão “.uwv” ou abrir um projecto guardado, seleccionando “Abrir”.



Figura 5.6 – Ícone do ficheiro com extensão .uwv

A impressora representada na barra de ferramentas cria um relatório com as características gerais da janela/porta e o correspondente U_w . Para que o relatório possa ser criado, os campos do sub-módulo “Identifica” têm de ser todos preenchidos e o valor U_w tem de ser calculado. Para visualizar o relatório, é necessário ter um leitor de PDF’s instalado (ex: Acrobat Reader, foxit Reader, etc).

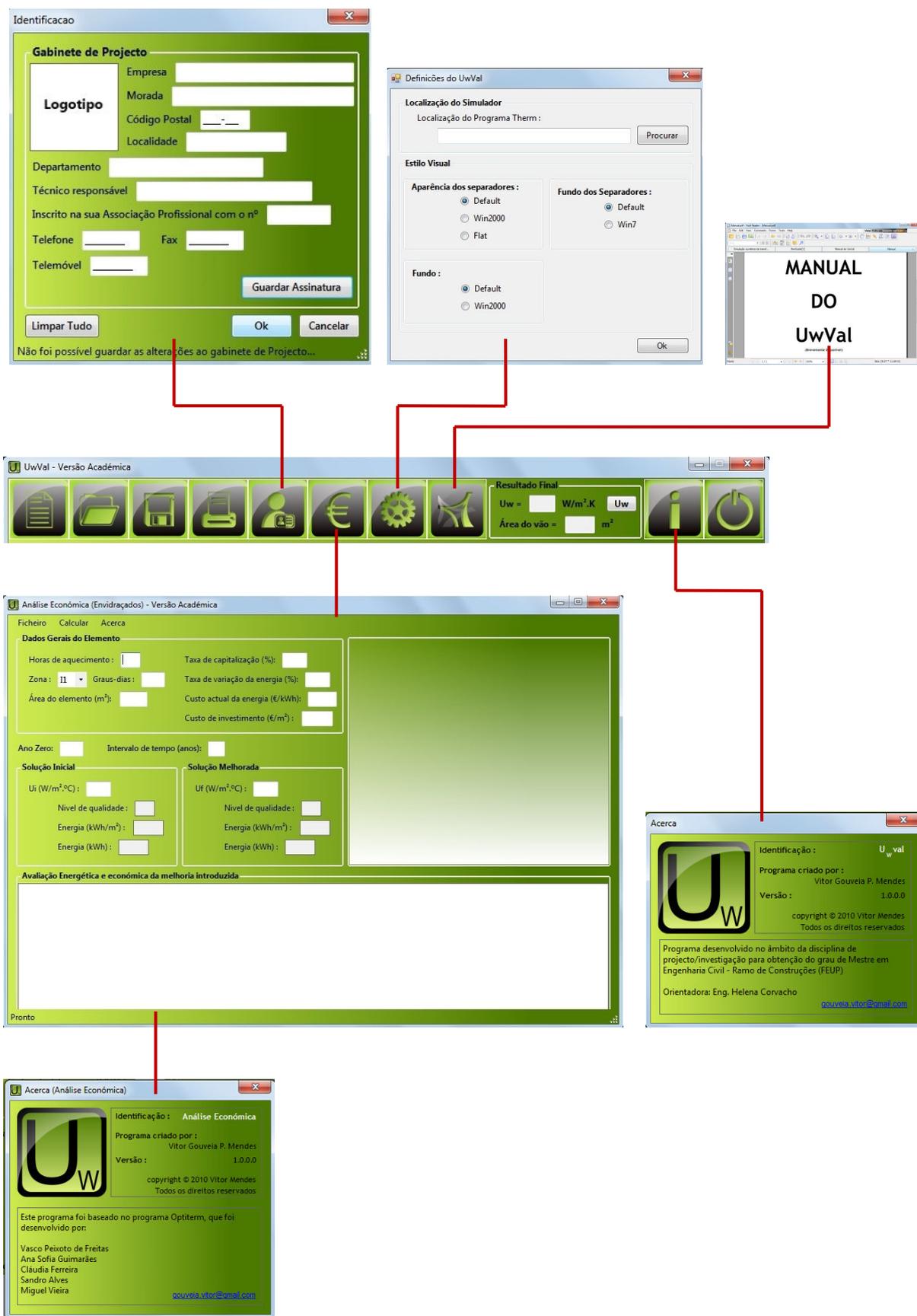


Figura 5.7 – Relação da barra de tarefas com todas as janelas do programa (sub-módulos)

5.3.3. DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

5.3.3.1. Identificar o Vão Envidraçado

O separador “Elemento”, serve para identificar e caracterizar o elemento que será objecto de estudo. O campo Identificação do elemento é de preenchimento opcional, contudo, se não for preenchido estes campos também irão aparecer vazios quando for criado o relatório. Neste campo, pode-se introduzir uma imagem do elemento com qualquer tamanho, contudo, se a imagem for superior ou inferior a cerca de 200x225 pixels, será sujeita a uma ampliação ou redução de tamanho.

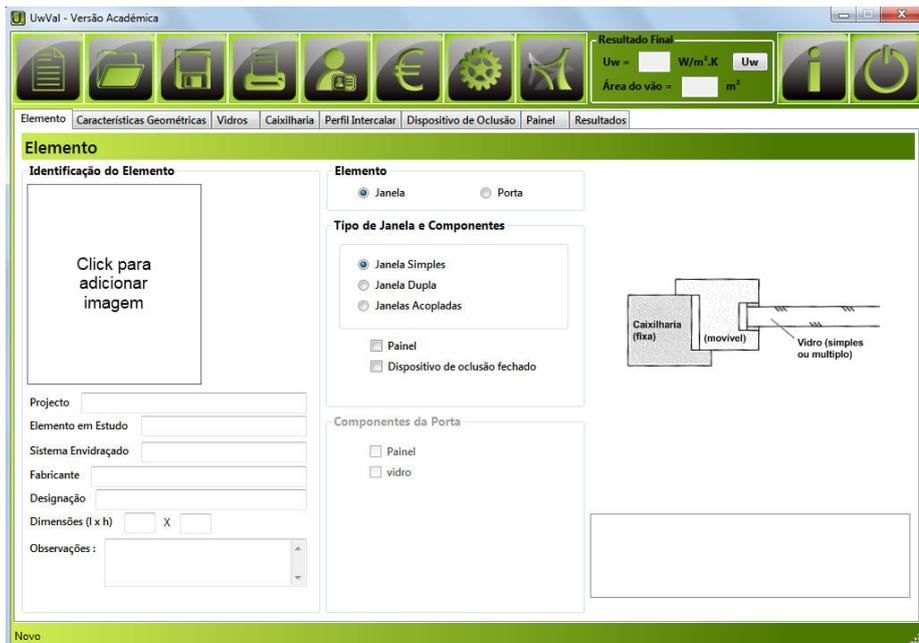


Figura 5.8 – Separador “Elemento”

Neste separador é obrigatório seleccionar o elemento em estudo (janela ou porta), o tipo de janela (simples, dupla ou acopladas) e seleccionar painel se a janela ou porta tiver um painel. Para guiar o utilizador, é mostrada uma imagem esquemática do tipo de elemento seleccionado. Se o vão envidraçado tiver um dispositivo de oclusão, o U_w Val pode calcular o acréscimo de resistência térmica e a sua contribuição para o U_w admitindo que o dispositivo de oclusão está fechado. O valor do U_w determinado é equivalente ao coeficiente de transmissão térmica dia-noite definido no ITE 50.

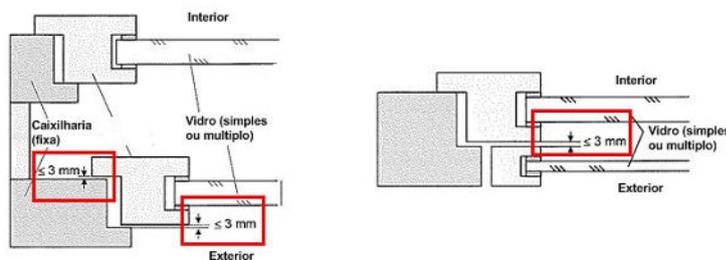


Figura 5.9 – Janela Dupla e Acoplada – espessura máxima das frinchas

No caso das janelas duplas ou acopladas, se as aberturas assinaladas nas figuras seguintes excederem os 3mm e não tiverem sido aplicadas medidas para prevenir uma troca de ar excessiva com o exterior, o método do U_wVal não é aplicável.

As opções realizadas em cada um dos separadores influenciam o funcionamento dos restantes. Quando se selecciona, neste separador o dispositivo de oclusão, os elementos presentes no separador “Dispositivo de oclusão” desbloqueiam-se para permitir a introdução de dados por parte do utilizador. Situações idênticas sucedem-se com outros elementos.

Relativamente às portas, se estas não possuírem um desenho semelhante a um sistema envidraçado, a transmissão térmica não pode ser calculada com o U_wVal .

Por defeito, a janela simples é o elemento inicialmente seleccionado.

5.3.3.2. Definir das Características Geométricas

Neste separador são definidas as áreas e os perímetros dos componentes principais dos vãos envidraçados. A área do vão e da caixilharia são preenchidas automaticamente após o utilizador preencher os restantes campos deste separador. As áreas aqui definidas são explicadas no ponto 3.4 do capítulo 3.

Figura 5.10 – Separador “Características Geométricas”

Os campos em branco têm de ser todos preenchidos para se poder calcular U_w . Os campos a cinzento representam campos que são preenchidos automaticamente pelo programa ou campos que estão bloqueados. No exemplo da figura 5.10, a janela que está seleccionada é uma janela simples, se fosse dupla seria mostrado outro campo semelhante a este para introduzir as características geométricas do outro envidraçado.

Se for introduzido um valor inválido (ex: uma letra em vez de um número), o programa envia uma mensagem de erro, semelhante à da figura 5.11, a informar o utilizador que o valor não é válido.

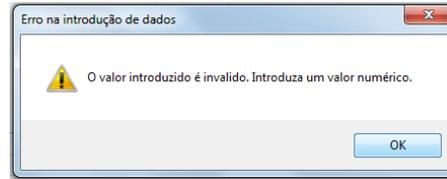


Figura 5.11 – Mensagem de erro

5.3.3.3. Determinar as Características do Vidro

Neste separador, introduzem-se as características dos vidros e calcula-se o coeficiente de transmissão térmica do vidro (U_g). Os dados de entrada são: a condutibilidade térmica dos vidros, a espessura e a emissividade normal, o número de gases presentes no espaço de ar (o U_w Val só admite 3 no máximo) e a sua concentração, a espessura da camada de gás, e orientação do vão envidraçado.

As características térmicas dos gases e o U_g do vidro são determinados segundo a norma EN673.

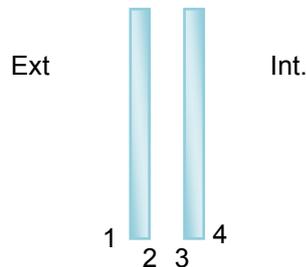


Figura 5.12 – Numeração das camadas

Se não for possível conhecer a condutibilidade do vidro para calcular o U_w do vão envidraçado, segundo a norma EN673 e ISO 10077-1 pode-se assumir que a condutibilidade é de $1,0 \text{ W/mK}$ (condutibilidade do vidro simples).

O valor do U_g determinado pelo U_w Val é calculado para uma temperatura média na camada de gás é de 283K (10°C) e uma diferença de temperatura entre superfícies de vidro fronteiras de 15K (que corresponde ao valor da temperatura fixado para as condições fronteiras normalizadas). As condições fronteiras foram definidas para fins promocionais e servem para comparar o desempenho térmico de elementos. O U_g determinado designa-se por valor declarado. Esta é uma das limitações do U_w Val que se podem eliminar futuramente. A norma define um outro U_g designado valor de projecto. Este valor não tem variáveis rígidas e como tal, pode-se definir condições fronteiras mais adaptadas à realidade e às condições ambientais.

O programa usa uma condutância superficial exterior (h_e) de $23\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, valor de definido na norma EN673, quer para fluxos horizontais quer para fluxos verticais de transferência de calor. Para considerar o efeito da radiação e da convecção no interior do envidraçado o programa considera para a condutância superficial interior (h_i) o valor $10\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ($R_{si} = 0,10 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$) para fluxos na vertical e na horizontal, a h_i é determinada por:

$$h_i = 4,4 \cdot \frac{\varepsilon}{0,837} + 3,6 \quad (5.1)$$

Onde ε é a emissividade corrigida.

Para calcular a emissividade corrigida a partir da emissividade normal, o U_w Val faz uma interpolação linear entre aos valores definidos na norma EN673, utilizando a função seguinte:

```
Private Function EmissividadeCorrigida(ByVal Emiss As Double) As Double
  If Emiss >= 0.03 And Emiss < 0.05 Then
    Return 1.28 - 2 * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.05 And Emiss < 0.1 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.22 - 0.8 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.1 And Emiss < 0.2 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.18 - 0.4 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.2 And Emiss < 0.3 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.18 - 0.4 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.3 And Emiss < 0.4 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.15 - 0.3 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.4 And Emiss < 0.5 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.15 - 0.3 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.5 And Emiss < 0.6 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.1 - 0.2 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.6 And Emiss < 0.7 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.1 - 0.2 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.7 And Emiss < 0.8 Then
    EmissividadeCorrigida = (1.03 - 0.1 * Emiss) * Emiss
  ElseIf Emiss >= 0.8 And Emiss < 0.89 Then
    EmissividadeCorrigida = (9.35 / 9 - Emiss / 9) * Emiss
  ElseIf Emiss = 0.89 Then
    EmissividadeCorrigida = 0.89 * 0.94
  End If
End Function
```

Para calcular o U_g o utilizador começa por definir quantos vidros (vidro simples, duplo, triplo) a janela tem. O programa só admite até três vidros, para os casos correntes julga-se ser o suficiente. De seguida define-se a orientação do vão envidraçado (horizontal, vertical ou outra definida pelo utilizador).

Figura 5.13 – Definir o número de vidros e a orientação

Na camada dos gases define-se a sua espessura e o número de gases existentes na camada e a respectiva concentração.

Figura 5.14 – Definir o número de gases existentes na camada

Na figura 5.15, demonstra-se a ordem correcta de preenchimento das emissividades de cada camada de vidro no programa de cálculo.

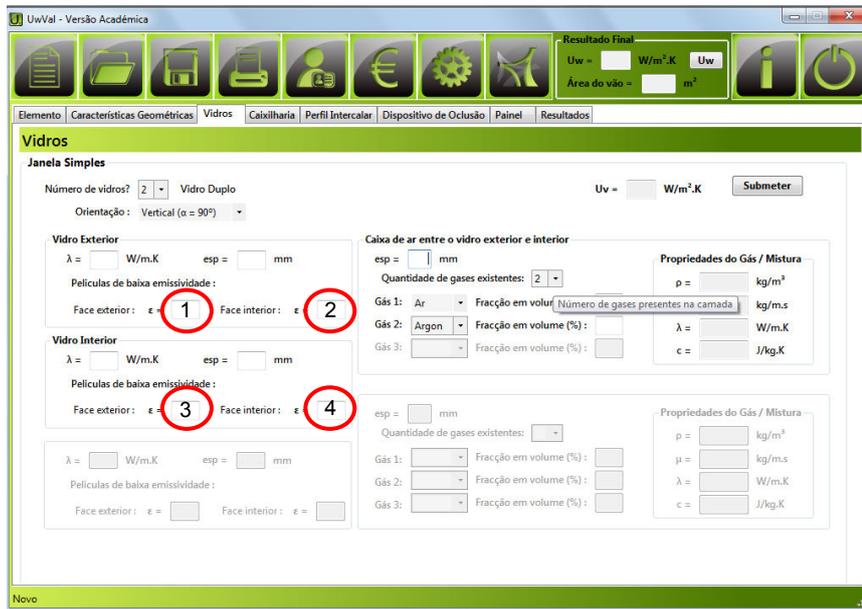


Figura 5.15 – Separador dos “Vidros” – ordem de preenchimento das emissividades de cada camada

Após definidos estes elementos, pressiona-se o botão submeter para validar os valores introduzidos neste separador e para o programa calcular as propriedades da mistura de gases e o respectivo U_g . Ao pressionar “Submeter”, os valores são automaticamente preenchidos no separador dos resultados.

5.3.3.4. Definir a Caixilharia

O modelo de cálculo automático proposto não simula a transferência térmica através da caixilharia. Contudo, pode ser usado em conjunto com um simulador validado segundo os critérios definidos na norma EN10077-2.

Se o utilizador tiver um simulador instalado no seu computador pessoal, pode associa-lo ao U_wVal através do sub-módulo “Definições”, bastando para isso, mencionar onde é que o simulador está instalado.

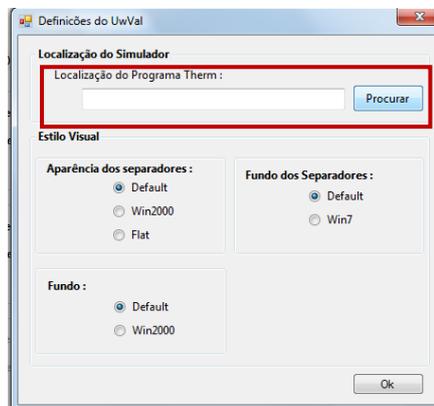


Figura 5.16 – Separador “Caixilharias” – Associar o simulador ao U_wVal



Figura 5.17 – Separador “Caixilhariar” – CheckBox do Simulador (desactivada)

Quando o simulador é associado ao programa, a checkbox marcada na figura 5.16 fica desbloqueada. O utilizador ao seleccionar esta opção, lança automaticamente o simulador. Calcula a caixilharia no simulador e depois, com o U_f (coeficiente de transmissão térmica da caixilharia) determinado, introduz no U_wVal e este faz o cálculo do U_w para o vão envidraçado e gera um relatório. Em opção, pode-se determinar U_f em laboratório, através do método “Hot-Box” e com o valor obtido, pode-se estimar o valor do U_w . Para as janelas horizontais, a norma específica que o valor de U_f terá de ser obtido por um destes dois métodos mencionados. Caso não seja possível determinar U_f por um destes dois métodos, o U_wVal não é aplicável.

Caso a janela/porta tenha orientação vertical, na ausência de informação, pode-se recorrer ao método dos valores tabelados.



Figura 5.18 – Separador “Caixilhariar” – Método dos valores tabelados (ex: janelas duplas)



Figura 5.19 – Separador “Caixilharias” – Método dos valores tabelados

No método dos valores tabelados o utilizador começa por escolher o tipo de caixilharia. Para cada tipo de caixilharia, o programa tem um procedimento específico para calcular o U_f

Caixilharia de Plástico – O utilizador apenas precisa definir o número de câmaras ocas que a caixilharia possui ou se a caixilharia é de poliuretano com núcleo metálico.

Caixilharia de Madeira – O utilizador escolhe a densidade da madeira (pouco densa ou densa) e de seguida, escolhe, entre seis perfis de caixilharias, o perfil mais próximo da caixilharia em estudo. Introduce as espessuras do aro e da folha da caixilharia em mm nas caixas de diálogo. Com estes dados o programa determina uma espessura equivalente. Com esta espessura, é possível determinar o valor de U_f directamente de uma curva que relaciona U_f da madeira com a sua espessura. Para introduzir as curvas no programa foi feita uma regressão linear pelo método dos mínimos quadráticos, obtendo-se uma correlação superior a 0,9.

A seguir estão algumas linhas do programa com as duas curvas obtidas por regressão linear. Uma para as madeiras densas e a outra para as madeiras pouco densas.

```

If testamadeira = True Then
  Select Case CbbDensMadeira.SelectedIndex
  Case 0
    Uf = 0.00004 * df ^ 2 - 0.0186 * df + 3.2061
  Case 1
    Uf = 0.00004 * df ^ 2 - 0.0163 * df + 2.7533
  End Select
Else
  MsgBox.Show ("Não foi possível calcular Uf. Verifique os
  dados introduzidos para a janela exterior de madeira.",
  My.Application.Info.Title, MessageBoxButtons.OK, _
  MessageBoxIcon.Warning)
Exit Sub
End If

```

- Caixilharia de metal – O utilizador tem de especificar se a caixilharia tem ou não corte térmico. Se não tiver corte térmico, o programa calcula automaticamente o U_f da caixilharia, em função das suas áreas, conforme definido na norma. Se a caixilharia tiver corte térmico, o utilizador tem de escolher entre duas caixilharias tipo e confirmar se o elemento de corte térmico cumpre os limites estabelecido

para a condutibilidade. Se cumprir o método é aplicável. O utilizador insere nas caixas de texto as dimensões legendadas nas figuras e programa, através da menor distância entre perfis de alumínio (d), determina um valor U_{f0} , obtido por regressão linear através de uma curva definida na norma ISO 10077-1. Determinado o valor de U_{f0} , o programa calcula U_f através da expressão:

$$U_f = \frac{1}{\left(R_{si} \cdot \frac{A_{fi}}{A_{di}} + R_f + R_{se} \cdot \frac{A_{fe}}{A_{de}} \right)} \quad (5.2)$$

A seguir estão algumas linhas do programa com o método de cálculo para determinar o U_f das caixilharias metálicas através do método dos valores tabelados.

```

Try
  If RdbCaixMetalsCorteTerm.Checked = True Then
    Uf0 = 5.9
    Rf = 1 / Uf0 - 0.17

    TxtResJanSplCterm.Text = "Não"
  Else
    Dim d As Double
    d = CType(TxtMetalD.Text, Double)

    Dim j As Integer

    Select Case PicActiveMetal
      Case "PictureBoxMetal1"
        j = 1
      Case "PictureBoxMetal2"
        j = 0
    End Select

    TestaEspMetal = VerificaEspMetal(NumDimMetal(j))

    If TestaEspMetal = True Then
      Uf0 = 0.002 * d ^ 2 - 0.1266 * d + 4.4622
      Rf = 1 / Uf0 - 0.17

      TxtResJanSplCterm.Text = "Sim"
    Else
      Exit Sub
    End If
  End If

  Uf = 1 / (rsi * Afi / Adi + Rf + rse * Afe / Ade)
Catch ex As Exception
  MessageBox.Show("Não foi possível calcular Uf. Verifique os dados
introduzidos.", My.Application.Info.Title, MessageBoxButtons.OK, _
  MessageBoxIcon.Warning)
Exit Sub
End Try

```

Após o utilizador determinar introduzir todos os dados, pressiona o botão submeter para o programa determinar U_f através das metodologias de cálculo aqui demonstradas. Ao pressionar o botão “Submeter”, os valores são automaticamente introduzidos no separador resultados.

5.3.3.5. Introduzir o Perfil Intercalar

No vidro simples não existe perfil intercalar. O programa verifica o número de vidros introduzidos pelo utilizador. Enquanto o número de vidros for um, os objectos do separador “Perfil intercalar” mantêm-se bloqueados.

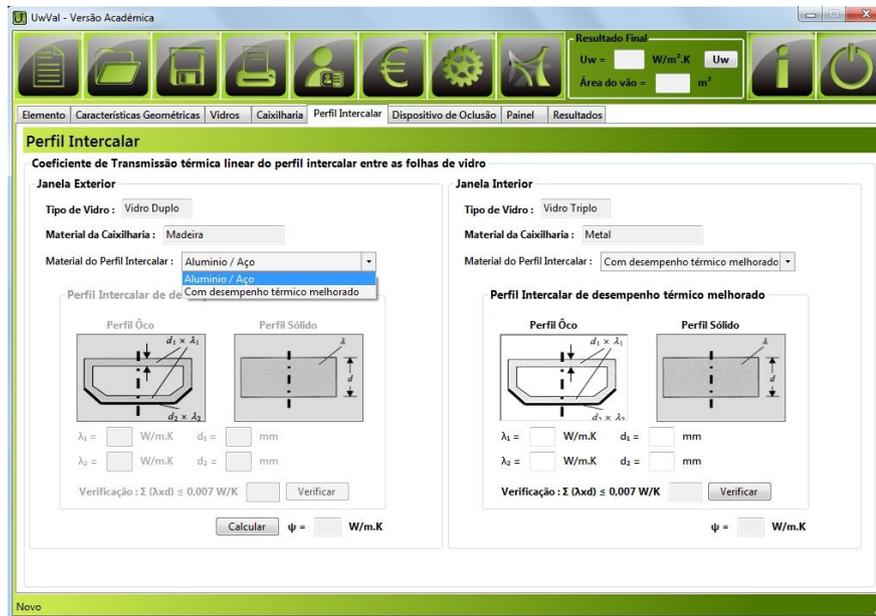


Figura 5.20 – Separador “Perfil Intercalar”

No caso de vidros duplos, ou triplo, os objectos desbloqueiam-se. O programa determina o coeficiente de transmissão térmica linear recorrendo a valores tabelados na norma ISO 10077-1. O campo do tipo de vidro e da caixilharia são preenchidos automaticamente pelo programa para poupar trabalho ao utilizador e eliminar dados redundantes. Neste separador o utilizador só precisa de informar ao programa de que material é feito o perfil intercalar. O programa apresenta duas opções “Alumínio/Aço” ou “Perfil Intercalar com desempenho térmico melhorado”. Se escolher o intercalar de alumínio, o programa fornece automaticamente o valor do coeficiente de transmissão térmica linear. Para efeitos de aplicação do programa, o coeficiente de transmissão térmica linear do intercalar de alumínio depende do tipo de caixilharia e do tipo de vidro.

Se o utilizador escolher o perfil intercalar com desempenho térmico melhorado, o programa tem uma metodologia que permite verificar se o perfil intercalar é efectivamente de desempenho térmico melhorado. Esta verificação não serve para classificar o intercalar como tal, serve apenas como um critério de conformidade para poder aplicar a metodologia proposta, ao intercalar. Quando o utilizador selecciona esta opção, vários objectos são desbloqueados e tem à escolha dois tipos de perfil: oco ou sólido. Para aplicar a verificação, o utilizador tem de introduzir a condutibilidade dos elementos constituintes do perfil e a sua espessura e depois pressiona o botão verificar. O programa verifica a seguinte condição:

$$\sum d \times \lambda \leq 0,007 \text{ W/K} \quad (5.3)$$

Se o resultado for “Ok”, o intercalar é considerado de desempenho térmico melhorado, para efeitos de aplicação do U_w Val, e o programa desbloqueia o botão que permite determinar o coeficiente de

transmissão térmica linear. Pressionando o botão “Calcular” determina-se ψ (coeficiente de transmissão térmica linear) através de valores tabelados na norma ISO 10077-1 e os valores deste separador são automaticamente introduzidos no separador “Resultados”.

De seguida, transcreve-se uma parte do código criado para verificar se o intercalar é de desempenho térmico melhorado.

```

Dim cond1, dim1, SumVerfEspac As Double
Try
    cond1 = CType(TxtCondutEspac1.Text, Double)
    dim1 = CType(TxtEspacD1.Text, Double)

    Select Case PicActiveEspac
        Case "PicBoxEsp1"
            Dim cond2, dim2 As Double
            cond2 = CType(TxtCondutEspac2.Text, Double)
            dim2 = CType(TxtEspacD2.Text, Double)

            SumVerfEspac = cond1 * dim1 / 1000 + cond2 * dim2 / 1000
        Case "PicBoxEsp2"
            SumVerfEspac = cond1 * dim1 / 1000
    End Select

    If SumVerfEspac <= 0.007 Then
        TxtVerifEspac.BackColor = Color.Green
        TxtVerifEspac.Text = "Ok"

        BtnCalEspac.Enabled = True
        BtnCalEspac.Visible = True
    Else
        TxtVerifEspac.BackColor = Color.Red
        TxtVerifEspac.Text = "Nok"
        MessageBox.Show("Para efeitos de aplicação da norma 10077, o
elemento que considerou para perfil intercalar não é considerado um perfil
intercalar de depenho térmico melhorado. Neste caso, a norma não se aplica para
este elemento, com estas dimensões.", My.Application.Info.Title,
MessageBoxButtons.OK, _
        MessageBoxIcon.Information)
        BtnCalEspac.Enabled = False
        BtnCalEspac.Visible = False
        TxtCoefTransTermLin.Text = Format(0, "0.00")
        TxtResJanSplEspCoef.Text = TxtCoefTransTermLin.Text
        TxtUw.Text = ""
    End If
Catch ex As Exception
    MessageBox.Show("Não foi possível calcular o coeficiente de transmissão
térmica linear  $\psi$ (W/m.K). Verifique os dados introduzidos.",
My.Application.Info.Title, MessageBoxButtons.OK, _
        MessageBoxIcon.Warning)

Exit Sub
End Try

```

O $UwVal$ à medida que o utilizador percorre o programa, vai informando-o acerca de erros e limitações subjacentes ao próprio método. Na imagem seguinte o programa informa o utilizador que o método de calculo não é válido para o espaçador em questão. O espaçador, segundo a norma ISO 10077-1, não é considerado de desempenho térmico melhorado.

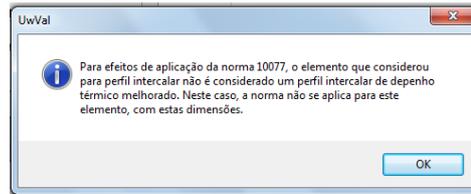


Figura 5.21 – Informação apresentada pelo U_wVal

5.3.3.6. Determinar a Permeabilidade do Dispositivo de Oclusão

Os comandos do separador “Dispositivo de Oclusão” só desbloqueiam se a checkbox no separador “Elemento” for activada. Depois de activado e desbloqueado, o utilizador tem de fornecer a resistência térmica do dispositivo de oclusão. A resistência térmica pode ser fornecida pelo fabricante, calculada em simuladores ou medida em laboratório. Na ausência desta informação, o programa fornece o valor da resistência térmica de alguns dispositivos de oclusão utilizados correntemente.

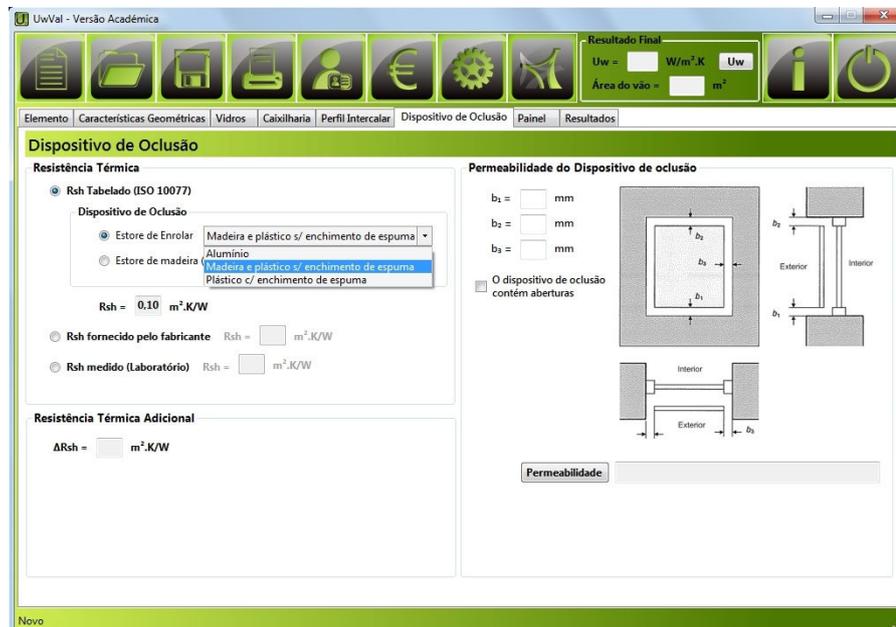


Figura 5.22 – Separador “Dispositivo de Oclusão”

Neste caso, o utilizador pode escolher um elemento ou introduzir um valor para a resistência térmica do dispositivo de oclusão. Para determinar o acréscimo de resistência térmica proporcionado pelo dispositivo de oclusão para a transferência de calor que ocorre através do vão envidraçado, é necessário determinar a permeabilidade do dispositivo de oclusão. A permeabilidade é estabelecida em função da dimensão das aberturas entre o contorno do dispositivo de oclusão e o vão.

Transcreve-se do código do U_wVal a rotina que determina a permeabilidade do dispositivo de oclusão:

```
Private Sub CalculaPermeabilidade()
    Dim b1, b2, b3, bsh As Integer

    Try
        If CkbDisposOclusAberturas.Checked = False Then
            b1 = CType(Txtbl.Text, Integer)
```

```

b2 = CType(Txtb2.Text, Integer)
b3 = CType(Txtb3.Text, Integer)

bsh = b1 + b2 + b3

If (bsh > 35) Then
    TxtPermeab.Text = "Permeabilidade muito alta - Classe 1"
    C = 1
ElseIf (bsh >= 15 And bsh < 35) Then
    TxtPermeab.Text = "Permeabilidade alta - Classe 2"
    C = 2
ElseIf (bsh >= 8 And bsh < 15) Then
    TxtPermeab.Text = "Permeabilidade média - Classe 3"
    C = 3
ElseIf (bsh <= 3 And (b1 + b3 = 0 Or b2 + b3 = 0)) Then
    TxtPermeab.Text = "Permeabilidade muito baixa - Classe 5"
    C = 5
ElseIf (bsh < 8) Then
    TxtPermeab.Text = "Permeabilidade baixa - Classe 4"
    C = 4
End If
Else
    TxtPermeab.Text = "Permeabilidade muito alta - Classe 1"
    C = 1
End If
Catch ex As Exception
    MessageBox.Show("Não foi possível determinar a permeabilidade.
Verifique os dados introduzidos.", My.Application.Info.Title, MessageBoxButtons.OK,
-
                                MessageBoxIcon.Warning)

Exit Sub
End Try
End Sub

```

Uma vez determinada a permeabilidade do dispositivo de oclusão a resistência térmica adicional pode ser calculada através das expressões do quadro 3.8 do capítulo 3.

Transcreve-se do código do UwVal a rotina que determina a resistência térmica adicional do dispositivo de oclusão:

```

Public Sub CalculaResistTermicAdicional()
    If C = 1 Then
        DRsh = 0.08
    ElseIf C = 2 Then
        DRsh = 0.25 * Rsh + 0.09
    ElseIf C = 3 Then
        DRsh = 0.55 * Rsh + 0.11
    ElseIf C = 4 Then
        DRsh = 0.8 * Rsh + 0.14
    ElseIf C = 5 Then
        DRsh = 0.95 * Rsh + 0.17
    End If

    TxtRshAdicional.Text = Format(DRsh, "0.00")
End Sub

```

5.3.3.7. Introduzir o Painei

Neste separador “Painel” o utilizador pode introduzir as características térmicas de elementos opacos que possuem um desenho semelhante a um envidraçado. Caso contrário, o programa de cálculo U_w Val não é aplicável.



Figura 5.23 – Separador “Painel”

O utilizador apenas tem de inserir a condutibilidade térmica do painel, a espessura, o material do painel e eventualmente as características de um elemento que funciona como um perfil intercalar. Se este elemento intercalar não existir, introduzir o valor 0 na caixa do coeficiente de transmissão térmica linear (ψ). Após introduzir as características dos elementos, pressionar o botão submeter para validar os valores introduzidos.

5.3.3.8. Resumo das Características do Vão Envidraçado

O último separador, denominado “Resultados” reúne vários elementos inseridos ou calculados nos restantes separadores. Este separador permite consultar, em qualquer instante, os dados já preenchidos e os que ainda faltam preencher. O coeficiente de transmissão térmica U_w só é calculado após este separador estar todo preenchido. Se ocorrer um erro ao pressionar o botão para executar o cálculo do U_w , é este o separador que se deve consultar primeiro para procurar alguma incongruência. Provavelmente deverá estar em falta algum parâmetro para se poder proceder ao cálculo do U_w . Neste elemento não se efectuam quaisquer cálculos, é apenas um elemento de consulta que permite controlar o desenrolar do método de cálculo e detectar rapidamente erros ou omissões.

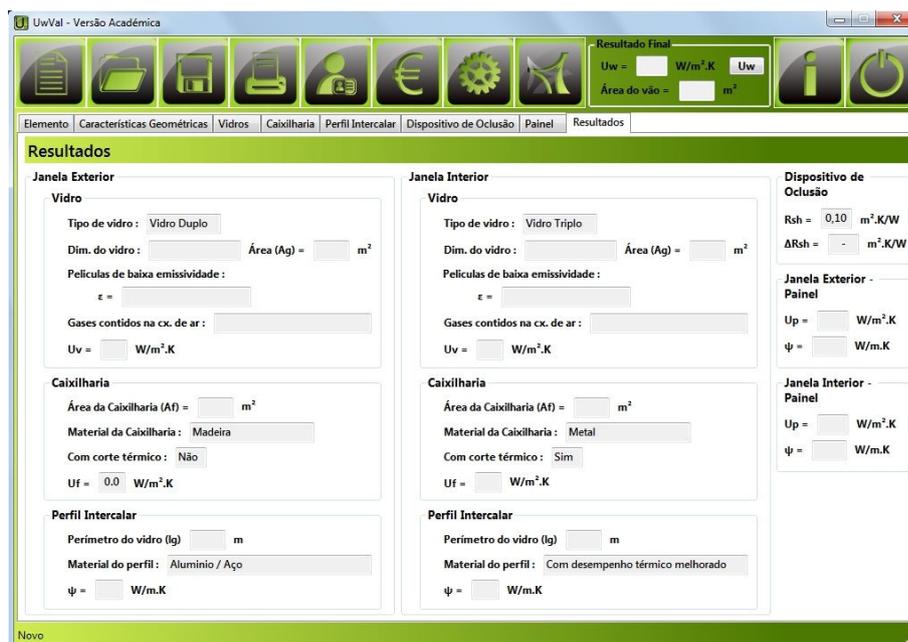


Figura 5.24 – Separador “Resultados”

5.3.3.9. Cálculo do Coeficiente de Transmissão Térmica do Vão Envidraçado

Após todos os elementos estarem calculados e o separador dos resultados estar totalmente preenchido, é altura de determinar o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado. Para isso o utilizador só precisa de clicar no botão U_w situado na barra de ferramentas.

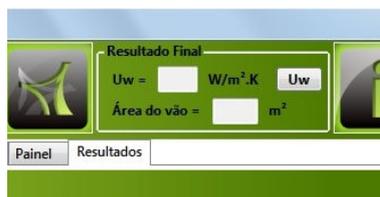


Figura 5.25 – Resultado final - U_w

Optou-se por colocar o campo dos “Resultados Finais” na barra de ferramentas por uma questão de facilidade de acesso e rapidez de cálculo. Após determinar-se o U_w de um sistema envidraçado, pode ser necessário alterar alguns parâmetros e recalculer o U_w novamente, desta forma o U_w fica à distância de um único click.

Transcreve-se do código do UwVal as linhas referentes à expressão que permite determinar o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados.

```
'---Uw da Janela Dupla---
Uw = 1 / (1 / UwInt - Rsi + Rs - Rse + 1 / UwExt)
If chkDispositivoOclusao.Checked = True Then
    Udn = 1 / (1 / Uw + DRsh)
ElseIf chkDispositivoOclusao.Checked = False Then
    Udn = Uw ' Se o dispositivo de oclusão estiver aberto
End If
'---Uw da Janela Simples---
```

```

Uw = (Avid * Ug + ACaix * UfI + Up * Ap + Lg * psi + lp * psiPain) / (Avid + ACaix
+ Ap)
If chkDispositivoOclusao.Checked = True Then
    Udn = 1 / (1 / Uw + DRsh)
ElseIf chkDispositivoOclusao.Checked = False Then
    Udn = Uw ' Se o dispositivo de oclusão estiver aberto
End If

```

5.3.4. RELATÓRIO

Depois de concluídos todos os cálculos e de se chegar ao valor do coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado, o programa permite gerar um relatório com um aspecto profissional, em formato pdf. O relatório é constituído por três partes, nomeadamente:

- **Cabeçalho** - onde poderá figurar a identificação e o logótipo do gabinete de projecto que realizou a análise térmica do elemento em estudo;
- **Corpo** – dividido em duas partes, na primeira identifica-se o elemento em estudo e na segunda resumem-se as suas características térmicas e apresenta-se o seu coeficiente de transmissão térmica;
- **Rodapé** – Onde se identifica o técnico que analisou o desempenho térmico do elemento e produziu o relatório.

O relatório só pode ser gerado se os campos do sub-módulo “Identificação” estiverem todos preenchidos e após se ter calculado o coeficiente de transmissão térmica do envidraçado. Para gerar o relatório basta clicar no botão “Relatório” da barra de ferramentas, representado na figura 5.22.



Figura 5.26 – Botão da barra de ferramentas para criar um relatório

Para se poder criar e visualizar o relatório é necessário ter instalado um leitor de pdf's. No Anexo B está representado um exemplo de um relatório criado pelo U_w Val.

5.4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO E VALIDAÇÃO

Neste ponto serão apresentados dois exemplos práticos da utilização do modelo de cálculo automático desenvolvido. Serão resolvidos, através do U_w Val, dois vãos envidraçados que serviram de exemplo para a determinação analítica do coeficiente de transmissão térmica segundo as normas europeias e nacionais actualmente em vigor. Deste modo poder-se-á inferir acerca da validade dos resultados devolvidos pela aplicação desenvolvida.

5.4.1. JANELA SIMPLES EM MADEIRA - METAL COM VIDRO DUPLO LOW-E

As características do vão envidraçado aqui representado estão no ponto 4.1 do capítulo 4. Na figura 5.22 pode-se ver uma imagem da janela em estudo. A caixilharia representada é composta por dois materiais, a madeira e o alumínio. O alumínio neste sistema funciona como uma camada protectora da madeira, aumentando a sua durabilidade.

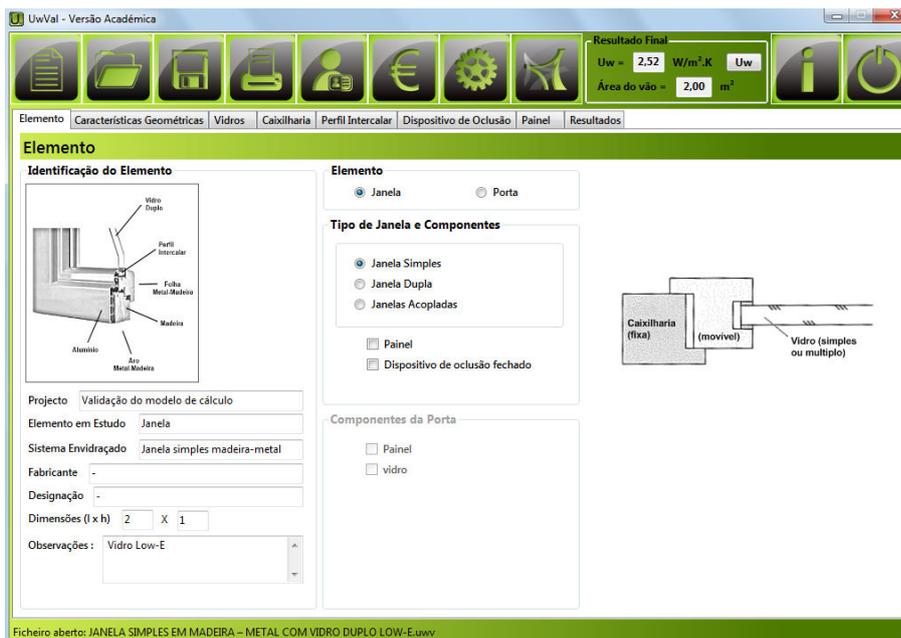


Figura 5.27 – Elemento em estudo – Janela simples madeira-metal

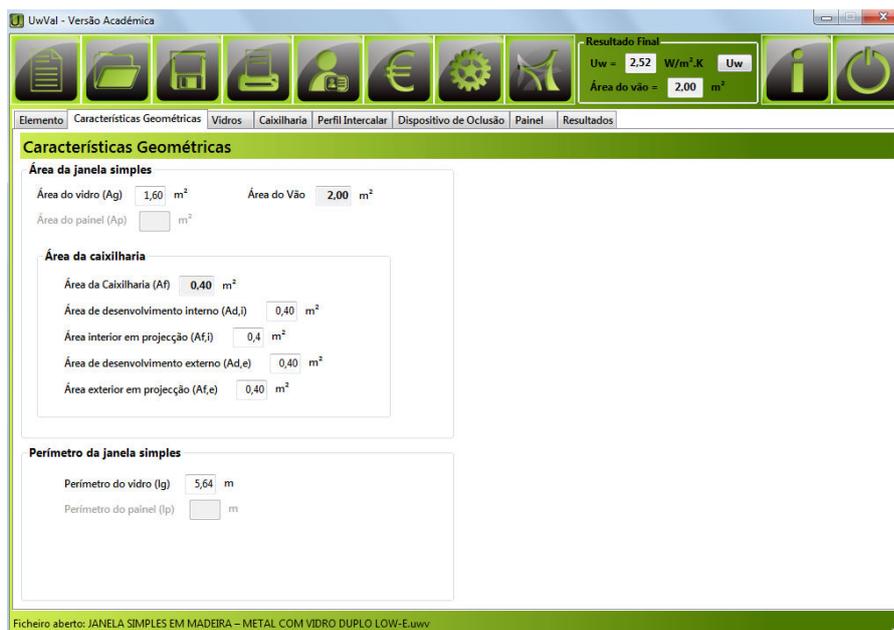


Figura 5.28 – Características Geométricas – Janela simples madeira-metal

Nesta janela podemos fazer uma validação parcelar do programa. A camada de ar intermédia do vidro duplo é constituída por uma mistura de dois gases, o Kripton (90%) e o Ar (10%) e a face interior do vidro exterior possui uma película de baixa emissividade ($\epsilon=0,40$). A norma europeia ISO 10077-1 contém várias tabelas com o coeficiente de transmissão térmica de vidros duplos em função das suas dimensões, da emissividade normal e da concentração de gás na camada intermédia. Segundo a norma, um vidro duplo, com uma película de baixa emissividade, e 90% de kripton possui uma condutividade

de $2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Pelo U_{wVal} , o mesmo vidro, nas mesmas condições terá uma condutividade térmica de $2,25\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Os valores de U_g dão próximos.

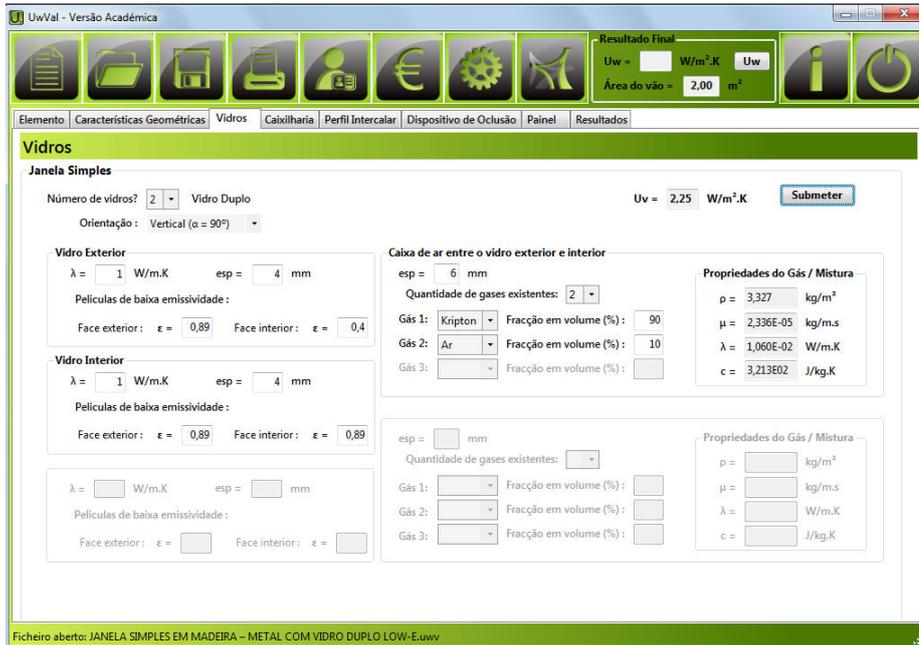


Figura 5.29 – Características Geométricas – Janela simples madeira-metal

A caixilharia da janela em estudo tem uma estrutura em madeira e é rematada pelo exterior com uma camada de alumínio. Dos seis sistemas de caixilharia de madeira, a que mais se aproxima da caixilharia em estudo é destacada a vermelho.

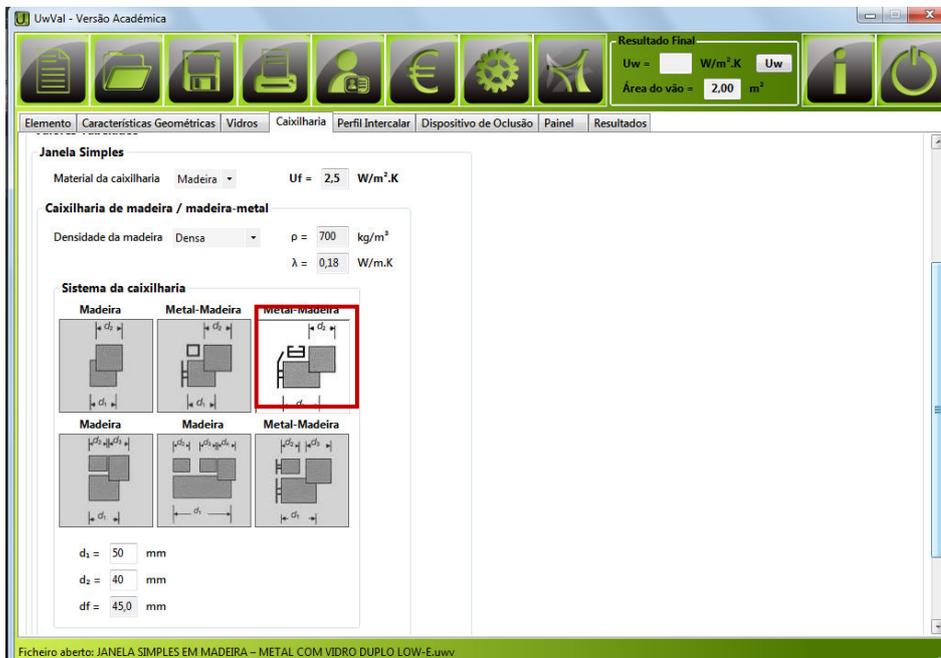


Figura 5.30 – caixilharia – Janela simples madeira-metal

O espaçador considerado é em alumínio, logo, a determinação do coeficiente de transmissão térmica linear vem simplificada.

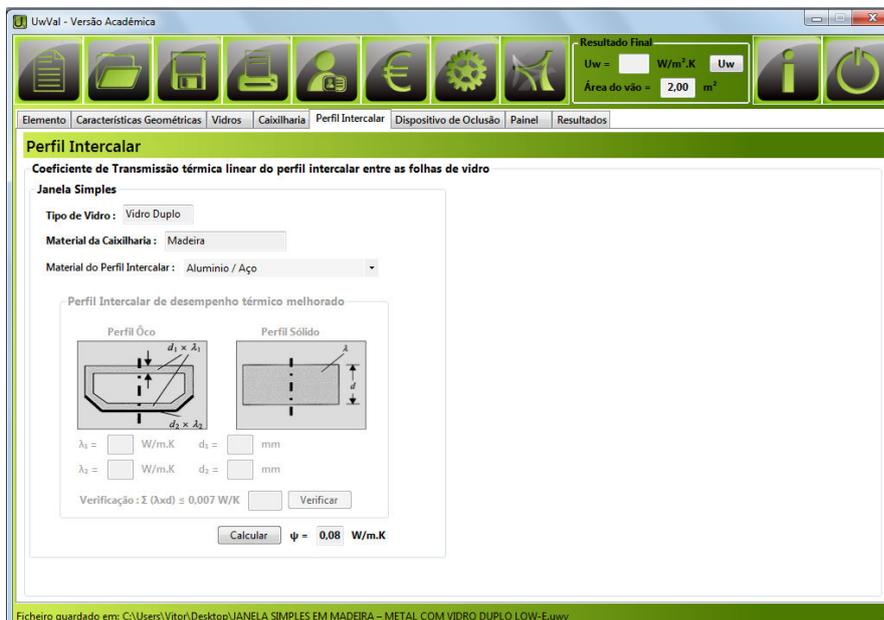


Figura 5.31 – Perfil intercalar – Janela simples madeira-metal

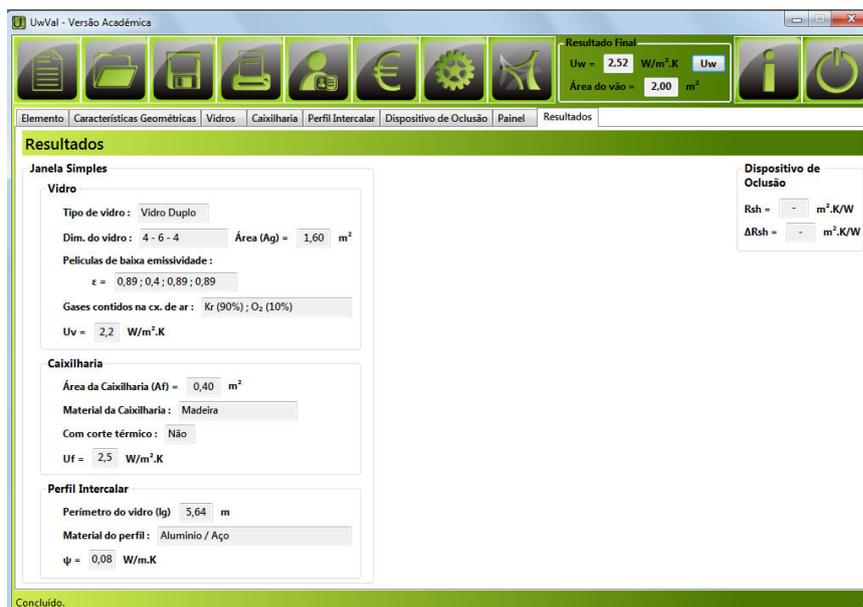


Figura 5.32 – Resultados – Janela simples madeira-metal

Quadro 5.1 – Método analítico e método do UwVal – caixilharia madeira-metal

Parâmetros	U_g (W/m ² .K)	U_f (W/m ² .K)	Ψ (W/m.K)	U_w (W/m ² .K)
Met. Analítico	2,25	2,43	0,08	2,51
UwVal	2,25	2,5	0,08	2,52

Observando os dois métodos, constata-se que os valores são muito similares. A diferença está na medição do U_f . No método analítico o valor de U_f foi lido directamente do gráfico da figura 3.6 do capítulo 3. No programa de cálculo, o valor de U_f foi obtido através de uma expressão determinada pelo método dos mínimos quadrados que se aproxima à curva da figura 3.6 do capítulo 3.

5.4.2. JANELA SIMPLES EM ALUMÍNIO COM VIDRO TRIPLO LOW-E

As características da janela aqui representada estão expostas no ponto 4.2 do capítulo 4.

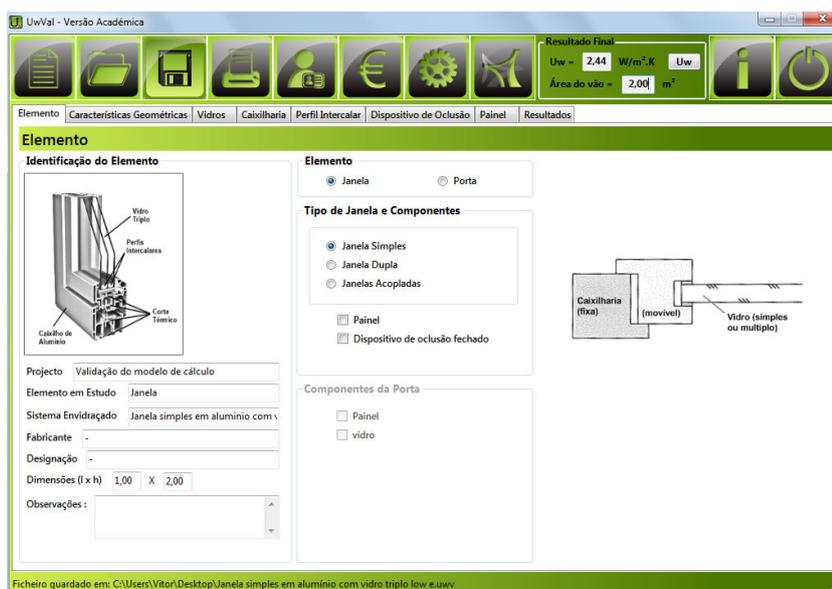


Figura 5.33 – Elemento em estudo – Janela simples em alumínio

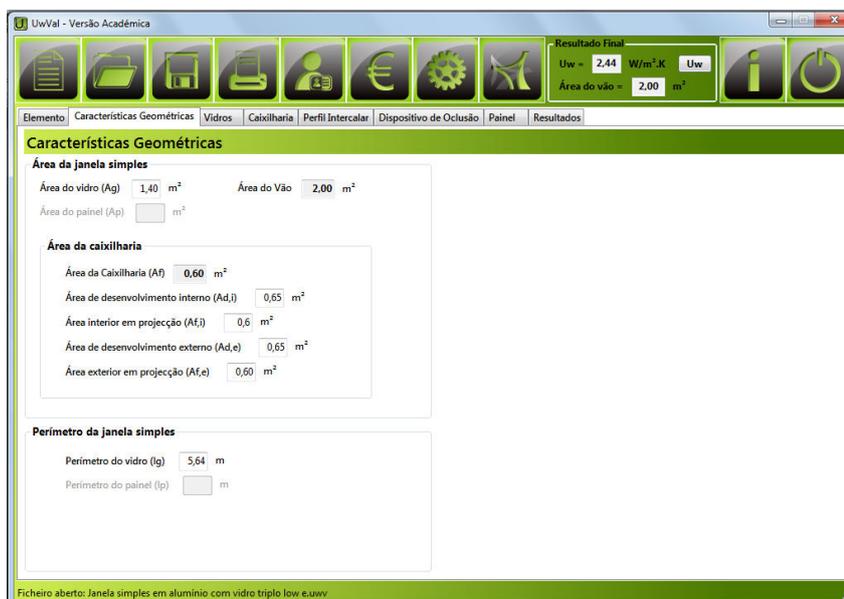


Figura 5.34 – Características Geométricas – Janela simples em alumínio

Neste ponto podemos fazer uma verificação do método utilizado pelo U_wVal para determinar o coeficiente de transmissão térmica de vidros triplos. A norma EN 673 recorre a um método iterativo para o calcular o U_g de vidros triplos. A janela em estudo é composta por um vidro triplo de espessura 4-12-4-12-4, contendo nas suas camadas intermédias o gás SF6 e na segunda camada existe uma película de baixa emissividade com $\epsilon_n = 0,087$. A norma EN 673 tem um exemplo de iteração para um vidro triplo com as mesmas características do vidro presente nesta janela. Através do programa de cálculo automático, o vidro triplo apresenta um coeficiente de transmissão térmica de $1,50W/m^2.K$, que está de acordo com o valor obtido no exemplo de iteração da norma EN 673.

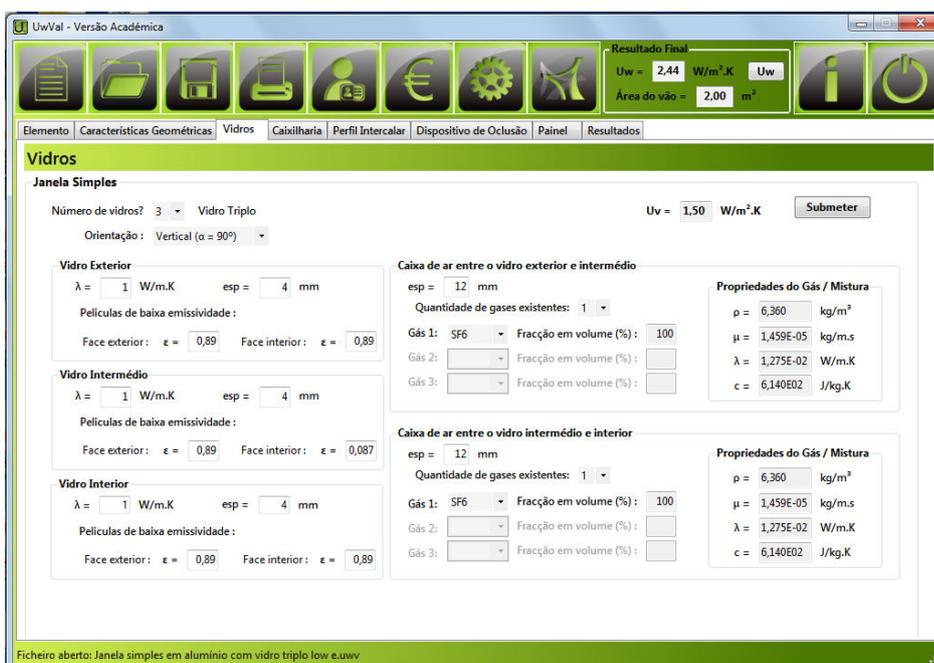


Figura 5.35 – Vidro – Janela simples em alumínio

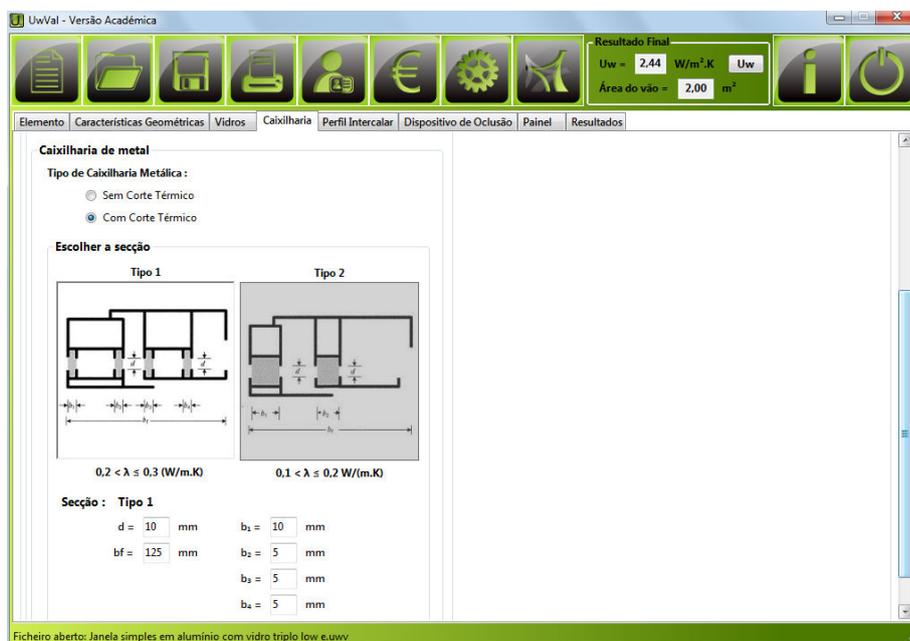


Figura 5.36 – Caixilharia – Janela simples em alumínio

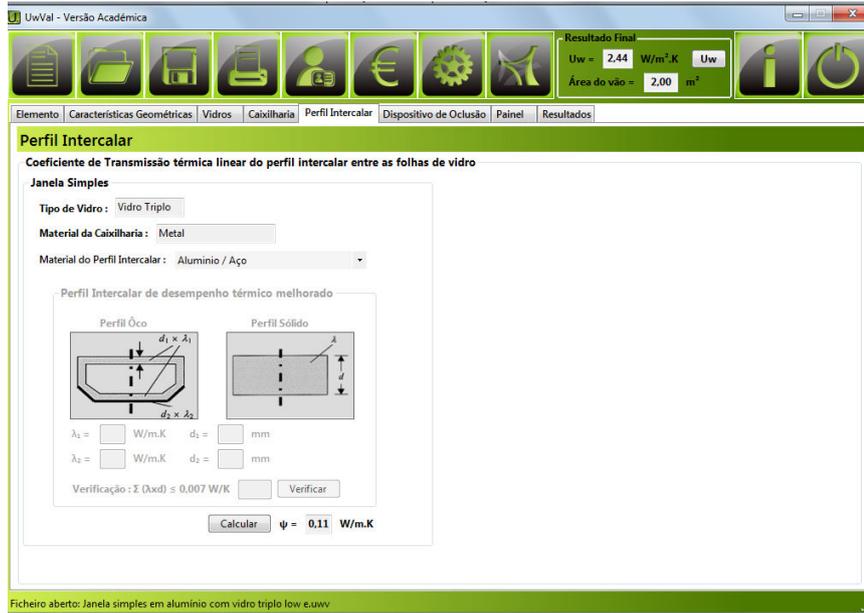


Figura 5.37 – Perfil Intercalar – Janela simples em alumínio

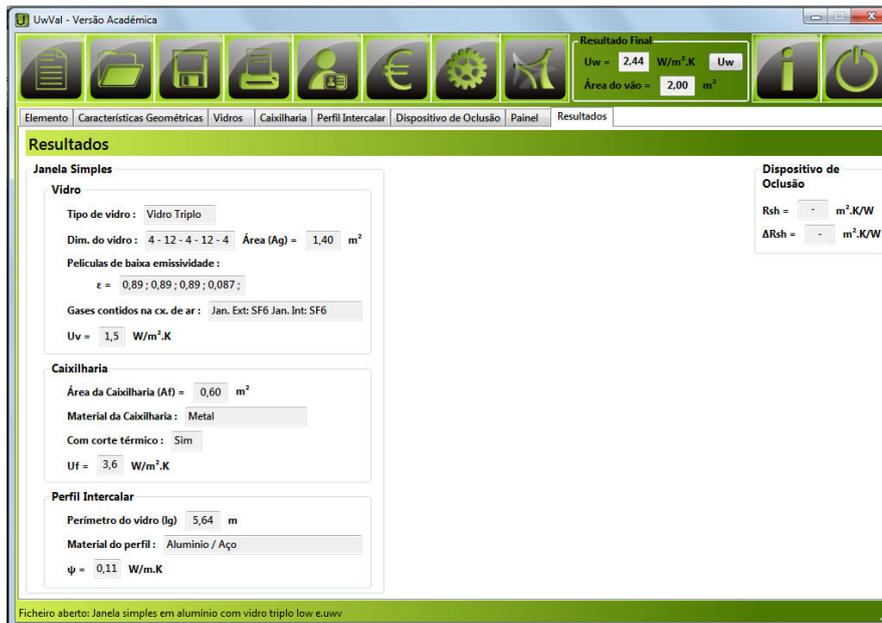


Figura 5.38 – Resultados – Janela simples em alumínio

Quadro 5.2 – Método analítico e método do UwVal – caixilharia alumínio

Parâmetros	U_g (W/m ² .K)	U_f (W/m ² .K)	Ψ (W/m.K)	U_w (W/m ² .K)
Met. Analítico	1,50	3,56	0,11	2,44
UwVal	1,50	3,6	0,11	2,44

Observando os dois métodos, constata-se novamente que os valores obtidos são muito similares.

No anexo B podem ser consultados os relatórios produzidos pelo U_w Val resultantes da aplicação destes dois exemplos.

5.5. ANÁLISE ECONÓMICA

O U_w Val possui um módulo que realiza uma análise económica comparativa aplicável a soluções de vãos envidraçados. Este módulo foi baseado no programa Optiterm.

5.5.1. CUSTO GLOBAL

O custo global é a soma de todos os encargos resultantes do investimento numa nova tecnologia. É dado pela soma do custo inicial, ou seja, o custo de aquisição do investimento e o seu respectivo custo de exploração.

$$C_g = C_0 + C_{exp} \quad (5.4)$$

Sendo, C_0 o custo inicial e C_{exp} o custo de exploração. [57]

O custo inicial, é o preço pago para adquirir nova tecnologia, neste caso, o novo envidraçado.

Aplicando a expressão acima à análise económica de soluções de vãos envidraçados, então, o custo inicial refere-se, por exemplo, ao custo de aquisição de uma janela e o custo de exploração refere-se aos gastos com o consumo de energia.

O custo de exploração num determinado ano ($C_{exp,n}$) é dado por: [57]

$$C_{exp,n} = \frac{Q \cdot C_{e,n}}{(1 + \alpha)^n} \quad (5.5)$$

Sendo α a taxa de capitalização e $C_{e,n}$ o custo da energia no ano n (€/kWh) e Q as perdas de energia (kWh),, neste caso, pelo vão envidraçado, dado para cada zona climática, pela expressão:

$$Q = \frac{n^\circ \text{ horas aquecimento} * \text{Graus} - \text{dias} * U_w}{1000} \quad (5.6)$$

O custo da energia em cada ano é dado por uma progressão geométrica: [57]

$$C_{e,n} = C_{e,i} (1 + \alpha)^n \quad (5.7)$$

Sendo $C_{e,i}$ o custo da energia inicial (€/kWh), no ano zero e n o ano.

O custo de exploração é obtido através da soma dos custos de exploração em cada ano durante o período total de exploração.

$$C_{exp} = \sum_{i=1}^n C_{exp,i} \quad (5.8)$$

Figura 5.39 – Módulo da Análise Económica

5.5.2. CÁLCULO DO PERÍODO DE RETORNO

O período de retorno corresponde ao número de anos, a contar do ano zero, a partir do qual existe benefício económico efectivo decorrente do investimento realizado. No caso dos envidraçados, significa, o período de retorno é o número de anos após o qual, o custo da substituição de uma solução de envidraçado por outra termicamente mais vantajosa, é ultrapassado pelo custo acumulado da energia dispendida com a anterior solução para aquecimento ou arrefecimento.

Matematicamente, o período de retorno é o tempo ao fim do qual a curva dos custos globais da solução inicial e a curva dos custos globais da solução nova (termicamente mais vantajosa) se interceptam.

5.5.3. APLICAÇÃO DA ANÁLISE ECONÓMICA E VALIDAÇÃO COM O OPTITERM

Considerando uma área envidraçada de 60m^2 da envolvente de um edifício, situado numa zona climática II, com janelas com um $U_w = 4,0\text{ W/m}^2\text{°C}$ (solução inicial), e outra com $U_w = 2,5\text{ W/m}^2\text{°C}$ (solução melhorada) cujo custo é de 50€/m^2 , o período de retorno, decorrente da substituição de uma solução por outra, vem determinado na figura seguinte.

6

CONCLUSÕES

O programa de cálculo automático (U_w Val) que foi desenvolvido representa um simples, mas importante, contributo para quantificar o fluxo de calor através dos vãos envidraçados.

Não se trata ainda de um simulador, no entanto o seu contributo é deveras importante pois permite estimar o coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados correntes, podendo também ser utilizado em conjunto com programas que quantificam o desempenho térmico de caixilharias, ampliando o seu campo de aplicação.

Este programa constitui o ponto de partida para o desenvolvimento de um modelo de cálculo mais complexo.

Para além destes factores, o U_w Val tem a grande mais-valia de permitir realizar uma análise económica comparativa entre as várias soluções de vãos envidraçados.

Como qualquer programa, o U_w Val apresenta algumas restrições, sendo elas, nomeadamente:

- Apenas permite calcular o coeficiente de transmissão térmica para as condições de fronteira normalizadas de temperatura, especificadas na norma EN 673;
- Limita-se apenas aos valores de coeficiente de transmissão térmica linear, tabelados na norma ISO 10077-1, não permitindo a introdução de valores que estejam de acordo com a norma ISO 10077-2.

Neste sentido, seriam importantes algumas medidas de melhoria. Para além da compensação dos pontos apresentados atrás, seria vantajosa a criação de uma base de dados que permitisse ao utilizador armazenar as características térmicas dos componentes de vãos envidraçados, para futuras utilizações.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jornal Oficial das Comunidades Europeias. Directiva 2002/91/CE
- [2] Veiga de Oliveira, E., Galhano, F., *Arquitectura Tradicional Portuguesa*, Dom Quixote, Lisboa, 1992
- [3] Ordem dos Arquitectos, *A arquitectura popular em Portugal*, Centro Editor Livreiro da Ordem dos arquitectos, Lisboa, 1988
- [4] Almeida, M., Silva, S., *Climatização e instalações das construções II – Térmica de edifícios*, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2006
- [5] Ventura, G., Santos, A., *Energia nos edifícios - Introdução na perspectiva da certificação energética*, Curso de formação. FEUP, DEMEGI, 2004
- [6] Instituto Português da Qualidade (IPQ) - *NP EN 12519:2008: Janelas e portas pedonais – vocabulário*. IPQ, Lisboa, 2008
- [7] CEN / ISO - *prEN ISO 10077-1: Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance. Part 1: General*. CEN, Brussels, 2004.
- [8] CEN / ISO - *EN ISO 10077-2: Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames*. CEN, Brussels, 2003.
- [9] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – *NP EN 673: Vidro na construção. Determinação do coeficiente de transmissão térmica, U. Método de cálculo*. IPQ, Lisboa, 2000.
- [10] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – *NP EN 673/A1: Vidro na construção. Determinação do coeficiente de transmissão térmica, U. Método de cálculo*. IPQ, Lisboa, 2000.
- [11] Santos, C.A. Pina dos, Matias, L. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, LNEC, Informação Técnica Edifícios ITE 50, Lisboa, 2006.
- [12] CEN – *EN 12524: Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values*. CEN, Brussels, 2000.
- [13] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – *NP EN 14351-1: Janelas e portas. Norma de produto, características de desempenho. Parte 1: Janelas e portas pedonais exteriores sem características de resistência ao fogo e/ou de estanquidade ao fumo*. IPQ, Lisboa, 2008.
- [14] Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., *Construire en verre*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001
- [15] Gustavsen, A., Jelle, B., *State-of-the-art highly insulating window frames – research and market review*, Project Report, Norwegian University of Science and Technology, 2007
- [16] Gustavsen, A., *Heat transfer in window frames with internal cavities*, Tese de doutoramento, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2001
- [17] Advances in glazing materials for Windows - National Renewable Energy Laboratory
- [18] Moret Rodrigues, A., Ferreira Gomes, J., *Reabilitação energética de vãos de janela*. PATORREB 2006 - 2º Encontro sobre patologia e reabilitação de edifícios, FEUP, Março de 2006, Porto.
- [19] *Janelas* - Apontamentos da Disciplina “Tecnologia das Construções”, FEUP

- [20] Giacomini, E., *Material O vidro*, Trabalho da Disciplina “Tecnologia de Fachadas”, FEUP, 2005
- [21] Vieira, J., *Sustentabilidade*, Trabalho da Disciplina “Tecnologia de Fachadas”, FEUP, 2005
- [22] Verdelho, S., *Caixilharia de alumínio*, Trabalho da Disciplina “Tecnologia de Fachadas”, FEUP, 2005
- [23] Bragança, L., *Textos de Apoio da Disciplina de Construções Processos II*, Departamento de Engenharia Civil – Universidade do Minho, 2000.
- [24] <http://cwdma.ca/lang/en/>
- [25] www.finstral.com, 20 de Fevereiro
- [26] <http://www.sunfold.com/item.php?itm=97>, 10 de Fevereiro
- [27] www.pion.sbfisica.org.br
- [28] <http://paredescardoso.blogspot.com/2007/12/janela-de-guilhotina.html>, 20 de Fevereiro
- [29] <http://www.archiproducts.com/>
- [30] <http://www.woodwindowalliance.com/>
- [31] www.efficientwindows.org
- [32] <http://www.saint-gobain-cetev.com.br/ovidro/vidro.pdf>
- [33] <http://www.glassonweb.com/glassmanual/topics/index/insulating.htm>
- [34] <http://www.extrusal.pt/aluminio.asp>
- [35] <http://www.nrc-cnrc.gc.ca>
- [36] <http://windows.lbl.gov/pub/selectingwindows/window.pdf>
- [37] <http://www.veka.com>
- [38] <http://www.strugal.com>
- [39] Kömmerling (2007), *Manual da janela*, <http://www.kommerling.com>, 12 de Outubro
- [40] <http://www.replacement-windows-n-shutters.com>
- [41] Rio, R., *Janelas para o mundo*, Arte & Construção – Revista Profissional da Construção, Maio de 2009, Lisboa
- [42] Sousa Coutinho, J., *Materiais de construção I - Madeiras*, Departamento de Engenharia Civil – Universidade do Porto, 1999, Porto
- [43] <http://www.macica.pt/mad-alu.html>
- [44] <http://www.materialicious.com/2009/05/serious-windows-with-fiberglass-frames-high-r-value.html>
- [45] <http://www.gercima.com.pt/CaixilhariaMadeira.htm>, 15 de Março
- [46] <http://www.panoramio.com/photo/3176914>, 15 de março
- [47] <http://inhabitat.com/sustainable-public-housing-by-foreign-office-architects/>, 15 de Março
- [48] Palhinha, M.(2009), *Sistemas de sombreamento em arquitectura: Proposta de um novo método de concepção e dimensionamento*, Dissertação de Mestrado em Arquitectura, IST
- [49] <http://dynastore-sa.com/>

- [50] <http://www.housing.sc.edu/westquadgo.asp>
- [51] http://continuingeducation.construction.com/article_print.php?L=48&C=252
- [52] <http://aintoo.com/>
- [53] <http://pt.saint-gobain-glass.com/b2c/default.asp>
- [54] Kinney, L., *Windows and insulating shutters*, Affordable Confort International Summit: Moving Existing Homes Toward Carbon Neutrality, (Synertech Systems Corporation), Julho de 2007
- [55] <http://www.pilkington.com>
- [56] Blanusa, P., *Comparison between ASHRAE and ISO thermal transmittance calculation methods*, Energy and Buildings, 2006
- [57] Freitas, Vasco P. *Vidros em Fachadas*. Ciclo de Formação "Construir em ", 2010, OARN, Porto.
- [58] www.dgge.pt
- [59] Decreto-Lei n. 80/2006, de 4 de Abril – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)
- [60] WROX Programmer to Programmer – *Beginning Microsoft Visual Basic 2008*, Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana, 2008
- [61] WROX Programmer to Programmer – *Professional Visual Basic 2008*, Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana, 2008
- [62] <http://vbtuga.blogspot.com/>

ANEXO A

Quadro A.1 – Características térmicas de materiais usados em edifícios [6]

Material group or application	Density ρ kg/m ³	Design thermal conductivity λ W/(m·K)	Specific heat capacity c_p J/(kg·K)	Water vapour resistance factor μ	
				dry	wet
Asphalt	2100	0,70	1000	50000	50000
Bitumen Pure	1050	0,17	1000	50000	50000
Felt / sheet	1100	0,23	1000	50000	50000
Concrete ^{a)}					
Medium density	1800	1,15	1000	100	60
	2000	1,35	1000	100	60
	2200	1,65	1000	120	70
High density	2400	2,00	1000	130	80
Reinforced (with 1 % of steel)	2300	2,3	1000	130	80
Reinforced (with 2 % of steel)	2400	2,5	1000	130	80
Floor coverings					
Rubber	1200	0,17	1400	10000	10000
Plastic	1700	0,25	1400	10000	10000
Underlay, cellular rubber or Plastic	270	0,10	1400	10000	10000
Underlay, felt	120	0,05	1300	20	15
Underlay, wool	200	0,06	1300	20	15
Underlay, cork	<200	0,05	1500	20	10
Tiles, cork	>400	0,065	1500	40	20
Carpet / textile flooring	200	0,06	1300	5	5
Linoleum	1200	0,17	1400	1000	800
Gases					
Air	1,23	0,025	1008	1	1
Carbon dioxide	1,95	0,014	820	1	1
Argon	1,70	0,017	519	1	1
Sulphur hexafluoride	6,36	0,013	614	1	1
Krypton	3,56	0,0090	245	1	1
Xenon	5,68	0,0054	160	1	1
Glass					
Soda lime (incl. "float glass")	2500	1,00	750	∞	∞
Quartz	2200	1,40	750	∞	∞
Glass mosaic	2000	1,20	750	∞	∞
Water					
Ice at -10 °C	920	2,30	2000		
Ice at 0 °C	900	2,20	2000		
Snow, freshly fallen (< 30 mm)	100	0,05	2000		
Snow, soft (30...70 mm)	200	0,12	2000		
Snow, slightly compacted (70...100 mm)	300	0,23	2000		
Snow, compacted (< 200 mm)	500	0,60	2000		
Water at 10 °C	1000	0,60	4190		
Water at 40 °C	990	0,63	4190		
Water at 80 °C	970	0,67	4190		
Metals					
Aluminium alloys	2800	160	880	∞	∞
Bronze	8700	65	380	∞	∞
Brass	8400	120	380	∞	∞
Copper	8900	380	380	∞	∞
Iron, cast	7500	50	450	∞	∞
Lead	11300	35	130	∞	∞
Steel	7800	50	450	∞	∞
Stainless steel	7900	17	460	∞	∞
Zinc	7200	110	380	∞	∞

Quadro A.1 – (Continuação)

Material group or application	Density	Design thermal conductivity	Specific heat capacity	Water vapour resistance factor	
	ρ kg/m ³	λ W/(m·K)	c_p J/(kg·K)	dry	wet
Plastics, solid					
Acrylic	1050	0,20	1500	10000	10000
Polycarbonates	1200	0,20	1200	5000	5000
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	2200	0,25	1000	10000	10000
Polyvinylchloride (PVC)	1390	0,17	900	50000	50000
Polymethylmethacrylate (PMMA)	1180	0,18	1500	50000	50000
Polyacetate	1410	0,30	1400	100000	100000
Polyamide (nylon)	1150	0,25	1600	50000	50000
Polyamide 6.6 with 25 % glass fibre	1450	0,30	1600	50000	50000
Polyethylene /polythene, high density	980	0,50	1800	100000	100000
Polyethylene/polythene, low density	920	0,33	2200	100000	100000
Polystyrene	1050	0,16	1300	100000	100000
Polypropylene	910	0,22	1800	10000	10000
Polypropylene with 25 % glass fibre	1200	0,25	1800	10000	10000
Polyurethane (PU)	1200	0,25	1800	6000	6000
Epoxy resin	1200	0,20	1400	10000	10000
Phenolic resin	1300	0,30	1700	100000	100000
Polyester resin	1400	0,19	1200	10000	10000
Rubber					
Natural	910	0,13	1100	10000	10000
Neoprene (polychloroprene)	1240	0,23	2140	10000	10000
Butyl, (isobutene), solid/hot melt	1200	0,24	1400	200000	200000
Foam rubber	60 - 80	0,06	1500	7000	7000
Hard rubber (ebonite), solid	1200	0,17	1400	∞	∞
Ethylene propylene diene monomer (EPDM)	1150	0,25	1000	6000	6000
Polyisobutylene	930	0,20	1100	10000	10000
Polysulfide	1700	0,40	1000	10000	10000
Butadiene	980	0,25	1000	100000	100000
Sealant materials, weather stripping and thermal breaks					
Silica gel (dessicant)	720	0,13	1000	∞	∞
Silicone, pure	1200	0,35	1000	5000	5000
Silicone, filled	1450	0,50	1000	5000	5000
Silicone foam	750	0,12	1000	10000	10000
Urethane/polyurethane (thermal break)	1300	0,21	1800	60	60
Polyvinylchloride (PVC) flexible, with 40 % softener	1200	0,14	1000	100000	100000
Elastomeric foam, flexible	60 - 80	0,05	1500	10000	10000
Polyurethane (PU) foam	70	0,05	1500	60	60
Polyethylene foam	70	0,05	2300	100	100
Gypsum					
Gypsum	600	0,18	1000	10	4
"	900	0,30	1000	10	4
"	1200	0,43	1000	10	4
"	1500	0,56	1000	10	4
Gypsum plasterboard ^(b)	900	0,25	1000	10	4
Plasters and renders					
Gypsum insulating plaster	600	0,18	1000	10	6
Gypsum plastering	1000	0,40	1000	10	6
"	1300	0,57	1000	10	6
Gypsum, sand	1600	0,80	1000	10	6
Lime, sand	1600	0,80	1000	10	6
Cement, sand	1800	1,00	1000	10	6
Soils					
Clay or silt	1200 - 1800	1,5	1670 - 2500	50	50
Sand and gravel	1700 - 2200	2,0	910 - 1180	50	50

Quadro A.1 – (Continuação)

Material group or application		Density ρ kg/m ³	Design thermal conductivity λ W/(m·K)	Specific heat capacity c_p J/(kg·K)	Water vapour resistance factor	
					dry μ	wet
Stone	Natural, crystalline rock	2800	3,5	1000	10000	10000
	Natural, sedimentary rock	2600	2,3	1000	250	200
	Natural, sedimentary rock, light	1500	0,85	1000	30	20
	Natural, porous, e.g. lava	1600	0,55	1000	20	15
	Basalt	2700 - 3000	3,5	1000	10000	10000
	Gneiss	2400 - 2700	3,5	1000	10000	10000
	Granite	2500 - 2700	2,8	1000	10000	10000
	Marble	2800	3,5	1000	10000	10000
	Slate	2000 - 2800	2,2	1000	1000	800
	Limestone, extra soft	1600	0,85	1000	30	20
	Limestone, soft	1800	1,1	1000	40	25
	Limestone, semi-hard	2000	1,4	1000	50	40
	Limestone, hard	2200	1,7	1000	200	150
	Limestone, extra hard	2600	2,3	1000	250	200
	Sandstone (silica)	2600	2,3	1000	40	30
	Natural pumice	400	0,12	1000	8	6
	Artificial stone	1750	1,3	1000	50	40
Tiles (roofing)						
	Clay	2000	1,0	800	40	30
	Concrete	2100	1,5	1000	100	60
Tiles (other)						
	Ceramic/porcelain	2300	1,3	840		∞
	Plastic	1000	0,20	1000	10000	10000
Timber ^(c)						
		500	0,13	1600	50	20
		700	0,18	1600	200	50
Wood-based panels ^(c)						
	Plywood ^(d)					
	"	300	0,09	1600	150	50
	"	500	0,13	1600	200	70
	"	700	0,17	1600	220	90
	"	1000	0,24	1600	250	110
	Cement-bonded particleboard	1200	0,23	1500	50	30
	Particleboard					
	"	300	0,10	1700	50	10
	"	600	0,14	1700	50	15
	"	900	0,18	1700	50	20
	Oriented strand board (OSB)	650	0,13	1700	50	30
	Fibreboard, including MDF ^(e)					
	"	250	0,07	1700	5	2
	"	400	0,10	1700	10	5
	"	600	0,14	1700	20	12
	"	800	0,18	1700	30	20

NOTE 1 For computational purposes the ∞ value may have to be replaced with an arbitrarily large value, e.g. 10^6 .

NOTE 2 Water vapour resistance factors are given as dry cup and wet cup values, see prEN ISO 12572:1999, Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties.

(a) The density for concrete is the dry density.

(b) The thermal conductivity includes the effect of the paper liners.

(c) The density for timber and wood-based products is the density in equilibrium with 20 °C and 65 % relative humidity.

(d) As an interim measure and until sufficient significant data for solid wood panels (SWP) and laminated veneer lumber (LVL) are available, the values given for plywood may be used.

(e) MDF: Medium Density Fibreboard, dry process.

ANEXO B

Elemento

Projecto: Validação do modelo de cálculo

Elemento: Janela

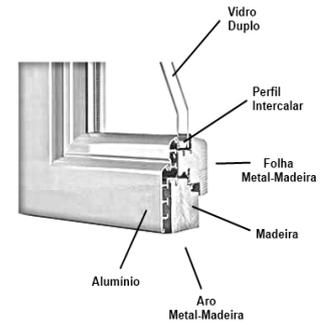
Sistema Envidraçado: Janela simples madeira-metal

Fabricante: -

Designação: -

Dimensões: 2 x 1 (m²)

Observações: Vidro Low-E



Características Térmicas

Janela Simples

- Vidro(s)

Tipo: Vidro Duplo	Area: 1.60 m ²	Tipo: -	Area: 0.00 m ²
Espessuras: 4 - 6 - 4		Espessuras: -	
DY`jW`Ug`ck` . 0,89 ; 0,4 ; 0,89 ; 0,89		DY`jW`Ug`ck` . -	
Gases: ?f`f`\$i` E/C` f`\$i` E		Gases: -	
Uv = 2.20 W/m ² .K		Uv = 0.00 W/m ² .K	

- Caixilharia(s)

Material: Madeira	Area: 0.40 m ²	Material: -	Area: 0.00 m ²
Corte térmico: Não		Corte térmico: -	
Uf = 2.50W/m ² .K		Uf = 0.00 W/m ² .K	

- Perfil(s) Intercalar(s)

Material: Alumínio / Aço		Material: -	
Ig: 5.64 m	1 0.08 W/m.K	Ig: 0.00 m	1 0.00 W/m.K

- Dispositivo de oclusão

Rsh = 0.00 m ² .K/W	Permeab.: -	ÃFg\` 1 0.00 m ² .K/W
--------------------------------	-------------	----------------------------------

- Painel(s)

Material: -		Material: -	
Up = 0.00 W/m ² .K		Up = 0.00 W/m ² .K	
Espaçador: -	1 0.00 W/m.K	Espaçador: -	1 0.00 W/m.K

Elemento

Projecto: Validação do modelo de cálculo

Elemento: Janela

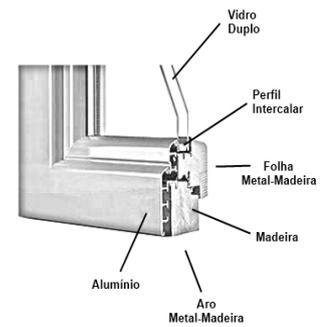
Sistema Envidraçado: Janela simples madeira-metal

Fabricante: -

Designação: -

Dimensões: 2 x 1 (m²)

Observações: Vidro Low-E



Características Térmicas

Janela Simples

- Coeficiente de transmissão térmica da janela

Resultado: $U_w = 2.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Técnico Responsável

Técnico responsável: xxxxxxxxxxxx

Telemóvel: 961111111

Elemento

Projecto: Validação do modelo de cálculo

Elemento: Janela

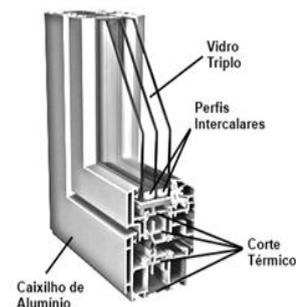
Sistema Envidraçado: Janela simples em alumínio com vidro tri

Fabricante: -

Designação: -

Dimensões: 1,00 x 2,00 (m²)

Observações:



Características Térmicas

Janela Simples

- Vidro(s)

Tipo: Vidro Triplo	Area: 1.40 m ²	Tipo: -	Area: 0.00 m ²
Espessuras: 4 - 12 - 4 - 12 - 4		Espessuras: -	
DY`jW`Ug`ck` . : 0,89 ; 0,89 ; 0,89 ; 0,087 ; 0,89		DY`jW`Ug`ck` . : -	
Gases: Jan. Ext: SF6 Jan. Int: SF6		Gases: -	
Uv = 1.50 W/m ² .K		Uv = 0.00 W/m ² .K	

- Caixilharia(s)

Material: Metal	Area: 0.60 m ²	Material: -	Area: 0.00 m ²
Corte térmico: Sim		Corte térmico: -	
Uf = 3.60W/m ² .K		Uf = 0.00 W/m ² .K	

- Perfil(s) Intercalar(s)

Material: Alumínio / Aço		Material: -	
Ig: 5.64 m	Uf 0.11 W/m.K	Ig: 0.00 m	Uf 0.00 W/m.K

- Dispositivo de oclusão

Rsh = 0.00 m ² .K/W	Permeab.: -	Uf 0.00 m ² .K/W
--------------------------------	-------------	-----------------------------

- Painel(s)

Material: -		Material: -	
Up = 0.00 W/m ² .K		Up = 0.00 W/m ² .K	
Espaçador: -	Uf 0.00 W/m.K	Espaçador: -	Uf 0.00 W/m.K

Elemento

Projecto: Validação do modelo de cálculo

Elemento: Janela

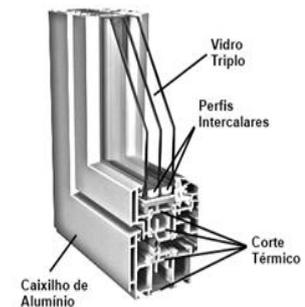
Sistema Envidraçado: Janela simples em alumínio com vidro tri

Fabricante: -

Designação: -

Dimensões: 1,00 x 2,00 (m²)

Observações:



Características Térmicas

Janela Simples

- Coeficiente de transmissão térmica da janela

Resultado: $U_w = 2.4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Técnico Responsável

Técnico responsável: xxxxxxxxxxxx

Telemóvel: 961111111

ANEXO C



Melhoria De Desempenho Energético De Edifícios Existentes

Dados Gerais do Elemento

Horas de aquecimento : 24	Taxa de capitalização (%): 3.00
Zona: I1 Graus-Dias: 1610	Taxa de variação da energia (%): 5.00
Área do elemento (m ²): 60.0	Custo actual da energia (€/kWh): 0.11
Ano Zero: 2011	Custo de investimento (€/m ²) : 50.00
intervalo de tempo (anos): 20	

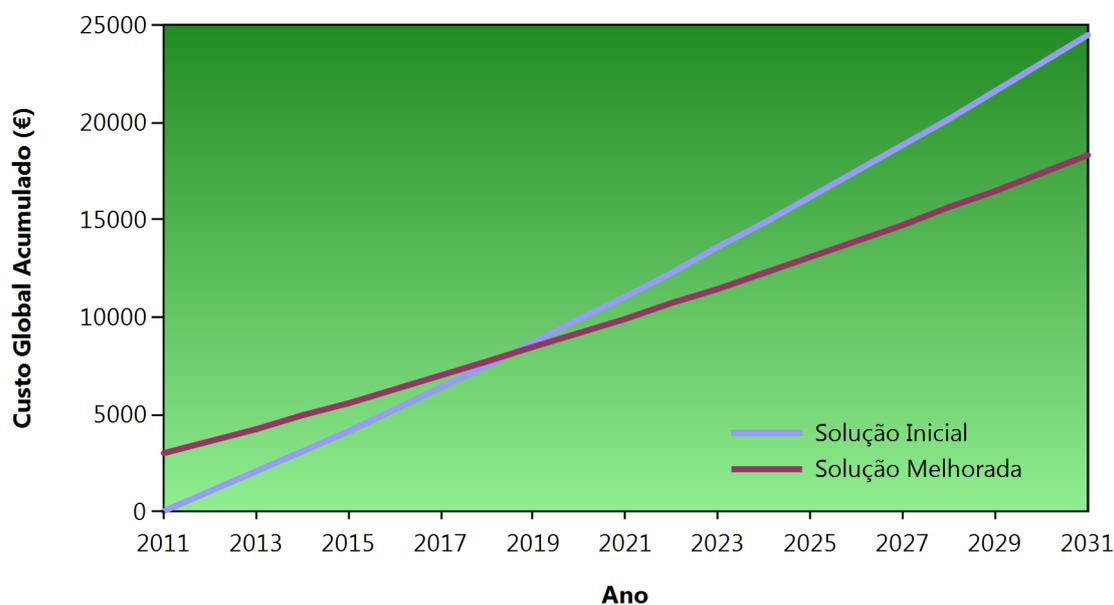
Solução Inicial

U _i (W/m ² .°C) : 4.00
Nível de qualidade: N1
Energia (kWh/m ²): 155
Energia (kWh): 9274

Solução Melhorada

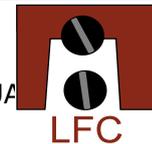
U _f (W/m ² .°C) : 2.50
Nível de qualidade: N3
Energia (kWh/m ²): 97
Energia (kWh): 5796

Custos Globais Acumulados



Avaliação Energética e Económica da Medida de Melhoria

U _f (W/m ² .°C)	Nível de Qualidade	Poupança Anual (€)	Custo de Investimento (€)	Período de retorno (anos)	Benefício Económico Efectivo (€)		
					5 anos	10 anos	15 anos
2.5	N3	391	3000	8	0	1148	3541
Redução Anual da Factura Energética		Custo Estimado de Investimento		Período de Retorno do Investimento			
				000			



DADOS GERAIS DA FRACÇÃO AUTÓNOMA E PRESSUPOSTOS ADMITIDOS

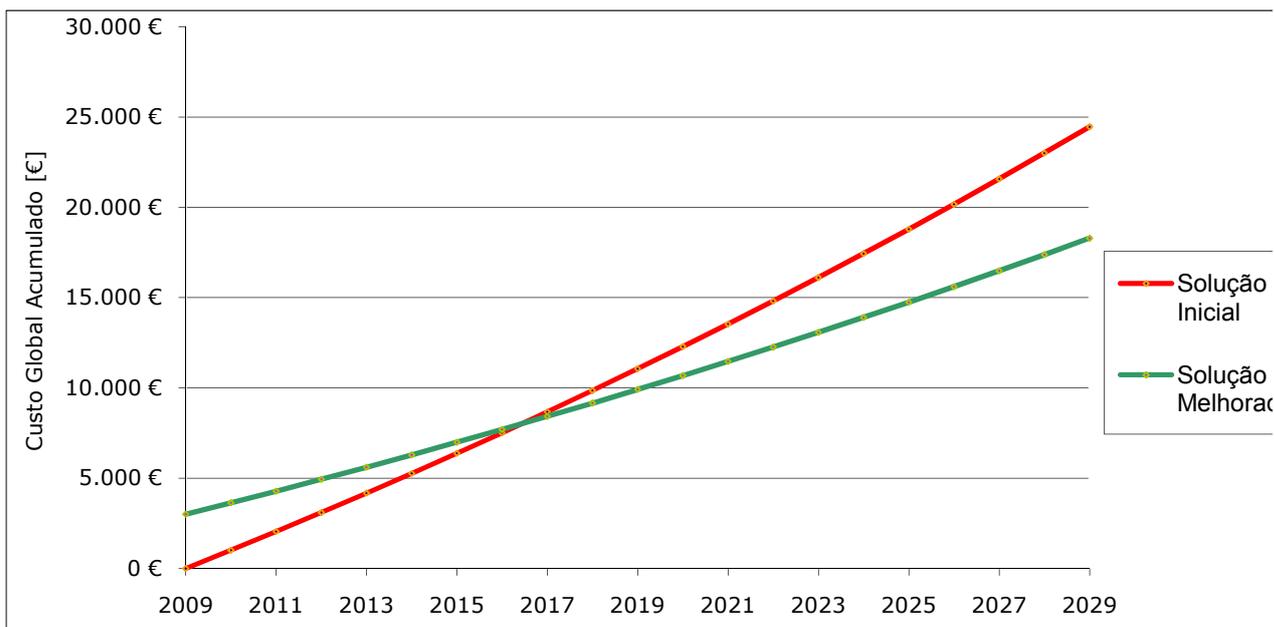
Horas de Aquecimento:	24	Taxa de capitalização (α):	3,00%
Zona/Graus-dias:	11	Varição da energia (α'):	5,00%
Tipo de elemento:	Vão Envidraçado	Custo actual da energia [€/kWh]:	0,11
Área do elemento [m ²]:	60	Custo de investimento [€/m ²]:	50

SOLUÇÃO INICIAL

Nível/Ui [W/(m ² .°C)]:	N1	4,00
Qi [kWh/m ²]:		155
Qi [kWh]:		9274

SOLUÇÃO MELHORADA

Nível/Uf [W/(m ² .°C)]:	N3	2,50
Qf [kWh/m ²]:		97
Qf [kWh]:		5796



AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E ECONÓMICA DA MEDIDA DE MELHORIA

U [W/m ² .°C]	Nível de Qualidade	Poupança Anual [€]	Custo de Investimento [€]	Período de retorno [anos]	Benefício económico efectivo [€]		
					5 anos	10 anos	15 anos
2,5	N3	391	3000	8	-	1148	3541

Sugestões de medidas de melhoria (implementação não obrigatória)	Redução anual da factura energética	Custo estimado de investimento	Período de retorno do investimento
1 Aplicação de isolamento térmico sobre a laje de esteira de cobertura em desvão	⊗⊗	⊕⊕⊕	⊗⊗⊗

Coefficiente de transmissão térmico de referência**Uref [W/m².°C]**

Uref	I1	I2	I3	RA
Parede Exterior	0,70	0,60	0,50	1,40
Cobertura	0,50	0,45	0,40	0,80
Pavimento Exterior	0,50	0,45	0,40	0,80
Parede Interior	1,40	1,20	1,00	2,00
Pavimento Interior	1,00	0,90	0,80	1,25
Vão Envidraçado	4,30	3,30	3,30	4,30

Níveis de Qualidade

Nível	Limites de U
N0	U > Uref
N1	U = Uref
N2	U = 0,75*Uref
N3	U = 0,60*Uref
N4	U = 0,50*Uref

Redução anual da factura energética**(€)**

entre 0 e 100	⊗
entre 100 e 500	⊗⊗
entre 500 e 1000	⊗⊗⊗
superior a 1000	⊗⊗⊗⊗

Custo estimado de investimento (€)

entre 0 e 200	⊕
entre 200 e 1000	⊕⊕
entre 1000 e 5000	⊕⊕⊕
superior a 5000	⊕⊕⊕⊕

Período de retorno do investimento**(anos)**

entre 0 e 5	∅∅∅∅
entre 5 e 10	∅∅∅
entre 10 e 15	∅∅
superior a 15	∅