



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Ana Catarina Pinto Gouveia

ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO ACÚSTICA E  
TÉRMICA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS DESTINADOS  
À ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Viera Simões e pela Professora Doutora Julieta Maria Pires António e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2021



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

Ana Catarina Pinto Gouveia

# **ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO ACÚSTICA E TÉRMICA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS DESTINADOS À ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS**

## **STUDY ON THE ACOUSTIC AND THERMAL OPTIMIZATION OF GLAZING SOLUTIONS FOR BUILDING ENVELOPES**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Viera Simões e pela Professora Doutora Julieta Maria Pires António

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer  
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões  
que possam surgir

Coimbra, 17 de setembro de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Após 5 longos anos de trabalho seria impossível não relembrar aqueles que sempre me apoiaram e me acompanharam nesta jornada tão importante da minha vida. Devo imenso à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã que abdicaram de muitos momentos comigo para que sempre tivesse tudo o que precisava... Aos meus amigos, nem sei por onde começar... Muitos para além de amigos foram companheiros e, agradeço a compreensão daqueles de quem me afastei e ainda assim continuam comigo, o mais maravilhoso é ver que em cada reencontro nada mudou e é como se todos os dias continuássemos juntos. Os meus colegas e companheiros de curso, que se tornaram amigos, não porque tinha de ser, mas porque são pessoas incríveis sem as quais não poderia ter feito esta jornada de risadas, festas, copos e estudo intensivo. Obrigada ao André, que para além de amigo e namorado era a pessoa que me aturava nos desabafos, crises existenciais e estava lá em todos os momentos, bons ou maus e, desde já desculpa por ser tão difícil de aturar e mesmo assim nunca te cansaste.

Tenho que agradecer aos meus orientadores, o professor Nuno Albino Simões e a professora Julieta António, que para além deste tempo difícil em que nem sempre era possível reunir, foram impecáveis e me forneceram o apoio e o material que era necessário para a realização de uma das última etapas, a fundamental, para me lançar para o futuro profissional.

Agradeço em especial ao DEC e à FCTUC pelos anos incríveis e condições de trabalho que nunca me faltaram!

Esta investigação teve o suporte do projeto EvoSlide (POCI-01-0247-FEDER-033658) financiado pelo Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), com o suporte Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

## RESUMO

O comportamento acústico e térmico da envolvente de edifícios pode ter um impacto significativo na saúde dos ocupantes. A Organização Mundial de Saúde tem vindo a alertar para a relação de algumas doenças, nomeadamente cardiovasculares, e o ruído. Está também provado haver uma relação entre a mortalidade e a falta de conforto térmico dos edifícios, demonstrado pela sazonalidade da mortalidade, função do clima e da falta de condições das habitações.

Como os vãos envidraçados são dos elementos mais preponderantes no conforto acústico e térmico dos edifícios, torna-se importante encontrar soluções envidraçadas que garantam os melhores níveis de conforto ambiental interior dos edifícios.

Os vãos envidraçados permitem a passagem de calor, luz natural e sons provenientes de várias fontes de emissão para o interior dos edifícios, todas estas questões podem ser melhoradas através da alteração de alguns materiais constituintes da solução envidraçada. No entanto, ao melhorar uma das características, podemos estar a agravar outra, o que torna difícil a tarefa de garantir a solução com desempenho ótimo.

Com o intuito de compreender o impacto das soluções envidraçadas no desempenho térmico e acústico, tendo em vista o estabelecimento de uma relação entre ambos, foram recolhidos dados dos parâmetros térmicos e acústicos com maior influência no desempenho das soluções. Para proceder à análise e recolha destes parâmetros efetuou-se uma revisão bibliográfica detalhada, recorreu-se a normas, regulamentos da legislação portuguesa, ferramentas fornecidas pelos fabricantes, ensaios laboratoriais e cálculos.

Com base na informação recolhida foi possível fazer uma análise crítica do impacto da alteração de componentes. Esta análise serviu de base à fase seguinte, em que se procedeu a uma reflexão sobre regras de dimensionamento de janelas, tendo sempre em conta a necessidade de cumprir os requisitos mínimos exigidos na legislação portuguesa.

Complementou-se, ainda, a observação das regras de especificação preconizadas na norma portuguesa NP 4517:2014. Com o intuito de verificar a sua aplicabilidade, foram apresentados exemplos de aplicação da mesma nas vertentes de desempenho térmico ( $U_w$  e  $g$ ) e de desempenho acústico ( $R_w$ ).

**Palavras-chave:** Vãos envidraçados; Isolamento sonoro; Isolamento térmico, Critérios de seleção; Requisitos.

## ABSTRACT

The acoustic and thermal behavior of building surroundings can have significant impact on resident's health. The World Health Organization has been warning about the particular connection between cardiovascular diseases and noise. It is also proven the existence of a relation between mortality and the absence of thermal comfort of buildings, demonstrated by the mortality seasonality, climate and lack of living conditions.

It is particularly important to look for glass solutions that ensure environmental comfort inside buildings such as glazed openings, which are among the most predominant elements on acoustic and thermal comfort of buildings.

Glazed openings allow the passage of heat, natural light and sounds from different emission sources, inside buildings. All of these aspects can be improved by altering the composition of the glazing solution. However, improving one feature can exacerbate another, which makes the task of ensuring an optimal performance solution even more difficult.

In order to comprehend the impact of glazed solutions on thermal and acoustic performance, aiming the establishment of a relation between both, data was collected from thermal and acoustic parameters with major influence on the performance of the mentioned solutions. To examine and collect these parameters, a detailed revision of literature was made by turning to standards, tools supplied by manufactures, laboratory experiments and calculations.

With the gathered information, it was possible to carry out a critical analysis of the component alteration impact. This stage served as a base to the next step in which was made a reflection on window sizing rules, considering the necessity to comply with the minimum requirements present on the current Portuguese legislation.

It was further complemented the observation of specification rules recommended in the Portuguese standard NP 4517: 2014. In order to verify it's applicability, several application of the standard examples were presented in the thermal performance ( $U_w$  e  $g$ ) and acoustic performance fields ( $R_w$ ).

**Keywords:** Glazing solutions; Sound insulation; Thermal insulation; Selection criteria; Requirements.

## ÍNDICE

|   |     |
|---|-----|
| Agradecimentos .....  | i   |
| Resumo .....  | ii  |
| Abstract.....   | iii |
| Índice .....  | iv  |
| Índice de Figuras .....   | vii |
| Índice de Quadros .....   | ix  |
| Simbologia.....   | xi  |
| 1 Introdução.....   | 1   |
| 1.1 Enquadramento e Motivação .....   | 1   |
| 1.2 Objetivos.....  | 1   |
| 1.3 Estrutura da dissertação .....  | 2   |
| 2 Soluções envidraçadas.....  | 5   |
| 2.1 Introdução .....  | 5   |
| 2.2 Tipos de vidro .....  | 5   |
| 2.3 Tipos de janela .....   | 6   |
| 2.3.1 Tipo de perfil .....  | 6   |
| 2.3.2 Tipo de abertura.....   | 8   |
| 2.4 Outros componentes das janelas .....                                      | 9   |
| 2.4.1 Ferragens .....   | 9   |
| 2.4.2 Vedantes .....  | 9   |
| 2.4.3 Espaçadores .....   | 10  |
| 2.4.4 Películas.....  | 10  |
| 2.4.5 Grelhas de ventilação.....  | 10  |
| 3 Parâmetros térmicos e acústicos.....  | 12  |
| 3.1 Introdução .....  | 12  |
| 3.2 Métodos de avaliação.....   | 12  |
| 3.2.1 Coeficiente de transmissão térmica do vidro, <b>U<sub>g</sub></b> ..... | 12  |

---

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2.2   | Coeficiente de transmissão térmica da Janela, <b><i>U<sub>w</sub></i></b> .....     | 13 |
| 3.2.3   | Fator Solar, <b><i>g</i></b> .....  | 14 |
| 3.2.4   | Índice de redução sonora ponderado, <b><i>R<sub>w</sub></i></b> .....               | 15 |
| 3.3     | Ferramentas com características de vidros .....                                     | 16 |
| 4       | Levantamento de fatores com maior influência no desempenho térmico e acústico ..... | 21 |
| 4.1     | Introdução .....  | 21 |
| 4.2     | Fatores de influência .....   | 21 |
| 4.2.1   | Isolamento térmico de janelas .....   | 24 |
| 4.2.1.1 | Componentes dos envidraçados .....  | 24 |
| 4.2.1.2 | Influência do caixilho .....  | 27 |
| 4.2.1.3 | Espessura da caixa de gás.....  | 29 |
| 4.2.2   | Isolamento sonoro de janelas.....   | 30 |
| 4.2.2.1 | Influência de frinchas e aberturas.....   | 30 |
| 4.2.3   | Isolamento sonoro de fachadas.....  | 34 |
| 4.2.3.1 | Influência das janelas no isolamento sonoro das fachadas .....                      | 34 |
| 4.2.3.2 | Influência do caixilho no desempenho de fachadas-cortina de vidro e alumínio .....  | 36 |
| 4.3     | Desempenho térmico versus acústico de janelas .....                                 | 38 |
| 5       | Análise crítica do impacto de alteração de componentes.....                         | 40 |
| 5.1     | Introdução .....  | 40 |
| 5.2     | <b><i>U<sub>g</sub></i></b> das soluções de vidros .....                            | 41 |
| 5.2.1   | Ferramenta <i>CalumenLive</i> .....   | 41 |
| 5.2.2   | Ferramenta <i>Guardian Glass Analytys</i> .....                                     | 44 |
| 5.3     | <b><i>U<sub>w</sub></i></b> de soluções de janelas .....                            | 45 |
| 5.4     | Soluções de vidros, <b><i>R<sub>w</sub></i></b> .....                               | 47 |
| 5.4.1   | Ferramenta <i>CalumenLive</i> .....   | 47 |
| 5.4.2   | Ferramenta <i>Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0</i> .....                       | 48 |
| 5.5     | Soluções de janelas, <b><i>R<sub>w</sub></i></b> .....                              | 51 |
| 5.6     | Análise qualitativa dos resultados.....   | 55 |
| 6       | Reflexão sobre regras de dimensionamento de janelas.....                            | 57 |

---

---

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 6.1     | Introdução .....  | 57  |
| 6.2     | Dimensionamento de janelas .....  | 57  |
| 6.3     | Regras de especificação padronizadas na Norma NP 4517:2014.....                                 | 59  |
| 6.3.1   | Coeficiente de transmissão térmica, <b><i>U<sub>w</sub></i></b> .....                           | 59  |
| 6.3.1.1 | Edifícios de habitação .....  | 59  |
| 6.3.1.2 | Edifícios de comércio e serviços.....   | 61  |
| 6.3.2   | Fator solar, <b><i>g</i></b> .....  | 62  |
| 6.3.3   | Índice de isolamento sonoro, <b><i>R<sub>w</sub></i></b> .....                                  | 63  |
| 6.4     | Exemplo de aplicação .....  | 64  |
| 6.4.1   | Exemplo de aplicação 1 .....  | 64  |
| 6.4.2   | Exemplo de aplicação 2 .....  | 66  |
| 6.4.3   | Exemplo de aplicação 3 .....  | 67  |
| 7       | Considerações finais.....   | 70  |
| 7.1     | Trabalhos futuros .....   | 71  |
|         | Referências Bibliográficas.....   | 73  |
|         | Anexo A – Transmitância térmica das janelas (ISO 10077-1:2017).....                             | A-1 |
|         | Anexo B.....  | B-1 |
|         | B.1 Transmitância visível, <b><i>τ<sub>v</sub></i></b> .....                                    | B-1 |
|         | B.2 Refletância visível, <b><i>ρ<sub>v</sub></i></b> .....                                      | B-2 |
|         | B.3 Transmitância solar direta, <b><i>τ<sub>e</sub></i></b> .....                               | B-3 |
|         | B.4 Refletância solar direta, <b><i>ρ<sub>e</sub></i></b> .....                                 | B-4 |
|         | B.5 Absorção solar direta, <b><i>α<sub>e</sub></i></b> .....                                    | B-4 |
|         | B.6 Fator de transmissão secundária de calor para o interior, <b><i>q<sub>i</sub></i></b> ..... | B-5 |
|         | Anexo C.....  | C-1 |
|         | C.1 Distribuição espectral relativa normalizada – ISO 9050.....                                 | C-1 |
|         | C.2 Distribuição espectral relativa da radiação solar global.....                               | C-2 |

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Exemplo de um dispositivo de ventilação regulável por condições higrotérmicas.<br>.....   | 11 |
| Figura 3.1 – Representação esquemática dos vidros representativos da ferramenta CalumenLive; (a) vidro simples; (b) vidro laminado; (c) vidro duplo; (d) vidro duplo com um laminado; (e) vidro duplo com dois laminados; (f) vidro triplo; (g) vidro triplo com um laminado; (h) vidro triplo com dois laminados; (i) vidro triplo com três laminados. ....                   | 20 |
| Figura 3.2 – Representação esquemática dos vidros representativos das ferramentas Guardian Glass Analytics e Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0; (a) vidro simples; (b) vidro laminado; (c) vidro duplo; (d) vidro duplo com um laminado; (e) vidro duplo com dois laminados; (f) vidro triplo; (g) vidro triplo com um laminado; (h) vidro triplo com dois laminados. .... | 20 |
| Figura 4.1 – Opções de caixilhos selecionados; (a) alumínio; (b) PVC; (c) madeira, adaptado de [36]. ....  | 25 |
| Figura 4.2 – Coeficiente de transmissão térmica da janela em função da dimensão do caixilho, adaptado de [37]. ....  | 29 |
| Figura 4.3 – Valores de $Uw$ em função da espessura da caixa de gás. ....  | 30 |
| Figura 4.4 – Configurações das janelas do teste A, adaptado de [42]. ....  | 31 |
| Figura 4.5 – Índice de redução sonora das janelas do teste A, para a configuração padrão de vedantes, adaptado de [42]. ....   | 32 |
| Figura 4.6 – Diferenças da redução sonora: (a) solução vedante I; (b) solução vedante II, adaptado de [42]. ....   | 32 |
| Figura 4.7 – Índice de redução sonora do teste B, para janelas fechadas e inclinadas, adaptado de [42]. ....   | 33 |
| Figura 4.8 – Diferença de nível sonoro entre o exterior e as 13 posições do microfone no interior. ....  | 34 |
| Figura 4.9 – Níveis de pressão sonora para as diferentes configurações: (a) configuração 1, (b) configuração 2, (c) configuração 3, adaptado de [38]. ....   | 35 |
| Figura 4.10 – Comparação entre índice de redução sonora para um vidro isolado e um laminado, com e sem o caixilho, adaptado de [39]. ....  | 37 |
| Figura 4.11 – Índice de redução sonora ponderado para várias espessuras do caixilho, adaptado de [39]. ....  | 37 |
| Figura 4.12 – Representação esquemática da janela. Vista frontal, vidros simples, duplos e triplo; adaptado de [15]. ....  | 38 |
| Figura 6.1 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas com área superior a 20% da área do pavimento, [51]. ....  | 60 |
| Figura 6.2 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas com área diferente de 30% da área da fachada, para edifícios de comércio e serviços, [51]. ....   | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 6.3 – Valor do coeficiente de transmissão térmica atendendo à informação prestada sobre o edifício e o sistema envidraçado..... | 65 |
| Figura 6.4 – Valor do coeficiente de transmissão térmica atendendo à informação prestada sobre o edifício e o sistema envidraçado..... | 67 |

## ÍNDICE DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 2.1 – Tipos de vidro relevantes, adaptado de [8] e [9].   | 6  |
| Quadro 2.2 – Características da solução envidraçada, adaptado de [8] e [9].  | 6  |
| Quadro 2.3 – Tipos de perfil [12].   | 7  |
| Quadro 2.4 – Características relevantes dos materiais mais utilizados em caixilharia.                                      | 7  |
| Quadro 2.5 – Tipos de janela, caracterização e representação ilustrativa.  | 8  |
| Quadro 2.6 – Síntese de vantagens e desvantagens associadas a cada tipo de espaçador.                                      | 10 |
| Quadro 2.7 – Componente adicionais dos vidros melhorados [9], [19] e [17].   | 10 |
| Quadro 3.1 – Restrições ao uso de valores tabelados para obtenção do $U_w$ , adaptado de [20].                             | 13 |
| Quadro 3.2 – Resumo dos dados extraídos de cada ferramenta.  | 18 |
| Quadro 3.3 – Restantes dados fornecidos pelas ferramentas.   | 18 |
| Quadro 3.4 – Composição vidros utilizados nas três ferramentas.  | 19 |
| Quadro 3.5 – Output de dados essenciais para a análise térmica e acústica, ferramenta CalumenLive.                         | 19 |
| Quadro 3.6 – Output de dados essenciais para a análise térmica, ferramenta Guardian Glass Analytics.                       | 19 |
| Quadro 3.7 – Output de dados essenciais para a análise acústica, ferramenta <i>Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0</i> . | 19 |
| Quadro 4.1 – Identificação das componentes/variáveis estudadas e principais conclusões.                                    | 22 |
| Quadro 4.1 – Identificação das componentes/variáveis estudadas e principais conclusões (continuação).                      | 23 |
| Quadro 4.2 – Avaliação qualitativa do impacto das componentes/variáveis no comportamento térmico e acústico.               | 24 |
| Quadro 4.3 – Soluções envidraçadas alternativas caracterizadas por propriedades térmicas, adaptado de [36].                | 25 |
| Quadro 4.4 – Massa das componentes por 1,82 m <sup>2</sup> de área da janela, adaptado de [36].                            | 26 |
| Quadro 4.5 – Valores de $U_w$ das soluções envidraçadas selecionadas para cada tipo de caixilho, adaptado de [36].         | 26 |
| Quadro 4.6 – Condições limite de aplicação.  | 27 |
| Quadro 4.7 – Influência da espessura da caixa de gás no desempenho térmico.  | 29 |
| Quadro 4.9 – Configurações das janelas em estudo, adaptado de [42].  | 31 |
| Quadro 4.10 – Índice de redução sonora ponderado das janelas para os ensaios A e B, adaptado de [42].                      | 33 |
| Quadro 4.11 – Configurações de janela ensaiadas e representação esquemática, adaptado de [38].                             | 35 |
| Quadro 4.12 – Descrição e resultados das janelas estudadas, adaptado de [15].  | 39 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 5.1 – Caracterização das soluções envidraçadas .....   | 40  |
| Quadro 5.4 – Valores de $U_w$ para as soluções envidraçadas em estudo.....  | 46  |
| Quadro 5.5 – Valores de $R_w$ possíveis de extrair do <i>CalumenLive</i> . .....  | 47  |
| Quadro 5.6 – Valores de $R_w$ extraídos do Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0.....   | 49  |
| Quadro 5.7 – Ensaios laboratoriais de janelas e alterações a considerar.....  | 51  |
| Quadro 5.8 – Soluções envidraçadas extraídas do Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0, para comparação do $R_w$ do vidro com o $R_w$ da janela.....   | 54  |
| Quadro 5.9 – Comparação entre os valores de $R_w$ de vidro e janelas. ....  | 55  |
| Quadro 5.10 – Avaliação qualitativa do impacto das componentes/variáveis no comportamento térmico e acústico. ....  | 56  |
| Quadro 6.1 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas até 20% da área do pavimento e valor do coeficiente de transmissão térmica para fachadas leves com vidro, para edifícios de habitação [51] .....           | 60  |
| Quadro 6.2. Incremento para correção do coeficiente de transmissão térmica mínimo de vão sem sombreamento e com vidro duplo incolor, [51]. .....  | 61  |
| Quadro 6.3 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas até 30% da área da fachada e valor do coeficiente de transmissão térmica para fachadas leves com vidro, para edifícios de comércio e serviços, [51]. ..... | 61  |
| Quadro 6.4 – Valor limite máximo do fator solar do vão, $g_{m\acute{a}x}$ , [51]. .....   | 62  |
| Quadro 6.5 – Limites regulamentares do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e quartos ou zonas de estar, adaptado de [51]. .....   | 63  |
| Quadro 6.6 – Cálculo dos valores de $R_w$ , de acordo com a norma NP 4517:2014. ....  | 68  |
| Quadro 6.7 – Valores de $D2m$ , $nT$ , $w$ . .....  | 68  |
| Quadro A.1 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 30% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras, [20]. .....   | A-1 |
| Quadro A.2 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 20% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras, [20]. .....   | A-2 |
| Quadro A.3 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 30% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras com desempenho térmico melhorado, [20]. ....                   | A-3 |
| Quadro A.4 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 20% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras com desempenho térmico melhorado, [20]. ....                   | A-4 |
| Quadro C.1 – Distribuição espectral relativa normalizada $D\lambda V\lambda\Delta\lambda$ , [24]. ....  | C-1 |
| Quadro C.2 – Distribuição espectral relativa normalizada da radiação solar global, adaptado de [24]. ....   | C-2 |

---

## **SIMBOLOGIA**

$U_w$  – Coeficiente de transmissão térmica da janela ( $W/m^2.K$ )

$U_g$  – Coeficiente de transmissão térmica do vidro ( $W/m^2.K$ )

$U_f$  – Coeficiente de transmissão térmica do caixilho ( $W/m^2.K$ )

$U_{cw}$  – Coeficiente de transmissão térmica de fachadas leves com vidro ( $W/m^2.K$ )

$g$  – Fator solar

$\Lambda$  – Condutância térmica ( $W/m^2.K$ )

$\alpha$  – Absortância

$\rho$  – Refletância

$\rho_v$  – Refletância visível

$\rho_e$  – Refletância solar direta

$\tau$  – Transmitância

$\tau_e$  – Transmitância solar direta

$\tau_v$  – Transmitância visível

$\phi_e$  – Fluxo de radiação solar incidente

$q_i$  – Fator de transmissão secundária de calor para o interior

$R_w$  – Índice de isolamento sonoro ponderado (dB)

$R$  – Índice de redução do som (dB)

$R'$  – Índice de redução do som aparente (dB)

$D_{2m,nT}$  – Isolamento sonoro a sons de condução aérea (dB)

$C$  – Termo de adaptação ao espectro de ruído rosa (dB)

$C_{tr}$  – Termo de adaptação ao espectro de ruído de tráfego (dB)

$\alpha$  – Coeficiente de absorção sonora

$L_{den}$  – Indicador de ruído dia-entardecer-noite (dB(A))

$L_{dn}$  – Indicador de ruído dia-noite (dB(A))

$L_{eq}$  ou  $L_{aeq}$  – Nível sonoro contínuo equivalente (dB(A))

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A introdução do vidro na arquitetura tem sido crescente, sendo o vidro um material essencial na tecnologia de fachadas, interferindo em vários aspetos físicos, como a luminosidade, transmitância visível, ganhos de energia solar, perdas térmicas, conforto térmico, isolamento sonoro, estanqueidade ao ar e à água e segurança (incêndio, impacto, intrusão, ação do vento, etc.) [1].

Os vãos envidraçados são um dos elementos da envolvente dos edifícios mais débil, tanto por facilitar trocas de calor entre os ambientes interior e o exterior, como a transmissão de ruído, o que pode comprometer o grau de comodidade exigido pelas pessoas. No entanto, as necessidades da eficiência energética e as exigências do conforto acústico têm sido contempladas na legislação, através do estabelecimento de requisitos nos regulamentos próprios destinados aos edifícios.

Na fase de projeto deverão escolher-se as soluções construtivas adequadas que permitam cumprir os requisitos legais e adicionalmente garantir níveis de conforto superior. Esta escolha poderá criar alguns desafios aos projetistas. Neste sentido, é útil estabelecer critérios de seleção de janelas, que poderão facilitar a escolha, para garantir a adaptação dos envidraçados ao conforto acústico e térmico em edifícios tendo em consideração a exposição ao ruído, o clima e a orientação. É importante proceder à escolha dos critérios de forma rigorosa uma vez que os edifícios na União Europeia consomem cerca de 40% de energia [2]. Registe-se que as janelas estão tipicamente associadas a perdas de calor consideráveis, podendo ser responsáveis por cerca de 30% da energia consumida para aquecimento. As janelas ditas eficientes devem conservar a energia, proporcionar conforto térmico e acústico e melhores condições de saúde e bem-estar. O desempenho das janelas depende do vidro, caixilho, ligações vidro/caixilho e caixilho/parede. Assim, para além dos parâmetros físicos que devem ser avaliados aquando da escolha do envidraçado a aplicar no edifício, é igualmente importante proceder à correta instalação, para garantia do melhor desempenho global da fachada.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação de mestrado tem o intuito de discutir os critérios de prescrição de soluções envidraçadas de modo a garantir melhores níveis de conforto ambiental interior. Além da identificação de parâmetros térmicos e acústicos de vidros e janelas e respetivos métodos de determinação normalizados faz-se uma revisão bibliográfica detalhada, onde se procede ao levantamento de trabalhos focados no desempenho térmico e acústico de vidros e janelas. Faz-

se, também, um levantamento de soluções de vidro e seleção de combinações possíveis para compor sistemas de vidro duplo e triplo. Para este efeito recorreu-se a ferramentas de fabricantes e apresentam-se os resultados das características dessas combinações e faz-se uma análise crítica.

Por forma a estipular as melhores soluções é necessário apresentar os tipos de materiais possíveis de aplicar no sistema envidraçado, as suas características e a influência que cada componente possui no desempenho final. A análise pretende relacionar a térmica e a acústica dos vãos envidraçados para que seja possível encontrar as melhores soluções de prescrição de janelas para a construção em edifícios, dentro dos limites aceitáveis. Decorrerá da análise de sensibilidade efetuada a parâmetros relevantes no desempenho das janelas.

Para a térmica, a análise crítica do cálculo do desempenho térmico efetua-se para os diferentes tipos de vidro, tendo em conta a influência dos perfis, espaçadores, tipos de vidro, composição, entre outros componentes. Para além dos dados obtidos das ferramentas fornecidas por fabricantes, recorreu-se ao uso da norma ISO 10077-1:2017 para obter o coeficiente de transmissão térmica da janela e, assim, tornar-se possível a verificação do desempenho térmico proporcionado pelas soluções e a influência das suas componentes.

Pretende-se, ainda, proceder à análise crítica de ensaios laboratoriais acústicos de janelas e posterior discussão do desempenho da janela em comparação com o vidro (usando a ferramenta *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0*). Esta análise permite verificar a influência proporcionada pelo caixilho no desempenho da janela. Os ensaios laboratoriais são essenciais para verificar a influência das componentes da janela no seu desempenho e a influência das dimensões da mesma.

Efetua-se, ainda, uma reflexão sobre o estabelecimento de regras de seleção de vidros e janelas com base em critérios de desempenho térmico e acústico analisados ao longo da dissertação.

Finalmente, pretende-se verificar a aplicabilidade da norma portuguesa NP 4517:2014 através da sua interpretação e da apresentação de exemplos de aplicação na vertente térmica e acústica.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O presente capítulo apresenta e identifica o enquadramento e motivação do tema, define os objetivos da dissertação de mestrado e apresenta a estrutura da mesma.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte relativo às soluções envidraçadas no que diz respeito ao tipo de vidro e suas características, tipo de janela, tipos de perfil, abertura e outros componentes constituintes da janela, como as ferragens, vedantes, espaçadores, películas e grelhas de ventilação.

O capítulo 3 apresenta os parâmetros térmicos e acústicos relativos aos vãos, as normas utilizadas na obtenção dos parâmetros essenciais para avaliação do desempenho das soluções envidraçadas descrevem a metodologia prevista num conjunto de normas. São ainda apresentadas as metodologias utilizadas para obtenção do coeficiente de transmissão térmica do vidro ( $U_g$ ), coeficiente de transmissão térmica da janela ( $U_w$ ) e índice de isolamento sonoro ponderado ( $R_w$ ). O cálculo dos valores do coeficiente de transmissão térmica do vidro,  $U_g$ , é feita recorrendo ao uso de duas ferramentas de cálculo dos vidros, o *Glass Calculator*, desenvolvido pela *Guardian Glass* e o *CalumenLive*, desenvolvido pela *Saint Gobain*. Relativamente aos valores do coeficiente de transmissão térmica das janelas,  $R_w$ , foram obtidos recorrendo ao *Acoustic Assistant 3.0*, desenvolvido pela *Guardian Glass* e ao *CalumenLive*, desenvolvido pela *Saint Gobain*, que disponibiliza, também os valores dos fatores de adaptação. Os valores de  $U_w$  são obtidos recorrendo ao uso da norma ISO 10077-1:2017.

No capítulo 4 é feito um levantamento dos fatores com maior influência no desempenho térmico e acústico de janelas tendo por base a revisão bibliográfica efetuada nos capítulos anteriores. Faz-se uma descrição sumária do trabalho efetuado nos artigos e as principais conclusões obtidos na sua análise e realizou-se um quadro síntese dos principais componentes que afetam o desempenho térmico e acústico.

No capítulo 5 é feita uma análise crítica do impacto de alteração de componentes em vidros e janelas. São definidas algumas composições de vidro recorrendo-se à simulação do seu desempenho nas ferramentas selecionadas, disponibilizadas pela *Guardian Glass* e pela *Saint Gobain*. Neste capítulo é ainda efetuada uma análise crítica ao isolamento sonoro de janelas obtido em ensaios laboratoriais por comparação com os desempenhos estimados para os vidros.

No capítulo 6 é feita uma reflexão sobre regras de dimensionamento de janelas tendo por base a revisão bibliográfica efetuada, a análise de resultados do desempenho dos vidros obtidos através das ferramentas selecionadas e os ensaios laboratoriais disponíveis para diferentes composições de janela e de vidro. Esta reflexão pretende contribuir no estabelecimento de critérios de seleção de soluções tendo em conta todos os parâmetros considerados relevantes e a sistematização da regulamentação. Apresenta-se, também, a norma 4517:2014 para verificar a sua aplicabilidade na escolha das melhores soluções envidraçadas, por forma a facilitar este processo.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões relativamente a toda a pesquisa efetuada no decorrer da dissertação e são apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

## 2 SOLUÇÕES ENVIDRAÇADAS

### 2.1 Introdução

As janelas são um elemento construtivo que deve garantir a entrada de luz nos espaços interiores, a ventilação dos espaços através da abertura das folhas móveis, a insolação dos espaços, devem limitar as infiltrações de ar e de água, quando fechadas, garantir a redução da troca de calor com o exterior, resistir às ações do vento e às solicitações decorrentes da utilização e devem ser utilizadas e mantidas em condições de segurança [3].

Para garantir a melhoria do desempenho térmico de todo o sistema de janela há três componentes fundamentais que influenciam o seu desempenho, destacando-se os vidros, os caixilhos e os espaçadores localizados na ligação vidro-caixilho. As alterações a efetuar para melhorar o seu comportamento, podem passar pela aplicação de multicamadas nos vidros, utilização de películas, revestimento de baixa emissividade, preenchimento da cavidade com gases e uso de aerogéis [4].

Uma vez que grande parte das superfícies transparentes são instaladas para serem abertas, registre-se que nessas condições não há qualquer barreira que impeça a passagem direta do som, sendo o desempenho acústico bastante afetado. A forma mais comum de aumentar o isolamento acústico é recorrer ao uso de vidros laminados, com uma ou mais camadas de PVB, sendo possível recorrer a outros sistemas como o uso de ressonadores de Helmholtz [4], sendo que o tipo de caixilho, tipo de abertura e vedantes também possuem grande influência no desempenho acústico.

### 2.2 Tipos de vidro

Os vãos envidraçados podem incorporar vidros simples, duplos ou triplos, sendo que os dois últimos podem conter ar ou gases nobres entre as folhas de vidro [5].

O desempenho acústico de um vidro depende muito da sua espessura e massa. Para se obter um melhor isolamento sonoro é mais adequado o uso de vidros duplos, triplos contendo soluções laminadas, sendo importante que nos sistemas de vidro duplo ou triplo, os vidros possuam espessuras diferentes [5], [6] e [7].

Nos Quadros 2.1 e 2.2 apresenta-se alguns tipos de vidros existentes no mercado [8] e [9].

Quadro 2.1 – Tipos de vidro relevantes, adaptado de [8] e [9].

| Tipo de vidro | Descrição  |
|---------------|--|
| Float         | É uma folha de vidro recozido simples, com tendência a partir-se em fragmentos grandes e irregulares. Pode ser usado em janelas com vidros duplos, podendo ser transformado em vidro temperado ou laminado.  |
| Temperado     | Deriva do vidro float através do seu aquecimento até 600°C, seguindo-se um rápido arrefecimento da superfície enquanto o seu interior ainda se mantém quente. Esta diferença de temperatura entre o interior e o exterior evidencia diversas propriedades físicas que resultam num equilíbrio entre a tensão de compressão na superfície e a tensão de tração no corpo do vidro.   |
| Laminado      | É constituído por duas ou mais folhas de vidro coladas em toda a sua superfície por uma camada intercalar, usualmente PVB (polivinil butiral). O PVB possui funções de prevenção de queda de fragmentos, segurança contra impactos ambientais, melhorar o isolamento sonoro, segurança contra incêndio e proteção contra raios UV. A utilização de PVB acústico (espessura > 0,76 mm) proporciona um confronto acústico superior, aumentando a eficiência de isolamento sonoro do vidro. |

Quadro 2.2 – Características da solução envidraçada, adaptado de [8] e [9].

| Características do vidro | Descrição  |
|--------------------------|--|
| Duplo                    | Proporciona um aumento do isolamento térmico e acústico dos vãos envidraçados. Estes possuem duas folhas de vidro separadas por uma caixa de ar/gás devidamente selada, de forma a garantir a estanqueidade. |
| Triplo                   | Incentivam o isolamento térmico dos vãos envidraçados, sendo constituídos por três folhas de vidro separadas por duas caixas de ar/gás devidamente selada, garantindo a estanqueidade.                       |

A introdução de gases nobres no interior da cavidade pode levar à ocorrência de melhorias significativas no desempenho do sistema envidraçado. É aconselhável a substituição do ar por gases com melhores propriedades térmicas. Assim, os gases nobres, não reativos mais utilizados são o argón, o cripton, o xénon e o hexafluoreto de enxofre [10].

## 2.3 Tipos de janela

### 2.3.1 Tipo de perfil

São muitas as soluções de perfis possíveis que podem ser selecionados para aplicação em edifícios. Os materiais mais utilizados são o alumínio, alumínio com corte térmico, madeira ou PVC. No entanto existem muitas outras opções no mercado como a fibra de vidro, aço, ferro e o perfil misto (alumínio/madeira) [11].

Os perfis selecionados para a análise efetuada ao longo da dissertação encontram-se descritos no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Tipos de perfil [12].

| Tipos de Perfil            | Descrição   |
|----------------------------|---|
| Alumínio                   | Material de difícil extração, que envolve no seu fabrico grandes quantidades de energia, sendo um processo pouco sustentável. Possui vantagens devido à sua resistência mecânica, não é inflamável, é extrudível, reciclável e possui grande durabilidade. Estes perfis não necessitam de grande manutenção, no entanto proporcionam mau isolamento térmico e acústico.                                     |
| Alumínio com corte térmico | São dois perfis de alumínio independentes que são unidos recorrendo ao uso de peças de poliamida. A rotura térmica introduzida nos perfis de alumínio permite um isolamento térmico mais eficaz, reduzindo o coeficiente de transmissão térmica em pelo menos 50%.  |
| Madeira                    | Material de fácil recolha e tratamento, que apresenta grande variabilidade. Há uma panóplia de espécies mais adequadas para uso em caixilharia devido à sua resistência, densidade, cor, textura, odor, aspeto, brilho, e dureza. É um material com boas propriedades contudo, necessita de manutenção regular.   |
| PVC                        | O PVC para uso em caixilharia passa por processos químicos que lhe confere uma maior resistência ao impacto e ao calor. Estes perfis proporcionam bom isolamento térmico, estabilidade dimensional, formando produtos leves. No entanto estes possuem fraca resistência mecânica, deformam-se consideravelmente quando sujeitos a grandes amplitudes térmicas e libertam gases tóxicos em caso de incêndio. |

No Quadro 2.4 apresenta-se uma síntese das principais características a atender e que podem ser usadas para selecionar os perfis [13], [14] e [15].

Quadro 2.4 – Características relevantes dos materiais mais utilizados em caixilharia.

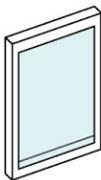
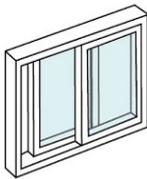
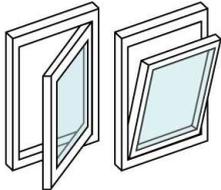
| Tipologia                              | Alumínio   | Madeira  | PVC  |
|--|--|--|--|
| Desempenho térmico e acústico          | Inferior a madeira e PVC   | Muito bom  | Bom  |
| Durabilidade                           | Muito boa, pode chegar às dezenas de anos. Superior ao PVC   | Bom, quando aplicado tratamentos fungicidas, inseticidas e hidrófugos.                               | Muito boa, de 50 a 100 anos.   |
| Manutenção                             | Reduzida   | Regular  | Reduzida   |
| Poluição Ambiental (pegada de carbono) | 4 vezes superior à madeira (pior solução)  | Melhor solução   | 2 vezes superior à madeira   |
| Vantagens                              | Boa resistência à corrosão, incêndio, água e ar, diferenças de temperatura, mecânica. Produtos leves e estáveis. | Boa resistência à flexão e compressão, ao choque, corrosão e esmagamento transversal.                | Boa resistência ao choque, corrosão, agentes biológicos, deformações e água. Produtos leves. |
| Desvantagens                           | Risco de condensações, grande consumo energético na produção.  | Sensível ao clima e agentes biológicos, instabilidade dimensional. Peso superior às outras soluções. | Fraca resistência mecânica, sensível a amplitudes térmicas e radiação solar.                 |

Importa referir que quando os perfis são submetidos a pintura vão ocorrer alterações na emissividade dos mesmos. No caso dos perfis de alumínio, pode haver a alteração da emissividade em caso de ocorrência de oxidação do material. Sabe-se, ainda, que a alteração nas propriedades emissivas da superfície pode causar uma variação no coeficiente de transmissão térmica de 18% [16].

### 2.3.2 Tipo de abertura

De acordo com o Guia Técnico para Janela Eficientes da CLASSE+ [11], as janelas são caracterizadas e diferenciadas de acordo com o seu modo de funcionamento. Seguidamente apresenta-se o tipo de janela, uma breve caracterização e uma imagem ilustrativa das janelas de interesse (janelas a analisar posteriormente), Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Tipos de janela, caracterização e representação ilustrativa.

| Tipologia             | Caracterização   | Ilustração  |
|-----------------------|--|---|
| Janela Fixa           | Os vidros são colocados diretamente no caixilho e este está fixo ao vão. Não é possível a sua abertura, não havendo qualquer tipo de movimentação nem possibilidade de ventilação. Proporcionam uma boa iluminação ao espaço.  |    |
| Janela de Batente     | É possível a abertura das folhas para dentro ou fora. O eixo de oscilação localiza-se na lateral do aro e da folha da janela. Proporcionam uma boa ventilação devido à sua abertura total e uma boa estanqueidade ao ar e água.  |   |
| Janela de Correr      | O movimento é efetuado pelas folhas que desliza em carris. Não ocupam área interna ou externa e podem ter de tipicamente 2 a 4 folhas ou 3 a 6 folhas. Permitem uma ventilação razoável, por 50% do vão, este sistema pode apresentar mais falhas de estanqueidade ao ar e água. |  |
| Janela Oscilobatente  | Permite a abertura lateral (batente) ou na parte superior da janela (basculante), possibilitando diferentes caudais de ventilação interior.  |  |
| Janela Osciloparalela | Permite a abertura basculante para o interior e deslizamento lateral sobre a calha. Possibilita a ventilação do interior, sem abrir por completo a janela e a poupança de espaço. No entanto apenas permite a abertura de uma das folhas, sendo a outra fixa.                    |  |

## **2.4 Outros componentes das janelas**

### **2.4.1 Ferragens**

No que se refere à seleção das soluções de ferragem é importante considerar o tipo de janela, o material do perfil a resistência à corrosão e o nível de segurança, entre outras características [17].

As ferragens são um componente importante das janelas, uma vez que são os elementos mais solicitados e que atribuem funcionalidade às mesmas. Devido à sua intensa utilização, estes componentes sofrem maior desgaste, sendo importante selecionar os materiais mais adequados ao tipo de janela e garantir a sua correta manutenção. Tendo em atenção o material do caixilho e o uso que se vai dar às ferragens é selecionado o material que as constituem, podendo ser de alumínio, latão ou aço inoxidável [11].

Alguns exemplos de ferragens são as dobradiças, pontos de fecho, compassos, cremones, fechos de 2ª folha, esquadros, puxadores, entre outros [11]. As ferragens têm uma grande importância no que se refere ao isolamento acústico isto deve-se ao facto de que as ferragens devem garantir nível adequado de compressas dos vedantes quando a janela se encontra fechada, garantindo uma boa permeabilidade ao ar e elevada estanqueidade à água [18].

### **2.4.2 Vedantes**

Os vedantes são uma componente importante do sistema de fixação do vão. São consideráveis os sistemas de vedação existentes para cada tipo de sistema, sendo que os vedantes a aplicar para as juntas de vidro, vedação de batente e vedação de janelas de correr são diferentes, existindo ainda situações especiais [11], [17].

Nas juntas do vidro são utilizados vedantes EPDM (Monómero de Etileno-Propileno-Dieno) ou mástique. A vedação de batente é feita recorrendo a elastómeros como o EPDM, SEBS (Estireno-Etileno-Butileno-Estireno), PVC ou mástique, por forma a garantir a estanqueidade dos caixilhos, ainda assim, esta deve ser reforçada com vedações duplas ou triplas. O material a utilizar deve possuir flexibilidade e resistência aos raios UV. Relativamente aos sistemas de vedação possíveis de utilizar nas janelas de correr destaca-se as fitas de pelúcia (PVC), estas possibilitam o deslizamento das folhas sobre as calhas, no entanto esta solução não é suficiente para garantir a total estanqueidade do caixilho [11], [17].

Quanto às soluções especiais de vedação, estas consideram-se quando estamos perante janelas elevadores de correr ou janelas oscilo-paralelas.

### 2.4.3 Espaçadores

Os espaçadores são utilizados nas soluções de vidros duplos ou triplos e atuam como elemento de selagem do gás presente na câmara de gás e como elemento estrutural de ligação que atribui a estabilidade e resistência ao vidro [11], [17].

Existem vários tipos de espaçadores, sendo que os mais frequentes são os de metal, existindo outros tipos que utilizam materiais não metálicos. Para os vários espaçadores existem vantagens e desvantagens associadas, conforme se sintetiza no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 – Síntese de vantagens e desvantagens associadas a cada tipo de espaçador.

| Material      |                | Vantagens                     | Desvantagens  |
|---------------|----------------|-------------------------------|---|
| Metálicos     | Alumínio       | Boa resistência mecânica.     | Rápida condução de calor e frio, afetando o desempenho térmico. |
|               | Aço inoxidável |                               |   |
| Não metálicos | Termoplásticos | Melhor comportamento térmico. | Menor resistência mecânica.                                     |
|               | Fibra de vidro |                               |   |
|               | Silicone       |                               |   |
|               | Espumas        |                               |   |
|               | Híbridos       |                               |   |

Os espaçadores possuem pequenos furos ao longo de toda a superfície para permitir o contacto entre o interior dos espaçadores preenchidos por sílica gel e o gás presente na câmara, por forma a evitar a ocorrência de condensações no interior.

### 2.4.4 Películas

Para possibilitar a melhoria das soluções envidraçadas é recorrente a adição de outras componentes ao vidro, tal como são exemplo as películas. No Quadro 2.7 apresentam-se as componentes a considerar e respetiva descrição [9] e [19].

Quadro 2.7 – Componente adicionais dos vidros melhorados [9], [19] e [17].

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Película de baixa emissividade | Limita a transferência de calor entre dois ambientes, por reduzir a transferência de calor por radiação sem impedir a passagem da luz natural. Esta atua na redução do coeficiente de transmissão térmica do vidro, $U_g$ .   |
| Película de Controlo Acústico  | Atenua o ruído exterior e interior dos edifícios, podendo ser especialmente usado em cidades ou zonas industriais, onde há elevado ruído de tráfego. A película de controlo acústico não afeta os níveis de luminosidade necessária dentro dos edifícios e apenas se aplica em vidros laminados, sendo que o PVB é a película que possui o controlo acústico. |
| Película de Controlo Solar     | Possui uma capa que limita a entrada de radiação solar, permitindo reduzir as cargas térmicas. Proporciona maiores níveis de conforto. Esta atua na redução do fator solar, $g$ .   |

### 2.4.5 Grelhas de ventilação

Os dispositivos de ventilação podem ser de abertura fixa, de secção variável autorreguláveis, de secção variável reguláveis pelas condições higrotérmicas (Figura 2.1), automáticos

controlados por sondas ou dispositivos de controlo manual. Este tipo de dispositivos tem como principais funções o controlo da ventilação, renovação do ar interior, minimização o risco de condensações, controlo da humidade, remoção ou diluição de poluentes e odores e a minimização da proliferação de fungos e bolores [17].

Para o controlo de ventilação através das janelas é frequente o uso de grelhas autorreguláveis, estas funcionam de acordo com o princípio da variação da secção de passagem do ar em função da variação de pressão [11], [17].



Figura 2.1 – Exemplo de um dispositivo de ventilação regulável por condições higrótérmicas.

## 3 PARÂMETROS TÉRMICOS E ACÚSTICOS

### 3.1 Introdução

Por forma a que seja possível garantir as melhores soluções de janelas é importante ter em conta algumas características essenciais para o desempenho otimizado das soluções envidraçadas. Os parâmetros que permitem avaliar as características que interferem no desempenho térmico e acústico das soluções envidraçadas são os coeficientes de transmissão térmica, o fator solar, o índice de isolamento sonoro ponderado, os termos de adaptação e a classe de permeabilidade ao ar da fachada, que não foi alvo de análise.

### 3.2 Métodos de avaliação

A determinação de cada um dos parâmetros acima mencionado (ver secção 3.1), está associada a um método de cálculo ou ensaio em laboratório específico. Importa especificar de que forma pode ser obtido cada um dos parâmetros e avaliar o desempenho dos vãos envidraçados.

#### 3.2.1 Coeficiente de transmissão térmica do vidro, $U_g$

A norma ISO 10292:1994 tem a finalidade de prover as regras fundamentais necessárias ao cálculo da transmitância térmica do vidro,  $U_g$ . O cálculo apresentado despreza quaisquer efeitos de borda, aplicando-se a vidro, vidro revestido e materiais opacos nos comprimentos de onda dos IV, sendo possível caracterizar a transferência de calor através do centro do vidro.

A equação (1) traduz o cálculo do  $U_g$  descrito na norma em questão.

$$\frac{1}{U_g} = \frac{1}{h_e} + \sum R_j + \frac{1}{h_i} \quad (1)$$

Em que:

$U_g$  – coeficiente de transmissão térmica do vidro [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ];

$1/h_i, 1/h_e$  – resistência térmica superficial interior e exterior, [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ];

$R_j$  – resistência térmica da camada  $j$  (vidros, espaços de ar, etc.) [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ].

### 3.2.2 Coeficiente de transmissão térmica da Janela, $U_w$

Os dados obtidos através de ensaios, cálculo e tabelas apenas nos fornecem valores relativos ao coeficiente de transmissão térmica do vidro. No entanto esses valores não nos permitem analisar o desempenho térmico da janela, sendo necessário recorrer ao método de obtenção do  $U_w$ , descrito na norma ISO 10077-1:2017 [20], de acordo com a equação (2).

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \psi_g}{A_f + A_g} \quad (2)$$

Em que:

$U_g$  – é a transmitância térmica do vidro, [ $W/m^2 \cdot K$ ];

$A_g$  – é a área do vidro, [ $m^2$ ];

$U_f$  – é a transmitância térmica do caixilho, [ $W/m^2 \cdot K$ ];

$A_f$  – é a área do caixilho, [ $m^2$ ];

$l_g$  – é o perímetro total do vidro, [m];

$\psi_g$  – é a transmitância térmica linear devido aos efeitos térmicos combinados de vidro espaçador e caixilho, [ $W/m^2 \cdot K$ ].

O documento normativo apresenta valores tabelados de  $U_w$ , possíveis de determinar caso se conheça os valores de transmissão térmica do vidro e do caixilho, sendo que estas apenas se aplicam a janelas colocadas na vertical, com área de caixilho igual a 30% e 20% da área total da janela, com as dimensões padrão de 1,23 m x 1,48 m, apresentando restrições para o coeficiente de transmissão térmica do vidro e do caixilho (Quadro 3.1). As tabelas podem ser consultadas no ANEXO A do presente documento.

Quadro 3.1 – Restrições ao uso de valores tabelados para obtenção do  $U_w$ , adaptado de [20].

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Vidros</b>              | <b><math>U_g</math> [<math>W/m^2 \cdot K</math>]</b> |
| Não revestido              | > 2,1  |
| Baixa Emissividade         | ≤ 2,1  |
| <b>Caixilhos</b>           | <b><math>U_f</math> [<math>W/m^2 \cdot K</math>]</b> |
| Alumínio sem corte térmico | = 7,0  |
| Alumínio com corte térmico | 2,2 ≤ $U_f$ ≤ 3,8                                    |
| Madeira ou PVC             | ≤ 2,0  |

### 3.2.3 Fator Solar, $g$

O fator solar do vidro é a propriedade com maior influência nos ganhos solares através dos vãos envidraçados.

Para cada vão envidraçado, que deve ser caracterizado considerando uma incidência normal ao vão, os fatores solar, de transmitância luminosa e de refletância luminosa devem ser determinados através das normas ISO/TR 52022-2:2017 [21], ISO 52022-1:2017 [22], ISO 52022-3:2017 [23] e ISO 9050:2003 [24].

O fator solar é a soma do fator de transmissão direta de energia solar,  $\tau_e$ , com o fator de transmissão secundária de calor,  $q_i$ , do envidraçado em relação ao interior. A expressão que traduz o cálculo do fator solar é a equação (3):

$$g = \tau_e + q_i \quad (3)$$

O fluxo de radiação solar incidente quando atinge o envidraçado divide-se em três parcelas, a parcela da radiação que é transmitida,  $\tau_e \phi_e$ , a que é refletida,  $\rho_e \phi_e$ , e a radiação absorvida,  $\alpha_e \phi_e$ . As três parcelas relacionam entre si o fluxo de energia solar e a sua soma é igual a 1, equação (4).

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1 \quad (4)$$

Em que:

$$\alpha_e = q_i + q_e$$

$\tau_e$  – é o fator de transmissão direta da energia solar;

$\rho_e$  – é o fator de reflexão direta da energia solar;

$\alpha_e$  – é o fator de absorção direta da energia solar;

$q_i$  – é o fator de transmissão secundária de calor do envidraçado enviado para o interior;

$q_e$  – é o fator de transmissão secundária de calor do envidraçado enviado para o exterior.

O procedimento de cálculo dos valores de transmitância visível, refletância visível, transmitância solar direta, refletância solar direta, absorção solar direta e fator de transmissão secundária de calor para o interior, encontra-se no ANEXO B, descrito de acordo com as normas ISO/TR 52022-2:2017 [21], ISO 52022-1:2017 [22] e ISO 52022-3:2017 [23].

### 3.2.4 Índice de redução sonora ponderado, $R_w$

O comportamento acústico das soluções construtivas pode ser caracterizado através da medição do índice de redução sonora em função da frequência do som.

A determinação laboratorial do índice de isolamento sonoro de vidros e janelas é efetuada recorrendo aos procedimentos descritos nas normas ISO 10140-2:2010 [25], ISO 10140-3:2010 [26] e NP EN ISO 717-1:2013 [27]. Para além das normas já referidas, recorre-se às normas ISO 10140-1:2016 [28], ISO 10140-4:2010 [29] e ISO 10140-5:2010 [30].

A norma ISO 10140-1:2016 [31] especifica a regras de aplicação dos produtos, esta dá-nos a indicação das dimensões do provete de ensaios, que são de 1,23 m x 1,48 m. É ainda indicado o método de instalação da janela o qual deverá ser o mais semelhante possível ao usado na prática. Quando a janela é montada para se proceder ao teste de abertura, os nichos de cada lado da janela deverão apresentar diferentes profundidades, numa razão 2:1. O espaço entre a janela e a abertura de ensaio deve possuir uma espessura de 10 mm a 13 mm, podendo ser preenchida com material absorvente e selada com material elástico em ambos os lados ou de acordo com as instruções do fabricante. Para os vidros laminados é especificada a temperatura de realização do ensaio, que se deverá ser de  $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ , uma vez que quanto menos rígida estiver a película de PVB maior será o amortecimento influenciando o isolamento sonoro. No que respeita ao ensaio de vidros apenas, este documento normativo indica as condições de montagem.

As normas ISO 10140-2:2010 [25] e 10140-4:2010 [29] fornecem as informações necessárias para a realização do ensaio, descrevendo os procedimentos gerais para a medição do isolamento a sons aéreos.

A norma 10140-4:2010 descreve os requisitos e procedimentos de medições em laboratório, sendo que nos indica as medições que são efetuadas em cada câmara. Na câmara emissora é feita a medição do nível médio de pressão sonora, enquanto na câmara recetora, para além do nível médio de pressão sonora, são feitas medições aos tempos de reverberação e do ruído de fundo.

Os requisitos estipulados para as câmaras acústicas encontram-se descritos na norma ISO 10140-5:2010 [30], onde é possível encontrar os requisitos para as câmaras acústicas e equipamentos de ensaio.

Apesar do isolamento sonoro em função da frequência nos fornecer uma informação mais detalhada sobre o comportamento do elemento, a classificação do desempenho acústico através de um parâmetro único é fundamental, pois é usado na definição dos requisitos legais de

isolamento sonoro. Este parâmetro é obtido a partir da curva de isolamento em função da frequência e representa uma avaliação ponderada da mesma.

A norma NP EN ISO 717-1:2013 [27], indica o procedimento para o cálculo do índice de redução sonora ponderado,  $R_w$ , a partir da curva de isolamento, bem como dos termos de adaptação  $C$  e  $C_{tr}$ .

Em que:

$R_w$  – é o índice de redução sonora ponderado, [dB(A)];

$C$  – é o valor de adaptação do espectro do ruído rosa (sons agudos), [dB];

$C_{tr}$  – é o valor de adaptação do espectro de ruídos normalizados de tráfego (sons graves), [dB].

### 3.3 Ferramentas com características de vidros

Os fabricantes de vidros disponibilizam ferramentas que nos fornecem possibilidade de composição de vidros e dados relativos aos parâmetros térmicos e acústicos dos vidros. Estes são dados extremamente úteis na seleção de vidros para integrar a janela. No trabalho desta dissertação, para as características térmica procede-se ao uso do *CalumenLive* [32] e do *Guardian Glass Analytics* [33], enquanto que para a acústica se recorre ao uso da ferramenta *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0* [34]. O mapeamento dos parâmetros extraídos de cada ferramenta encontra-se sintetizado no Quadro 3.2. Apesar de as ferramentas fornecerem mais dados do que os indicados, estes não são apresentados dado que não possuem importância para a análise que se pretende realizar. Listam-se no Quadro 3.3 os outros parâmetros fornecidos pelas ferramentas.

O *CalumenLive* é uma ferramenta que permite obter todos os detalhes técnicos essenciais para a análise de vidros a aplicar em projeto, desenvolvida pela *Saint-Gobain*. Esta permite a escolha das normas que pretendemos aplicar para o cálculo de alguns dos fatores, assim sendo, optou-se pela escolha da norma ISO 9050:2003 [24] para obtenção dos valores dos Fatores Luminosos, fatores relativos à Energia Solar e Fator Solar. Relativamente aos valores de  $U_g$ , para caixa de gás preenchida com ar/árgon, recorre à norma ISO 10292:1994. Esta ferramenta permite, ainda, obter resultados para os valores de  $R_w$  e para os termos de adaptação, para algumas constituições de vidro específicas.

A *Guardian Glass* desenvolveu o *Guardian Glass Analytics*, ferramenta de análise de soluções envidraçadas. Esta ferramenta possibilita a obtenção dos valores de  $U_g$  para várias composições

de vidro por forma a que seja possível a escolha da melhor solução. As soluções envidraçadas devem garantir a funcionalidade, luminosidade, requisitos energéticos e sustentabilidade. Através da introdução de dados e escolha da composição do sistema de envidraçado diretamente na ferramenta, esta calcula o desempenho da solução pretendida recorrendo ao uso da norma ISO 9050:2003 [24]. Os valores fornecidos podem ser afetados dependendo das características do envidraçado, tamanho, orientação, sombreamento, entre outros fatores. Assim, os resultados podem apresentar variações e incertezas quando comparados com ensaios realizados em condições reais, podendo ser significativas as alterações em termos de aplicabilidade e resultados obtidos.

Nos ensaios acústicos são várias as combinações de vidro possíveis de avaliar, no entanto os custos para realização dos ensaios são muito dispendiosos e não é prático a realização de testes para certificação de todas as composições de vidro. Assim, a ferramenta desenvolvida pela *Guardian Glass*, o *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0*, fornece uma compilação de estimativa de resultados que nos permite comparar o desempenho de soluções.

O desempenho acústico dos envidraçados é obtido através de ensaio para as dimensões padrão de envidraçado de 1,23 m x 1,48 m, de acordo com o descrito pelas normas EN ISO 10140-2:2010, sendo esperada a ocorrência de variações no desempenho acústico ponderado,  $R_w$ , e nos termos de adaptação,  $C$  e  $C_{tr}$ , com precisão de  $\pm 2$  dB. No entanto, o desempenho real do envidraçado pode ter variações de acordo com as dimensões do mesmo, com a estrutura e tipo de material utilizado ou com as fontes de ruído.

É necessário, ainda, ter em atenção condições de temperatura na escolha das melhores soluções de janela. A temperatura pode condicionar o isolamento sonoro em vidros laminados, na medida em que pode afetar a elasticidade de camadas intermédias. Assim, os ensaios laboratoriais realizaram-se a uma temperatura do envidraçado de  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , de acordo com o estipulado nas normas utilizadas.

Por forma ilustrar sucintamente os resultados obtidos com cada uma das ferramentas são apresentados para alguns exemplos de composição de vidro nos Quadros 3.4 a 3.7. As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam esquematicamente os vidros para cada ferramenta.

Quadro 3.2 – Resumo dos dados extraídos de cada ferramenta.

| Parâmetros   | Símbolo                                  | Unidades               | CalumenLive | Guardian Glass Analytics | Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0 |
|--|--|------------------------|-------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Composição do vidro                                      | -  | [mm]                   | x           | x                        | x                                     |
| Espessura da cavidade                                    | -  | [mm]                   | x           | x                        | x                                     |
| Transmitância visível                                    | $\tau_v$                                 | [%]                    | x           | x                        | -                                     |
| Refletância visível                                      | $\rho_{v,e}; \rho_{v,i}$                 | [%]                    | x           | x                        | -                                     |
| Transmitância solar                                      | $\tau_e$                                 | [%]                    | x           | x                        | -                                     |
| Refletância solar  | $\rho_{e,e}; \rho_{e,i}$                 | [%]                    | x           | x                        | -                                     |
| Absorção   | $\alpha_e; \alpha_1; \alpha_2; \alpha_3$ | [%]                    | x           | x                        | -                                     |
| Fator solar  | $g$                                      | -                      | x           | x                        | -                                     |
| Fator de transmissão secundária de calor para o interior | $q_i$                                    | -                      | -           | x                        | -                                     |
| Coefficiente de transmissão térmica do vidro             | $U_g$                                    | [W/m <sup>2</sup> . K] | x           | x                        | -                                     |
| Peso   | m  | [Kg/m <sup>2</sup> ]   | x           | x                        | X                                     |
| Índice de redução sonora ponderado do vidro              | $R_w$                                    | [dB(A)]                | x           | -                        | X                                     |
| Termos de adaptação                                      | $C; C_{tr}$                              | [dB]                   | x           | -                        | X                                     |
| Frequência de bandas de oitava                           | -  | Hz                     | -           | -                        | x                                     |

Quadro 3.3 – Restantes dados fornecidos pelas ferramentas.

| Parâmetros                                   | Símbolo     | Unidades             | CalumenLive | Guardian Glass Analytics | Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0 |
|--|-------------|----------------------|-------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Inclinação do vidro                          | -           | [mm]                 | -           | x                        | -                                     |
| % de Ultravioleta                            | $\tau_{UV}$ | [%]                  | -           | x                        | -                                     |
| Skin Damage Factor                           | $F_{sd}$    | -                    | -           | x                        | -                                     |
| CIE Damage Factor                            | $T_{df}$    | -                    | -           | x                        | -                                     |
| Coefficiente de sombreamento                 | $cs$        | -                    | x           | x                        | -                                     |
| Resistência térmica                          | R           | [m <sup>2</sup> K/W] | -           | -                        | -                                     |
| Classe de transmissão sonora                 | STC         | [dB]                 | x           | -                        | x                                     |
| Classe de transmissão sonora interna-externa | OITC        | [dB]                 | x           | -                        | x                                     |
| Resistência ataque manual                    | -           | -                    | x           | -                        | -                                     |
| Impactos Ambientais                          | -           | -                    | x           | -                        | -                                     |
| Espessura total                              | -           | [mm]                 | -           | -                        | x                                     |

Quadro 3.4 – Composição vidros utilizados nas três ferramentas.

| ID  | Tipo de vidro | 1º Painel [mm] | Câmara [mm] | 2º Painel [mm] | Câmara [mm] | 3º Painel [mm] |
|-----|---------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| SF1 | Simples       | 4              | -           | -              | -           | -              |
| DF2 | Duplo         | 4              | 12          | 4              | -           | -              |
| TF3 | Triplo        | 4              | 12          | 4              | 12          | 4              |

Quadro 3.5 – Output de dados essenciais para a análise térmica e acústica, ferramenta CalumenLive.

| ID  | Fatores Luminosos |                  |                  | Energia solar |                  |                  |                |                |                | Fator solar g | Ug [W/m².K] |       | Rw [dB] | Rw+C [dB] | Rw+Ctr [dB] | Peso Kg/m² |
|-----|-------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|-------------|-------|---------|-----------|-------------|------------|
|     | $\tau_v$ (%)      | $\rho_{v,e}$ (%) | $\rho_{v,i}$ (%) | $\tau_e$ (%)  | $\rho_{e,e}$ (%) | $\rho_{e,i}$ (%) | $\alpha_1$ (%) | $\alpha_2$ (%) | $\alpha_3$ (%) |               | Ar          | Árgon |         |           |             |            |
|     |                   |                  |                  |               |                  |                  |                |                |                |               | Ug [W/m².K] |       |         |           |             |            |
| SF1 | 91                | 8                | 8                | 87            | 8                | 8                | 5              | -              | -              | 0,88          | 5,8         | -     | 30      | 28        | 28          | 10         |
| DF2 | 83                | 15               | 15               | 77            | 14               | 14               | 5              | 4              | -              | 0,8           | 2,9         | 2,7   | 31      | 30        | 27          | 20         |
| TF3 | 76                | 21               | 21               | 68            | 19               | 19               | 6              | 4              | 4              | 0,73          | 1,9         | 1,8   | 32      | 31        | 27          | 30         |

Quadro 3.6 – Output de dados essenciais para a análise térmica, ferramenta Guardian Glass Analytics.

| ID  | Luz visível          |                  |                  | Energia solar              |                  |                  |                               |               |          | Ug [W/m².K] |             | Peso Kg/m² |       |
|-----|----------------------|------------------|------------------|----------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|---------------|----------|-------------|-------------|------------|-------|
|     | Transm. $\tau_v$ (%) | Refletância      |                  | Transm. Solar $\tau_e$ (%) | Refletância      |                  | Absorção Solar $\alpha_e$ (%) | Fator solar g | $q_i$ Ar | $q_i$ Árgon | Ar          |            | Árgon |
|     |                      | $\rho_{v,e}$ (%) | $\rho_{v,i}$ (%) |                            | $\rho_{e,e}$ (%) | $\rho_{e,i}$ (%) |                               |               |          |             | Ug [W/m².K] |            |       |
| SF1 | 91                   | 8                | 8                | 87                         | 8                | 8                | 5                             | 0,88          | 1,4      | -           | 5,8         | -          | 9,6   |
| DF2 | 83                   | 15               | 15               | 76                         | 14               | 14               | 10                            | 0,79          | 3,56     | 3,61        | 2,9         | 2,7        | 19,19 |
| TF3 | 76                   | 21               | 21               | 67                         | 19               | 19               | 15                            | 0,72          | 5,3      | 5,35        | 1,9         | 1,8        | 28,79 |

Quadro 3.7 – Output de dados essenciais para a análise acústica, ferramenta *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0*.

| ID  | Rw [dB] | Rw+C [dB] | Rw+Ctr [dB] | Freq. Banda de oitava (Hz) |     |     |      |      |      | Peso Kg/m² |
|-----|---------|-----------|-------------|----------------------------|-----|-----|------|------|------|------------|
|     |         |           |             | 125                        | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |            |
| SF1 | 29      | 28        | 27          | 20                         | 22  | 26  | 31   | 33   | 28   | 10         |
| DF2 | 30      | 29        | 27          | 26                         | 18  | 24  | 34   | 40   | 36   | 20         |
| TF3 | 31      | 30        | 26          | 20                         | 20  | 27  | 43   | 51   | 41   | 30         |

Numa breve análise aos Quadros 3.5 e 3.6 é possível verificar que, para a mesma composição de vidros, as ferramentas apresentam valores de coeficiente de transmissão térmica do vidro iguais e o fator solar apresenta valores muito semelhantes.

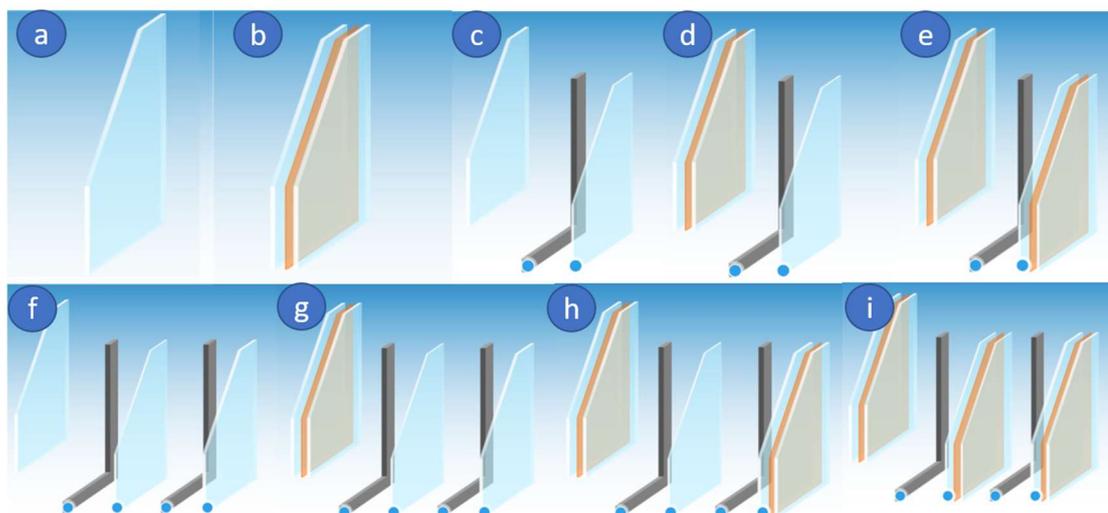


Figura 3.1 – Representação esquemática dos vidros representativos da ferramenta CalumenLive; (a) vidro simples; (b) vidro laminado; (c) vidro duplo; (d) vidro duplo com um laminado; (e) vidro duplo com dois laminados; (f) vidro triplo; (g) vidro triplo com um laminado; (h) vidro triplo com dois laminados; (i) vidro triplo com três laminados.

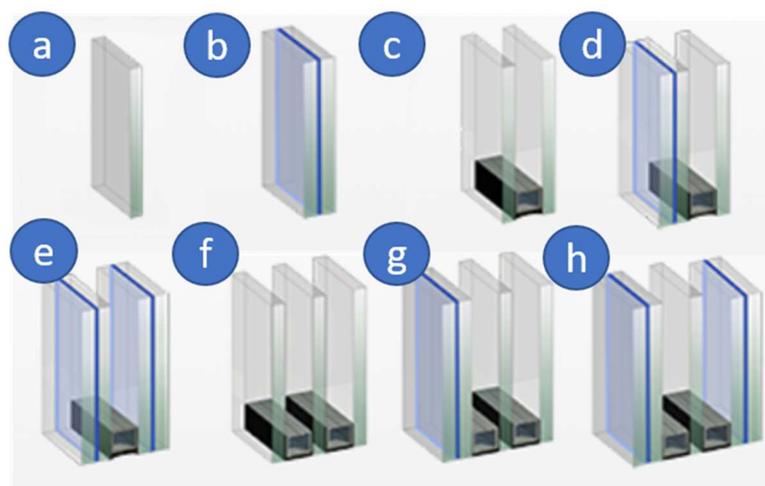


Figura 3.2 – Representação esquemática dos vidros representativos das ferramentas Guardian Glass Analytics e Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0; (a) vidro simples; (b) vidro laminado; (c) vidro duplo; (d) vidro duplo com um laminado; (e) vidro duplo com dois laminados; (f) vidro triplo; (g) vidro triplo com um laminado; (h) vidro triplo com dois laminados.

## **4 LEVANTAMENTO DE FATORES COM MAIOR INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO**

### **4.1 Introdução**

O desempenho térmico e acústico de vãos envidraçados depende de vários fatores, nomeadamente dos constituintes da solução envidraçada. Neste capítulo pretende-se identificar os fatores que têm maior influência no comportamento térmico e acústico das janelas. Esta identificação pode ser útil para a seleção dos componentes que permitam obter soluções melhoradas em termos de comportamento térmico e acústico.

### **4.2 Fatores de influência**

No sentido de garantir o melhor comportamento térmico e acústico, é necessário especificar um perfil de requisitos tendo em conta a orientação, localização do edifício, zona climática, presença ou não de dispositivos de proteção, dispositivos de ventilação, tipo de vidro, espessura da caixa de ar/gás, gás presente na caixa, espaçadores, material, acabamento e espessura do caixilho, corte térmico, classe de inércia térmica, tipo de janela e abertura, área mínima de pavimento servida por cada vão, área mínima de fachada servida por cada vão, dimensões dos vãos, área envidraçada, eficiência energética pretendida, sombreamento e luz natural (transmitância luminosa), exposição ao vento, renovações de ar, presença e espessura de películas (função do objetivo pretendido em termos de PVB, controlo solar, redução de ruído, baixa emissividade...) [35].

Para além dos parâmetros referidos, o índice de redução sonora pode ser afetado pelo número de juntas, dimensões da janela, presença de componente como grelhas de ventilação, persianas, caixas de estore e qualidade da instalação [4].

O estudo dos fatores de influência baseou-se na análise de um conjunto de artigos, apresentando-se no Quadro 4.1 um resumo das conclusões dessa análise. E no Quadro 4.2 é apresentada a avaliação qualitativa do impacto dos componentes no comportamento térmico e acústico.

Quadro 4.1 – Identificação das componentes/variáveis estudadas e principais conclusões.

| Referência bibliográfica e autores         | Identificação das componentes/variáveis estudadas  | Conclusões principais  |
|--|--|--|
| [4]<br>G. Baldinelli et al.                | Avaliação do ciclo de vida<br>Impacto ambiental (incluindo a fase de uso)<br>Janela de madeira<br>Vidro laminado<br>Películas (baixo emissivas e controlo solar)<br>Propriedades mecânicas (permeabilidade ao ar, estanqueidade, resistência à carga do vento) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A melhoria das características térmicas da janela leva à diminuição do impacto ambiental no que se refere à diminuição da queima de combustíveis para aquecimento.</li> <li>- Para aumentar o desempenho térmico da janela há três partes desta que podem ser melhoradas: vidros, caixilho e espaçador.</li> <li>- A forma mais comum de melhorar o desempenho acústico é recorrer ao uso de vidros laminados com uma ou mais camadas de PVB.</li> <li>- A aplicação de uma película de baixa emissividade reduz a transmitância solar direta, <math>\tau_e</math>, de 75% para 43%, mantendo a transmitância luminosa, <math>\tau_v</math>, em 70%.</li> <li>- A aplicação de película de controlo solar leva à redução da transmitância luminosa e da transmitância solar direta, provocando o aumento dos coeficientes de reflexão, <math>\rho_v</math> e <math>\rho_e</math>.</li> <li>- Os melhores resultados são obtidos quando a película de controlo solar é aplicada no vidro exterior, reduzindo significativamente a transmitância solar e mantendo a transmissão luminosa superior a 50%.</li> </ul> |
| [15]<br>N. Granzotto et al.                | Avaliação do ciclo de vida<br>Impacto ambiental<br>Tipo de caixilho<br>Tipo de vidro<br>Caixa de gás<br>PVB  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Em termos de produção e ACV, o caixilho de madeira é a melhor solução e o de PVC é a pior.</li> <li>- Para o caixilho de madeira, alumínio e PVC verifica-se que a espessura do vidro, caixa de gás e PVB têm maior influência nos valores de <math>R_w</math> do que no <math>U_w</math>.</li> <li>- O isolamento térmico dos vidros é garantido pelos tratamentos de baixa emissão, no entanto, este sozinho não garante o isolamento térmico ideal.</li> </ul>   |
| [16]<br>A. Witek, B. Pietruszk             | Tipo de caixilho (alumínio)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quando os caixilhos são submetidos a pintura ocorrem alterações na sua emissividade, podendo levar à deterioração da mesma em caso de ocorrência de oxidação do caixilho.</li> <li>- Uma mudança na emissividade pode causar uma diferença de 18% na transmitância térmica.</li> </ul>  |
| [36]<br>S. Saadatian, F. Freire, N. Simões | Tipo de caixilho<br>Tipo de vidro<br>Películas (controlo solar e baixo emissivas)<br>Análise de ciclo de vida  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Em relação aos perfis de madeira, o perfil de PVC contribui com uma pegada de carbono duas vezes superior, enquanto o alumínio é quatro vezes superior.</li> <li>- O vidro é a componente mais significativo, ocupando mais de 62% do total de impactos incorporados da janela.</li> <li>- Quanto maior o peso do vidro presente nas soluções, maiores serão os impactos causados, exceto algumas soluções de vidro laminado ou com películas baixo emissivas.</li> </ul>   |
| [37]<br>D. Németh, L. Elek                 | Dimensões da janela (vidro e caixilho)<br>Efeito da alteração da proporção entre o perfil e o vidro  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A transmissão de energia por radiação diminui com a modificação de algumas propriedades da superfície do vidro.</li> <li>- A diminuição da proporção do caixilho diminui o coeficiente de transmissão térmica.</li> <li>- A diferença entre o coeficiente de transmissão térmica da janela com menores e maiores dimensões é de 20%, de 0,56 x 0,56 m para 1,96 x 1,96, respetivamente.</li> </ul>  |

Quadro 4.1 – Identificação das componentes/variáveis estudadas e principais conclusões (continuação).

|  |  |  |
|--|--|--|
| <p>[38]<br/>K. Larsson,<br/>D. Glebe</p>                       | <p>Isolamento acústico nas frequências baixas<br/>Comportamento modal do compartimento<br/>Influência do design da janela<br/>Configuração da fachada<br/>Configuração da janela</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Podem ser excitados diferentes comportamentos modais do compartimento dependendo do posicionamento da janela.</li> <li>- Janelas com configurações simétricas apresentam um desempenho acústico inferior às configurações assimétricas.</li> </ul>  |
| <p>[39]<br/>H.W. Bielefeld,<br/>T. DeGanyar<br/>Schüco USA</p> | <p>Sistemas de fachada<br/>Efeito do vidro<br/>Efeito do caixilho</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Em comparação com outros materiais, o caixilho de alumínio é o mais utilizado em soluções de fachada devido à sua boa durabilidade e resistência, sendo que são mais baratos e necessitam de pouca manutenção.</li> <li>- A introdução do caixilho num vidro com propriedades isolantes semelhantes não tem grande influência no <math>R_w</math> da solução, no entanto quando é para um vidro melhorado este tem grande influência no <math>R_w</math>.</li> </ul>  |
| <p>[40]<br/>A. J. B. Tadeu,<br/>D. M. R. Mateus</p>            | <p>Abertura de vidros<br/>Número de vidros<br/>Tipo de caixilho</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- O aumento da massa do elemento leva ao aumento do isolamento sonoro.</li> <li>- Quando há um aumento da frequência do som incidente no elemento que mantém a mesma massa, dá-se o aumento do isolamento acústico.</li> <li>- O isolamento acústico de um único elemento de separação pode aumentar se o elemento for dividido em dois painéis separados por uma câmara de ar, no entanto a separação leva a quebras de isolamento adicionais.</li> <li>- O isolamento das soluções envidraçadas com caixilho só melhora se a massa do caixilho for significativa e bem vedada.</li> <li>- Os vidros duplos apresentam melhor desempenho acústico do que os simples se as caixas de ar forem muito pequenas ou <math>\geq 50</math> mm.</li> </ul> |
| <p>[41]<br/>S. Perumal et al.</p>                              | <p>Espessura da caixa de ar</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A espessura da caixa de ar gera um impacto significativo na resistência térmica e na transferência de calor.</li> <li>- A máxima espessura de caixa de ar ensaiada, 14 mm, é recomendada no que diz respeito à transferência de calor.</li> </ul>   |
| <p>[42]<br/>A. Homb</p>  | <p>Frinchas e aberturas<br/>Inclinação da janela<br/>Tipo de caixilho<br/>Baixas frequências</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A abertura de 10 mm nas juntas de vedação provoca uma diferença significativa nas altas frequências. No entanto para os caixilhos sem aberturas a diferença ocorre nas baixas frequências, podendo dever-se ao tipo de caixilho.</li> <li>- As frinchas de 5 a 6 mm entre o caixilho e o peitoril provocam uma diferença significativa em todas as frequências, verificando-se uma dispersão de 5 a 10 dB.</li> <li>- A inclinação influencia o isolamento sonoro da janela, havendo alguma dispersão nas baixa frequências, provavelmente devido aos diferentes caixilhos.</li> </ul>  |
| <p>[43]<br/>N. Cardinale,<br/>G. Rospi,<br/>T. Cardinale</p>   | <p>Tipo de caixilho<br/>Caixas de estore<br/>(Poliestireno expandido)</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Na grande parte dos casos as caixas de estore são o principal responsável pelas perdas térmicas e entrada de calor (causa de sobreaquecimento).</li> </ul>  |

Quadro 4.2 – Avaliação qualitativa do impacto das componentes/variáveis no comportamento térmico e acústico.

| Componente/Variável  | Impacto no comportamento térmico | Impacto no comportamento acústico | Referência bibliográfica |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Espessura do Vidro   | -                                | +++                               | [4] [15] [39] [40]       |
| Composição do sistema envidraçado (simples, duplo, triplo) | +++                              | +++                               | [4] [38] [40]            |
| Espessura da cavidade entre vidros                         | +                                | +++                               | [4] [15] [16] [40] [41]  |
| Tipo de gás entre vidros                                   | +++                              | -                                 | [17]                     |
| Espaçadores  | ++                               | +                                 | [11]                     |
| Tipo de Caixilho   | +++                              | ++                                | [1] [15] [36] [39] [42]  |
| Dimensões do caixilho                                      | ++                               | +                                 | [37] [39]                |
| Vedante  | +++                              | +                                 | [11]                     |
| Abertura   | +++                              | +++                               | [11] [42] [44] [45] [46] |
| Uso de películas (PVB, Low-E, solar, acústica)             | +++                              | ++                                | [17] [36]                |

Escala: - pouco; + algum; ++ muito; +++ imenso

## 4.2.1 Isolamento térmico de janelas

### 4.2.1.1 Componentes dos envidraçados

Os envidraçados constituem uma pequena parte da fachada dos edifícios. No entanto são os causadores das maiores perdas de calor. Isto deve-se ao seu desempenho térmico ser inferior ao da fachada. Registe-se também a existência de pontes térmicas, devido à geometria ou à variação das propriedades térmicas e são problemáticas dado que levam ao aumento do consumo de energia para aquecimento do edifício. Nestes pontos aumenta o risco de ocorrência de condensações, que levam ao aparecimento de manchas, humidade e mofo nestas superfícies [37].

Para uma melhor seleção das soluções de janelas, é necessário proceder à análise dos caixilhos e dos vidros, uma vez que têm grande impacto no desempenho térmico. No trabalho [36], procederam-se à seleção de algumas soluções de interesse, para as medidas padrão de janelas (1,23 m x 1,48 m). Analisaram-se os fatores de influência como o tipo de caixilho, o número de vidros, o gás presente na cavidade e o revestimento (controlo solar e baixo emissivo). Recolheram-se dados referentes a vidro temperado e laminado, com controlo solar, baixa emissividade ou sem revestimento, para soluções de vidro duplo ou triplo. As soluções encontram-se discriminadas no Quadro 4.3, apresentando os respetivos valores de  $U_w$  e  $g$ .

Quadro 4.3 – Soluções envidraçadas alternativas caracterizadas por propriedades térmicas, adaptado de [36].

| Solução envidraçada | Camadas de vidro | Tipo de vidro | $U_w$ [ $W/m^2 \cdot K$ ] | $g$  | Composição     | Tipo de revestimento e número |
|---------------------|------------------|---------------|---------------------------|------|----------------|-------------------------------|
| DA                  | 2                | Temperado     | 1                         | 0,33 | 6-15-4         | Controlo solar (2)            |
| DB                  | 2                | Temperado     | 1,1                       | 0,65 | 4-16-4         | Baixo emissiva (3)            |
| DD                  | 2                | Laminado      | 2,6                       | 0,78 | 4-16-33.1*     | -                             |
| TA                  | 3                | Temperado     | 0,5                       | 0,62 | 4-18-4-18-4    | Baixo emissiva (2&5)          |
| TB                  | 3                | Laminado      | 0,8                       | 0,58 | 33.2-10-4-10-4 | Baixo emissiva (2&5)          |

\*Nota: 33.1 é um laminado com dois painéis de vidro com 3 mm de espessura com um intercalar de PVB de 0,38 mm.

No que se refere a caixilhos, os materiais selecionados foram o alumínio, o PVC e a madeira, para além da referência à fibra de vidro. As opções de caixilhos selecionados encontram-se representados na Figura 4.1, juntamente com os respetivos valores de  $U_f$ .

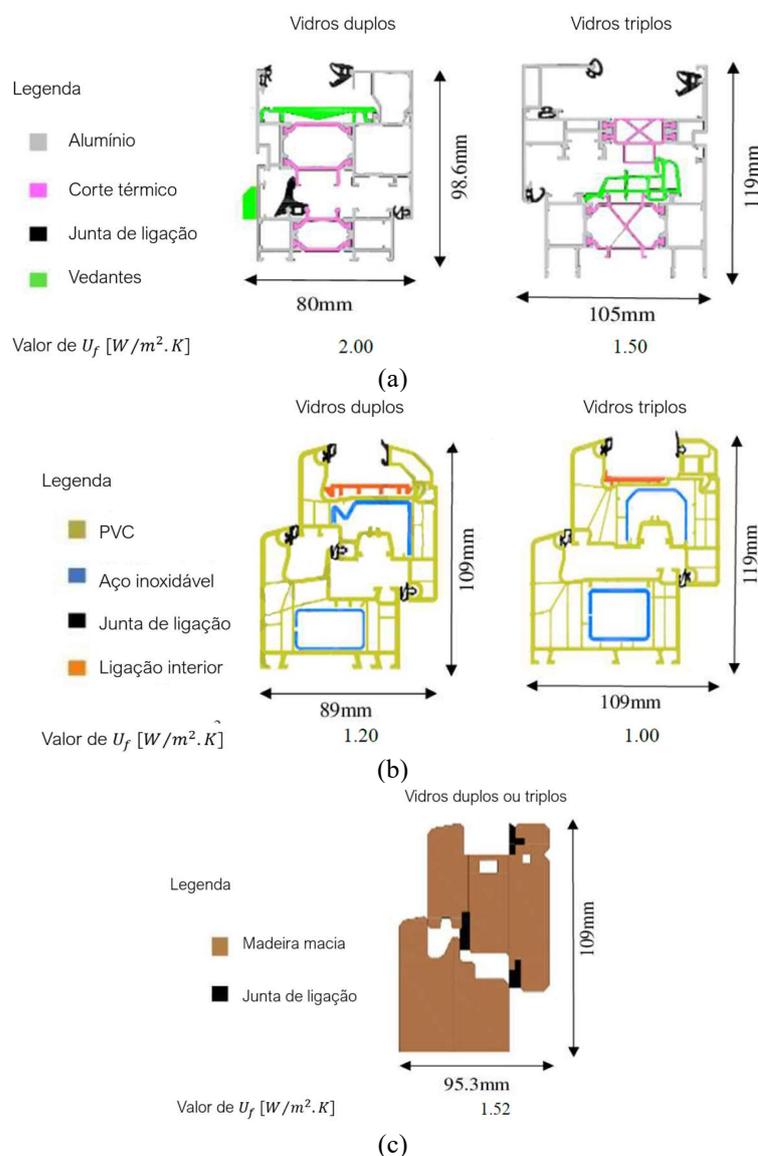


Figura 4.1 – Opções de caixilhos selecionados; (a) alumínio; (b) PVC; (c) madeira, adaptado de [36].

Ao analisar os valores de  $U_f$  apresentados na Figura 4.1, para cada tipo de caixilho, é fácil verificar que os caixilhos de PVC apresentam melhores valores, sendo mais eficientes para efeitos de isolamento térmico.

Para as soluções selecionadas, no Quadro 4.4, é apresentada a massa das componentes que constituem a janela.

Quadro 4.4 – Massa das componentes por  $1,82 \text{ m}^2$  de área da janela, adaptado de [36].

| Alumínio | Massa dos componentes [Kg/1,82 m <sup>2</sup> ] |         |           |            |       |      |          |                |       |                  |
|----------|---|---------|-----------|------------|-------|------|----------|----------------|-------|------------------|
|          | Vidro   | vedante | Espaçador | Dessecante | Árgon | PVB  | Alumínio | Corte térmico  | Junta | Proteção         |
| DA       | 34,35   | 0,26    | 0,34      | 0,23       | 0,03  | -    | 14,96    | 4,03           | 1,47  | 2,18             |
| DB       | 27,48   | 0,29    | 0,37      | 0,26       | 0,03  | -    | 14,97    | 4,03           | 1,47  | 2,18             |
| DD       | 34,35   | 0,29    | 0,37      | 0,26       | 0,03  | 0,1  | 14,93    | 4,03           | 1,47  | 2,18             |
| TA       | 42,36   | 0,86    | 0,95      | 0,83       | 0,08  | -    | 15,75    | 2,16           | 2,64  | 1,45             |
| TB       | 49,42   | 0,48    | 0,56      | 0,45       | 0,04  | 0,47 | 16,06    | 2,16           | 2,64  | 1,45             |
| PVC      | Massa dos componentes [Kg/1,82 m <sup>2</sup> ] |         |           |            |       |      |          |                |       |                  |
|          | Vidro   | vedante | Espaçador | Dessecante | Árgon | PVB  | PVC      | Aço inoxidável | Junta | Ligação interior |
| DA       | 33,65   | 0,26    | 0,34      | 0,23       | 0,03  | -    | 13,12    | 11             | 0,81  | 1,46             |
| DB       | 26,92   | 0,28    | 0,36      | 0,26       | 0,03  | -    | 13,14    | 11             | 0,81  | 1,46             |
| DD       | 33,65   | 0,28    | 0,36      | 0,26       | 0,03  | 0,09 | 13,08    | 11             | 0,81  | 1,46             |
| TA       | 39  | 0,79    | 0,87      | 0,77       | 0,08  | -    | 15,72    | 14,81          | 0,84  | 0,7              |
| TB       | 45,5  | 0,44    | 0,52      | 0,42       | 0,04  | 0,43 | 15,17    | 13,36          | 0,65  | 0,7              |
| Madeira  | Massa dos componentes [Kg/1,82 m <sup>2</sup> ] |         |           |            |       |      |          |                |       |                  |
|          | Vidro   | vedante | Espaçador | Dessecante | Árgon | PVB  | Madeira  | Junta          |       |                  |
| DA       | 33,65   | 0,26    | 0,34      | 0,23       | 0,03  | -    | 15,44    | 1,24           |       |                  |
| DB       | 26,92   | 0,28    | 0,36      | 0,26       | 0,03  | -    | 15,48    | 1,24           |       |                  |
| DD       | 33,65   | 0,28    | 0,36      | 0,26       | 0,03  | 0,09 | 15,39    | 1,24           |       |                  |
| TA       | 40,38   | 0,82    | 0,9       | 0,8        | 0,08  | -    | 14,64    | 1,24           |       |                  |
| TB       | 47,11   | 0,46    | 0,54      | 0,04       | 0,04  | 0,44 | 15,1     | 1,24           |       |                  |

No Quadro 4.5 apresentam-se os coeficientes de transmissão térmica da janela,  $U_w$ , calculados de acordo com a norma ISO 10077-2:2017.

Quadro 4.5 – Valores de  $U_w$  das soluções envidraçadas selecionadas para cada tipo de caixilho, adaptado de [36].

| Solução envidraçada | Alumínio              | PVC  | Madeira |
|---------------------|-----------------------|------|---------|
|                     | $U_w [W/m^2 \cdot k]$ |      |         |
| DA                  | 1,39                  | 1,16 | 1,24    |
| DB                  | 1,46                  | 1,23 | 1,31    |
| DD                  | 2,56                  | 2,31 | 2,4     |
| TA                  | 0,87                  | 0,74 | 0,87    |
| TB                  | 1,1                   | 0,96 | 1,09    |

Após aplicação das soluções envidraçadas a cada um dos perfis de caixilho em estudo, é possível verificar que para todas as soluções envidraçadas, Quadro 4.5, o caixilho de PVC é o mais eficiente no isolamento térmico proporcionado à janela. Relativamente à composição do vidro, é fácil de verificar que o vidro triplo, temperado e com revestimento de baixa emissividade apresenta eficiência térmica superior. No entanto este resultado também é influenciado pela espessura superior da caixa de ar.

Para além da influência no coeficiente de transmissão térmica, a informação disponibilizada no Quadro 4.4 é relevante para a análise do ciclo de vida das janelas. É possível estabelecer uma comparação entre os componentes existentes em cada perfil e o impacto causado no meio ambiente tendo em conta todo o processo desde a sua extração até ao seu destino final. Assim, é fácil verificar que o perfil com menos impactos ambientais incorporados é de madeira, material de origem natural. Em relação ao perfil de PVC, este contribui com uma pegada de carbono duas vezes superior à da madeira, enquanto a do alumínio é quatro vezes superior à da madeira. Para além disso, é fácil verificar que o vidro representa grande parte da área total da janela, pelo que representa cerca de 62% dos impactos incorporados [36].

#### 4.2.1.2 Influência do caixilho

Numa análise mais aprofundada à influência dos caixilhos no isolamento térmico, fez-se uma seleção aos dados obtidos no estudo [37], realizado na Hungria, ao caixilho de madeira para várias dimensões de janela. Este segue as normas EN ISO 10077-1 e EN ISO 10077-2 de acordo com as condições limite estipuladas, Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Condições limite de aplicação.

|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| $T_{int}$ | 20 °C                    |
| $T_{ext}$ | 0 °C                     |
| $R_{si}$  | 0,13 m <sup>2</sup> .K/m |
| $R_{se}$  | 0,04 m <sup>2</sup> .K/m |
| $\psi_g$  | 0,06 W/m.K               |

A janela base, apresentada como caso de estudo, possui um caixilho com dimensões 1160 mm x 1460 mm e espessura de 92 mm, um vidro triplo de 4 mm com caixas de ar de 18 mm (4-18-4-18-4), preenchidas com argon. O vidro possui um espaçador de aço inoxidável e revestimento de baixa emissividade nos dois painéis externos. O resultado do coeficiente de transmissão térmica desta janela é de  $U_w = 0,6718 [W/m^2.K]$ .

Por forma a verificar a influência da área do caixilho no desempenho térmico da janela efetuou-se o cálculo do coeficiente de transmissão térmica para 15 janelas com diferentes dimensões, sendo que estas iam aumentando. As dimensões iniciais eram de 560 mm x 560 mm, com incrementos de 100 mm até atingir as dimensões máximas de 1960 x 1960 mm. O cálculo do

coeficiente de transmissão térmica da janela seguiu o método descrito na norma EN ISO 10077-1:2005, recorrendo à equação (2) enquanto o coeficiente de transmissão térmica do caixilho seguiu o método descrito na norma 10077-2:2004, recorrendo à equação (5). Todo o procedimento atendeu às condições limite apresentadas no Quadro 4.6.

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p b_p}{b_f} \quad (5)$$

Em que:

$U_f$  – é o coeficiente de transmissão térmica do caixilho,  $[W/m^2 \cdot K]$ ;

$L_f^{2D}$  – é o coeficiente de transmissão de calor unidade de comprimento de secção com painel de substituição,  $[W/m^2 \cdot K]$ ;

$U_p$  – é o coeficiente de transmissão de calor do painel,  $[W/m^2 \cdot K]$ ;

$b_p$  – é a largura de projeção do caixilho, [m];

$b_f$  – é a largura visível do painel, [m].

Após obtenção dos resultados é possível verificar que a proporção do caixilho variou entre 25% (nas janelas maiores) e 60% (nas janelas menores), Figura 4.2.

Os resultados apresentados na Figura 4.2 ilustram de forma clara que a proporção do caixilho tem uma influência bastante significativa no isolamento térmico da janela, sendo que quanto menor for a proporção do caixilho, menor será o valor de  $U_w$ . Analisando os resultados verifica-se que a diferença dos valores do  $U_w$  entre as janelas de maiores e menores dimensões pode atingir 20%.

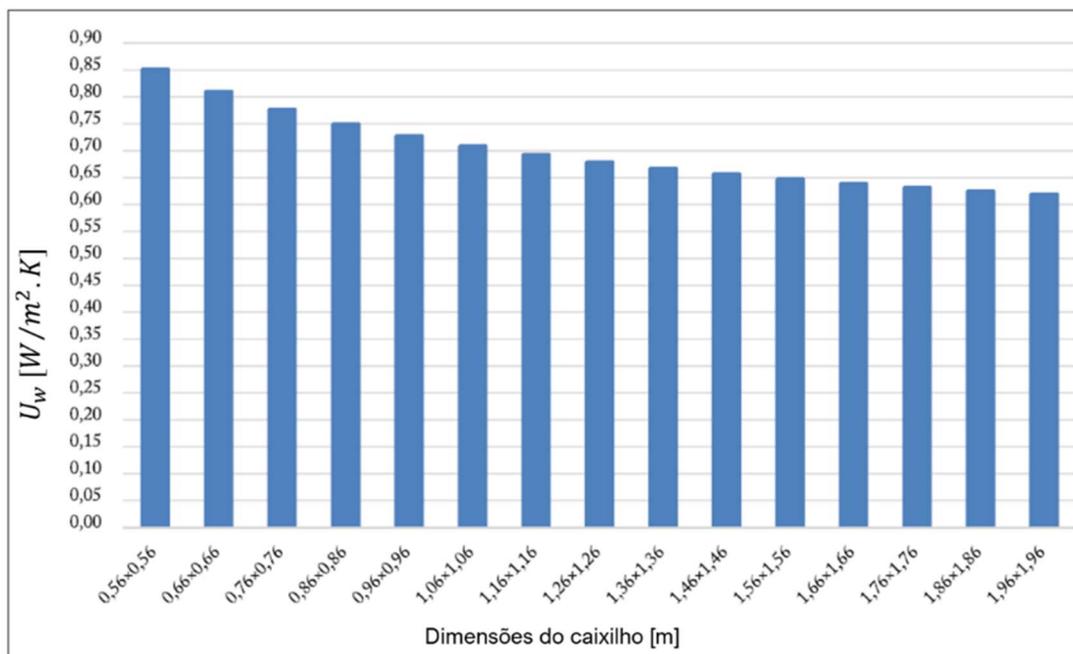


Figura 4.2 – Coeficiente de transmissão térmica da janela em função da dimensão do caixilho, adaptado de [37].

#### 4.2.1.3 Espessura da caixa de gás

Uma forma de aferir a influência da espessura da caixa de gás é através da variação da mesma para vidros de massa igual. Em [41] foi realizada esta verificação para uma janela de correr com vidro duplo. Os dois vidros são iguais e têm 4 mm de espessura e 1,2 m<sup>2</sup> de área. A espessura da caixa de gás varia de 2 mm a 14 mm com incrementos de 2 mm.

No Quadro 4.7 são fornecidos os valores da resistência térmica do ar e da resistência térmica total. O coeficiente de transmissão térmica da janela é o inverso da resistência térmica total, sendo que esta última inclui os valores das resistências superficiais. No Quadro 4.7 é possível observar o coeficiente de transmissão térmica da janela, por forma a tornar explícita a influência da espessura da caixa de gás no isolamento térmico.

Quadro 4.7 – Influência da espessura da caixa de gás no desempenho térmico.

| ID | Vidro 1 [mm] | Caixa de ar [mm] | Vidro 2 [mm] | R <sub>ar</sub> [m <sup>2</sup> .°C/W] | R <sub>T</sub> [m <sup>2</sup> .°C/W] | U = 1/R <sub>T</sub> [W/m <sup>2</sup> .°C] |
|----|--------------|------------------|--------------|--|---------------------------------------|---|
| 1  | 4            | 2                | 4            | 0,064                                  | 0,1976496                             | 5,1   |
| 2  | 4            | 4                | 4            | 0,128                                  | 0,2617521                             | 3,8   |
| 3  | 4            | 6                | 4            | 0,192                                  | 0,3258547                             | 3,1   |
| 4  | 4            | 8                | 4            | 0,256                                  | 0,3899573                             | 2,6   |
| 5  | 4            | 10               | 4            | 0,321                                  | 0,4540598                             | 2,2   |
| 6  | 4            | 12               | 4            | 0,385                                  | 0,5181624                             | 1,9   |
| 7  | 4            | 14               | 4            | 0,449                                  | 0,582265                              | 1,7   |

Observando o Quadro 4.7 verifica-se que com o aumento da espessura da caixa de gás dá-se o aumento da resistência térmica, o que conseqüentemente leva à diminuição do coeficiente de transmissão térmica. Para se conseguir perceber de que forma evolui o desempenho térmico com o aumento da espessura da caixa de gás, procedeu-se à realização de um gráfico onde apenas se apresenta o valor de  $U_w$  com o aumento da espessura, Figura 4.3.

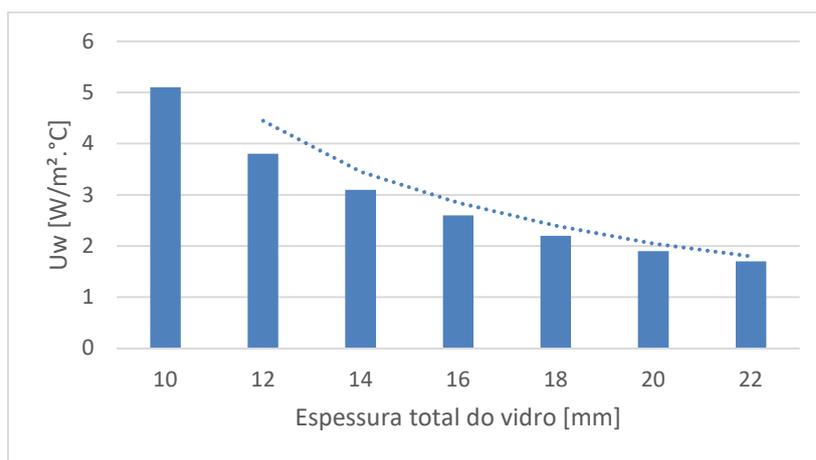


Figura 4.3 – Valores de  $U_w$  em função da espessura da caixa de gás.

A Figura 4.3 sugere que há um decréscimo no aumento do desempenho térmico do vidro à medida que vai aumentando a espessura da caixa de gás. Assim, o aumento da espessura compensa mais quando ainda temos espessuras baixas.

## 4.2.2 Isolamento sonoro de janelas

### 4.2.2.1 Influência de frinchas e aberturas

Uma janela totalmente ou parcialmente aberta influencia os níveis sonoros sentidos no interior dos edifícios, tendo grande influência na perturbação do sono e na classificação do incómodo [45].

Em [42], efetuou-se uma análise por forma a quantificar o efeito que defeitos na vedação, frinchas e aberturas tem no desempenho acústico das janelas, através de ensaios de acordo com as normas EN ISO 10140, partes 1-5 de 2010 e EN ISO 717-1:2013.

No Quadro 4.9 são apresentadas as configurações das janelas em estudo e as respetivas soluções de vedantes aplicados. As configurações das janelas do ensaio A encontram-se representadas na Figura 4.4.

Quadro 4.9 – Configurações das janelas em estudo, adaptado de [42].

| Ensaio | Painéis de vidro                  | Solução de vedantes |
|--------|-----------------------------------|---------------------|
| A      | G1 4-40,5-4                       | I e II              |
|        | G2 4-22-4-12-4                    |                     |
|        | N1 4-15-4                         |                     |
|        | N2 4-10-4/PVB/4                   |                     |
|        | L1 8-20-4/PVB/4                   |                     |
|        | L2 4-12-4-12-4                    |                     |
| B      | V1 Vidro duplo                    | III                 |
|        | V2 Vidro duplo com um laminado    | III                 |
|        | M1 Vidro duplo com dois laminados | IV                  |

I – Abertura de 10 mm na junta de vedação (duas na parte superior e outras duas na parte inferior).  
 II – Frincha de 5 a 6 mm devido à remoção da junta de vedação.  
 III – Abertura superior para dentro de 50-100 mm entre o caixilho e o peitoril (janela inclinada).  
 IV – Abertura inferior para fora de 50-100 mm entre o caixilho e o peitoril (janela inclinada).

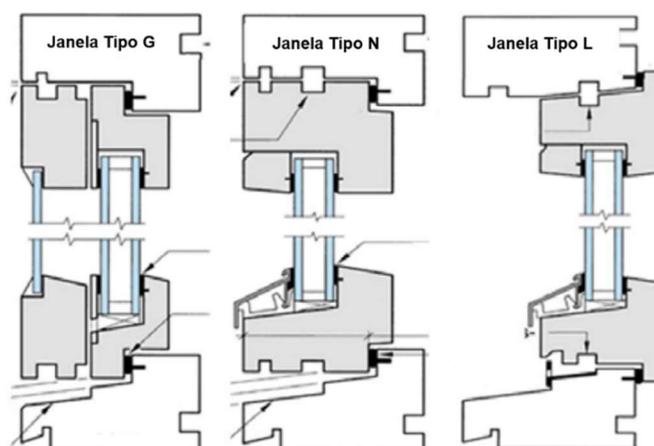


Figura 4.4 – Configurações das janelas do teste A, adaptado de [42].

Verificam-se algumas diferenças nas configurações de janelas apresentadas na Figura 4.4. A janela do tipo G apresenta os perfis de caixilharia unidos, a janela do tipo N possui a abertura para o exterior enquanto a janela do tipo L possui abertura para o interior.

Os resultados obtidos para a configuração padrão (vedantes normais, sem cortes) das juntas de vedação (I) do ensaio A são apresentados na Figura 4.5 para a gama de frequências de 50 Hz a 5000 Hz, onde se verifica que para as altas frequências, as limitações decorrem da combinação de frequências críticas dos vidros com os efeitos na vedação. Nas frequências compreendidas entre 100 Hz e 250 Hz, os valores do índice de redução sonora desfavoráveis devem-se às ressonâncias do conjunto dos diferentes vidros.

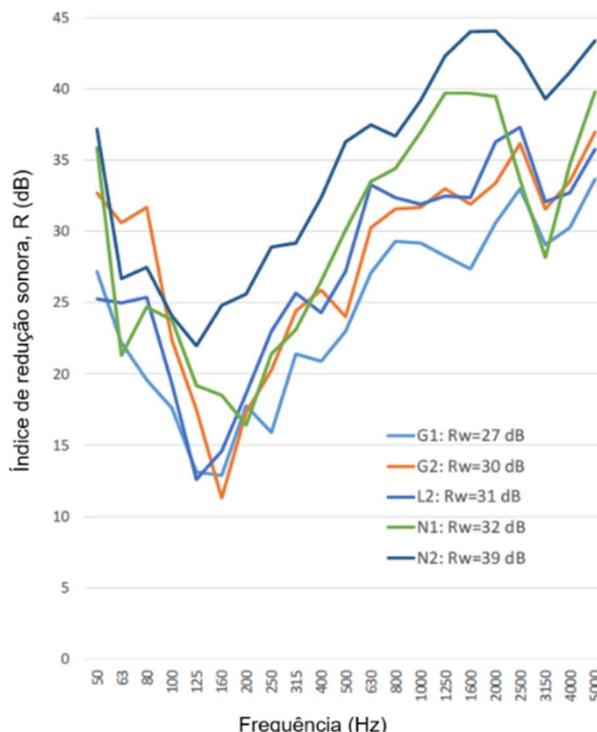


Figura 4.5 – Índice de redução sonora das janelas do teste A, para a configuração padrão de vedantes, adaptado de [42].

Para além da observação do ensaio A para as configurações padrão, e com a finalidade de estabelecer uma comparação entre as soluções de vedação, apresentam-se na Figura 4.6, as diferenças entre os resultados das primeiras e os obtidos para as soluções de vedação I e II do mesmo ensaio.

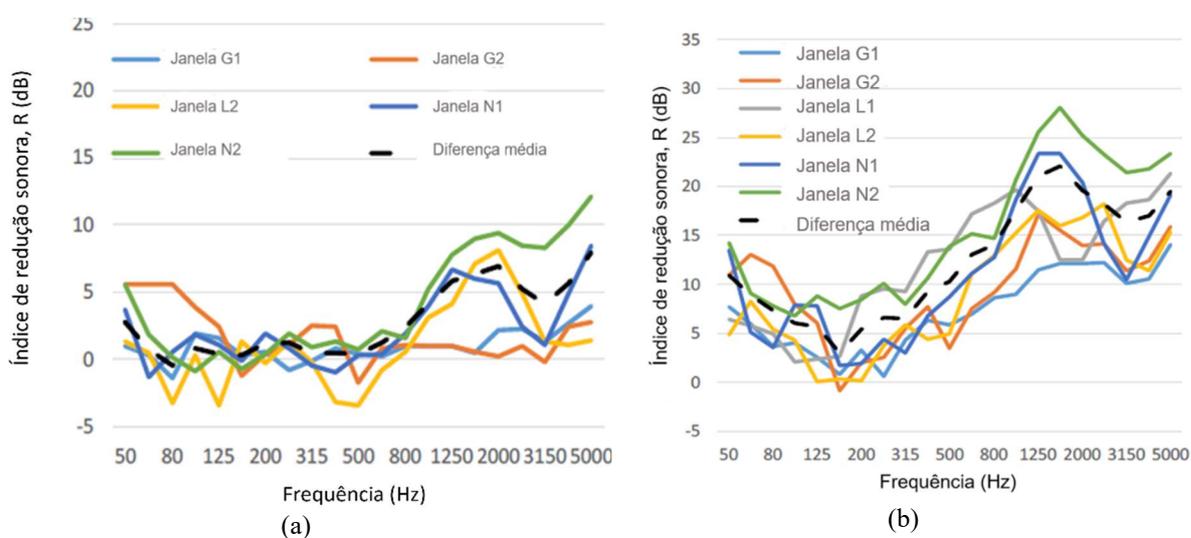


Figura 4.6 – Diferenças da redução sonora: (a) solução vedante I; (b) solução vedante II, adaptado de [42].

Na Figura 4.6 (a), os resultados demonstram uma diferença acentuada de isolamento sonoro na gama das altas frequências, acima dos  $\approx 600$  Hz, devido às aberturas de 5 mm x 10 mm presentes nas juntas de vedação. Na Figura 4.6 (b), as diferenças fazem-se notar em todas as frequências, estando compreendidas entre os 5 dB e os 10 dB, sendo mais evidentes nas altas frequências, facto que se deve à abertura de 5 a 6 mm entre o caixilho e o peitoril.

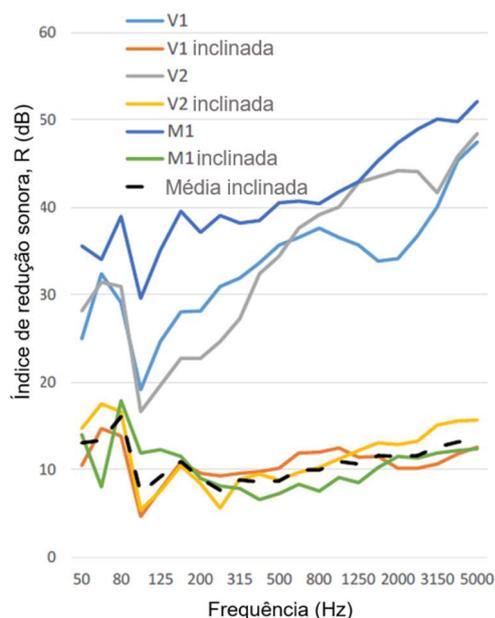


Figura 4.7 – Índice de redução sonora do teste B, para janelas fechadas e inclinadas, adaptado de [42].

Na Figura 4.7 apresentam-se os resultados obtidos quando se considera o ensaio B para janelas fechadas e inclinadas. Independentemente das propriedades de isolamento acústico dos painéis de vidro, verifica-se que o espaço entre a janelas e o aro devido à posição inclinada da abertura da janela tem uma grande preponderância no índice de redução sonora (inclinação superior V1 e V2). A diferenças nas baixas frequências são menos acentuadas enquanto nas altas frequências é claro o crescimento do índice de redução sonora. O Quadro 4.10 apresenta os resultados exatos do índice de redução sonora obtidos das medições para as várias configurações.

Quadro 4.10 – Índice de redução sonora ponderado das janelas para os ensaios A e B, adaptado de [42].

| Tipo de janela | $R_w$           |                 |                           |                       |
|----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|
|                | Posição fechada | Abertura 5x10mm | Junta de vedação removida | Posição de inclinação |
| G1             | 27              | 26              | 19                        | -                     |
| G2             | 30              | 29              | 20                        | -                     |
| L2             | 31              | 29              | 18                        | -                     |
| N1             | 32              | 30              | 19                        | -                     |
| N2             | 39              | 34              | 19                        | -                     |
| V1             | 36              | -               | -                         | 11                    |
| V2             | 37              | -               | -                         | 12                    |
| M1             | 43              | -               | -                         | 9                     |

### 4.2.3 Isolamento sonoro de fachadas

#### 4.2.3.1 Influência das janelas no isolamento sonoro das fachadas

No estudo apresentado em [38] pretende-se avaliar o isolamento sonoro das fachadas a sons de baixa frequência. Segundo este, o isolamento sonoro das fachadas depende não só dos elementos da parede em si, mas também da combinação de todos os componentes e da sua ligação, como as janelas, saídas de ar, instalação da janela e os vedantes. Estes componentes são geralmente o elo mais fraco na fachada, sendo que determinam o isolamento sonoro em relação às fontes de ruído externo.

Este estudo realizou-se no SP Technical Research Institute of Sweden, num edifício demonstrador, recorrendo à técnica de medição de sequência de comprimento máximo (MLS), por forma a medir a resposta para várias frequências. Procedeu-se à montagem de um microfone no lado exterior da janela e outro no interior para medição dos níveis sonoros em 13 posições uniformemente distribuídas. A fonte sonora eram 4 subwoofers. Os resultados das medições encontram-se na Figura 4.8.

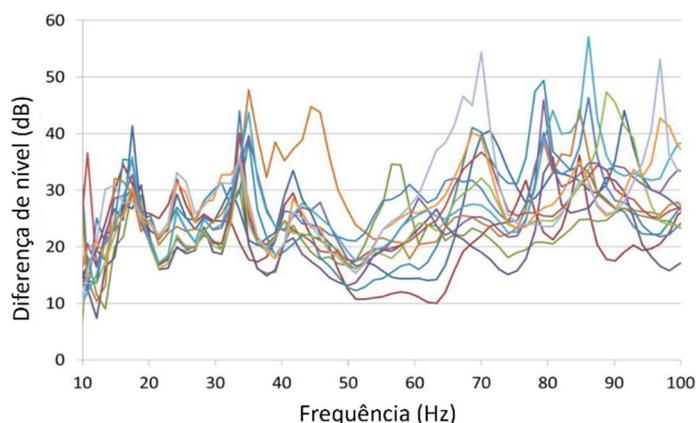
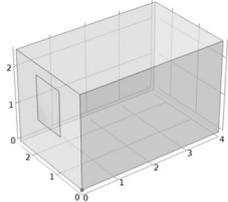
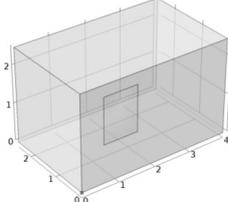
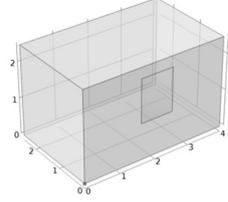


Figura 4.8 – Diferença de nível sonoro entre o exterior e as 13 posições do microfone no interior.

A Figura 4.8 mostra que os níveis de pressão sonora podem ter uma dispersão de cerca de 20 dB entre as posições do microfone em determinadas frequências. Este resultado deve-se ao comportamento modal do compartimento e à forma como os modos individuais são excitados pelos altifalantes posicionados no exterior.

Para se verificar a influência da posição da janela na fachada recorre-se à modelação, através do método dos elementos finitos, de um quarto com uma janela de dimensões 0,9 m x 1,2 m e com um painel de vidro de 6 mm de espessura. A modelação foi realizada para três configurações de fachada distintas, apresentadas no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 – Configurações de janela ensaiadas e representação esquemática, adaptado de [38].

|                |  |   |
|----------------|--|---|
| Configuração 1 | Janela colocada simetricamente no lado de menor área da sala   |  |
| Configuração 2 | Janela colocada assimetricamente no lado de maior área da sala |  |
| Configuração 3 | Janela colocada simetricamente no lado de maior área da sala   |  |

As configurações simétricas geralmente apresentam um desempenho inferior em comparação com as configurações assimétricas. Os resultados dos ensaios encontram-se na Figura 4.9.

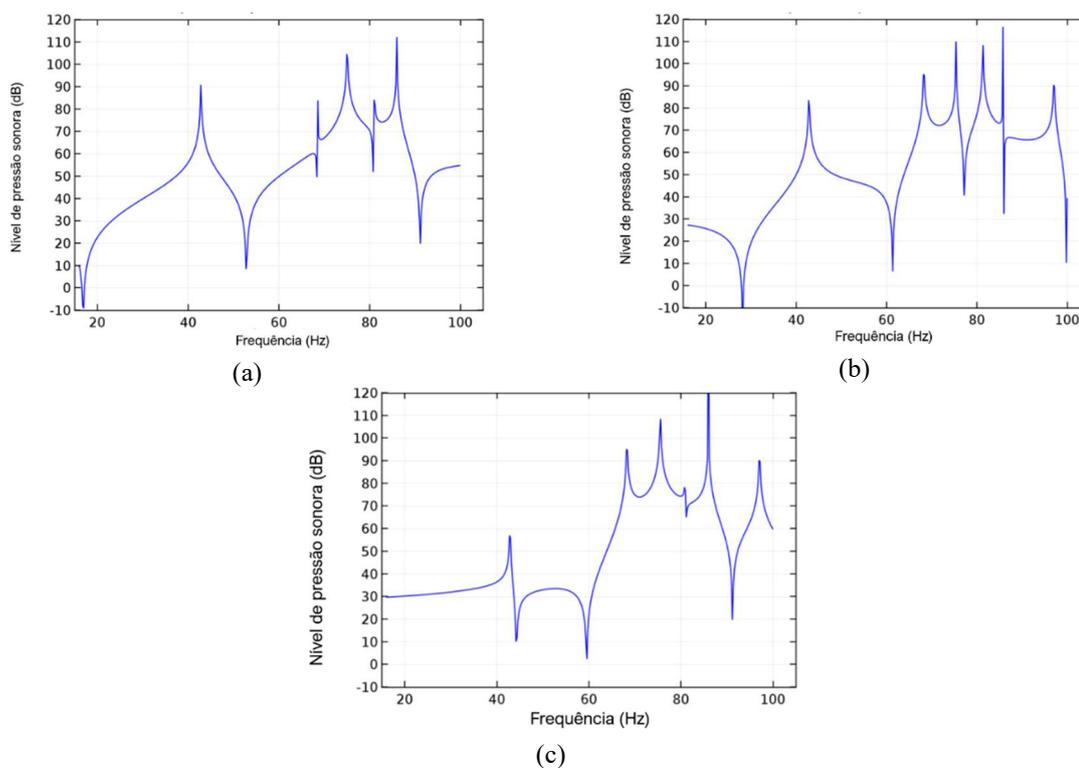


Figura 4.9 – Níveis de pressão sonora para as diferentes configurações: (a) configuração 1, (b) configuração 2, (c) configuração 3, adaptado de [38].

---

Na Figura 4.9, comparando as janelas colocadas no lado comprido da simulação de fachada, verifica-se que a configuração assimétrica (Fig. 4.8 (b)) apresenta níveis de pressão sonora mais elevados na faixa de frequência de 40 a 60 Hz do que a configuração simétrica (Fig. 4.8 (c)). Os níveis de pressão sonora mais baixos da configuração 3 confirmam que o 1º modo próprio de vibração na direção do compartimento é excitado de forma menos eficiente em comparação com a janela colocada assimetricamente, o que resulta no nível sonoro interior substancialmente mais baixo para essa faixa de frequências específicas.

#### ***4.2.3.2 Influência do caixilho no desempenho de fachadas-cortina de vidro e alumínio***

Atualmente, segundo [39], as janelas com molduras de alumínio são as mais utilizadas para a construção de fachadas modernas, não só devido à resistência fornecida, mas também devido à eficiência e fácil instalação. A transmissão sonora ocorrida pela fenestração dá-se pelos vidros, enquadramento do caixilho e através de elementos opacas.

O caixilho de alumínio, apesar de possuir menor área que o envidraçado, considera-se mais prejudicial para o isolamento acústico devido à presença de cavidades e perfurações destinadas a drenagem e ventilação. Para otimização do isolamento sonoro transmitido pelas fachadas, é frequentemente introduzido de material absorvente nas zonas opacas.

O caixilho é a estrutura de suporte para os vidros da fachada cujo tipo de construção tem impacto na transmissão sonora. A solução mais utilizada é em alumínio com corte térmico uma vez que estes apresentam uma boa durabilidade e resistência, sendo mais baratos e com poucas necessidades de manutenção em relação a outros materiais (PVC, madeira, fibra de vidro, compostos e aço).

O efeito da moldura de alumínio, com corte térmico, no desempenho da combinação “vidro + caixilho” em comparação com o desempenho demonstrado pelo vidro sem influência do caixilho é quase insignificante quando o vidro não é melhorado. O mesmo não se verifica para vidros com desempenho acústico melhorado, sendo evidente a influência do caixilho no pior isolamento a sons de condução aérea [39].

Por forma a verificar a influência do caixilho no isolamento sonoro tendo em conta o vidro utilizado é apresentado na Figura 4.10 o índice de redução sonora, obtido através de cálculos, para um vidro laminado e um vidro não laminado, com e sem o caixilho [39].

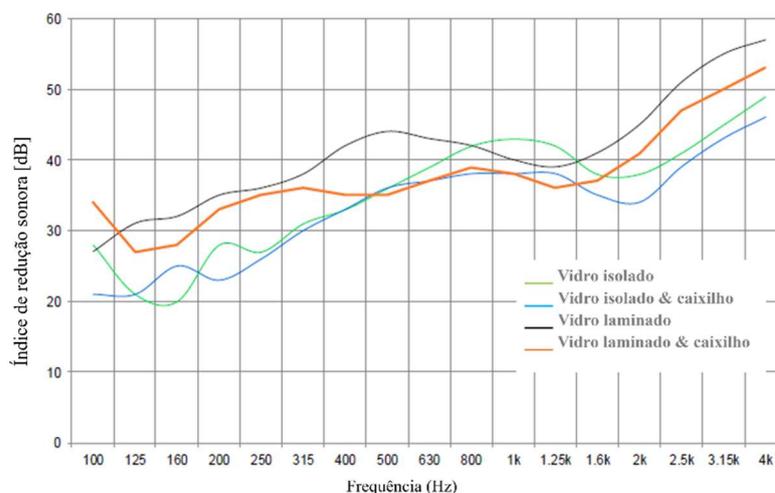


Figura 4.10 – Comparação entre índice de redução sonora para um vidro isolado e um laminado, com e sem o caixilho, adaptado de [39].

Como era de esperar, através da análise da Figura 4.10, verifica-se que o vidro laminado apresenta um melhor isolamento a sons de condução aérea do que o vidro não laminado. No entanto, ao analisar o que acontece quando é introduzido o caixilho em ambas as soluções de vidro, percebe-se que o caixilho tem maior influência nos vidros laminados, reduzindo bastante o seu desempenho. Isto deve-se à grande diferença de isolamento proporcionada por cada um dos componentes em separado, pelo que o vidro melhorado (laminado) tende mesmo a apresentar melhores valores de índice de redução sonora. Quando combinado com o caixilho vai apresentar valores semelhantes aos obtido para o vidro não laminado.

O efeito da influência da espessura do caixilho demonstra-se na Figura 4.11.

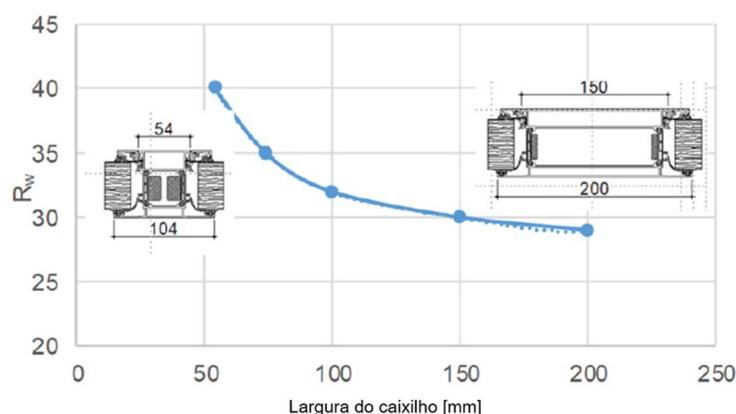


Figura 4.11 – Índice de redução sonora ponderado para várias espessuras do caixilho, adaptado de [39].

### 4.3 Desempenho térmico versus acústico de janelas

Na tentativa de relacionar o isolamento térmico e o isolamento acústico de janelas, no artigo “*Energy and acoustic performances of Windows and their correlacion*” [15], é analisado o efeito causado no comportamento das janelas, a espessura e material do caixilho, espessura do vidro, tratamento de baixa emissão, espessura total, presença de PVB (polivinil butiral) e a espessura do PVB, espessura da caixa de gás, espaçadores de isolamento térmico e inserção de gases nobres (Figura 4.12). Estudou-se uma amostra primária de vidro, vidro simples e laminado com e sem PVB, em que os parâmetros analisados foram o índice de isolamento sonoro ( $R_w$ ) e o coeficiente de transmissão térmica da janela ( $U_w$ ), uma vez que se consideram ser os parâmetros representativos do desempenho da janela.

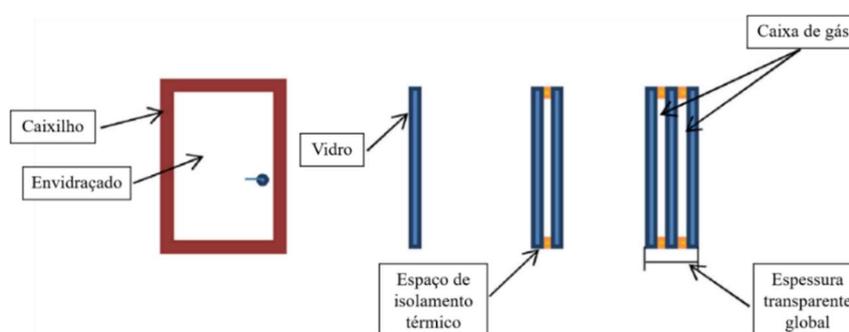


Figura 4.12 – Representação esquemática da janela. Vista frontal, vidros simples, duplos e triplo; adaptado de [15]

Analisaram-se 46 tipos de janela diferentes, em que as matérias-primas utilizadas nos caixilhos foram a madeira, o alumínio e o PVC. O desempenho acústico das janelas foi obtido através de ensaios de acordo com a norma ISO 10140:2010, para as dimensões padrão 1,23 m x 1,48 m, e para obtenção dos valores de  $U_w$ , recorreu-se ao seu cálculo através das normas 10077-1:2006 e 10077-2:2012. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 4.12.

O principal objetivo do estudo era a correlação entre o isolamento térmico e acústico. No entanto não foi possível estabelecer correlações claras. Com os valores de  $U_w$  obtidos, Quadro 4.12, foi feita a comparação com os componentes isolados (caixilho, vidro e caixa de gás). No entanto, verificou-se que não há uma relação direta de nenhum componente isolado com o desempenho final, mas os componentes em conjunto contribuem para o desempenho térmico final. A mesma análise efetuou-se em relação aos valores de  $R_w$ . Verificou-se a influência que o PVB tem na redução do fenómeno de coincidência e que, de uma forma geral, o aumento da espessura do vidro e da caixa de gás aumentam o isolamento nas altas e por vezes nas baixas frequências. Os valores obtidos para os diferentes tipos de caixilho apresentam bom desempenho térmico e acústico, pelo que a melhor solução de caixilho a selecionar é o de madeira, uma vez que o seu impacto no meio ambiente é mínimo.

Quadro 4.12 – Descrição e resultados das janelas estudadas, adaptado de [15].

| Código   | Vidro I<br>[mm] | Espaço<br>gás<br>[mm] | Vidro II<br>[mm] | Espaço<br>gás<br>[mm] | Vidro III<br>[mm] | $R_w$<br>[dB] | $U_w$<br>[W/m <sup>2</sup> .k] |      |
|----------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|------|
| Madeira  | 1               | 3/PVB/3               | 16               | 4                     | -                 | -             | 37                             | 1,3  |
|          | 2               | 4/PVB/4               | 12               | 4                     | 12                | 3/PVB/3       | 38                             | 1,1  |
|          | 3               | 4/PVB/4               | 24               | 4                     | 14                | 4/PVB/4       | 38                             | -    |
|          | 4               | 6                     | 12               | 4                     | -                 | -             | 38                             | -    |
|          | 5               | 3/PVB/3               | 16               | 4                     | 16                | 3/PVB/3       | 39                             | 0,76 |
|          | 6               | 3/PVB/3               | 18               | 4                     | 18                | 3/PVB/3       | 39                             | -    |
|          | 7               | 4/PVB/4               | 15               | 3/PVB/3               | -                 | -             | 39                             | -    |
|          | 8               | 4/PVB/4               | 15               | 3/PVB/3               | -                 | -             | 39                             | 1,3  |
|          | 9               | 5/PVB/5               | 15               | 3/PVB/3               | -                 | -             | 39                             | 1,3  |
|          | 10              | 8/PVB/9               | 16               | 6/PVB/6               | -                 | -             | 39                             | -    |
|          | 11              | 3/PVB/3               | 12               | 4                     | -                 | -             | 39                             | -    |
|          | 12              | 4/PVB/4               | 16               | 3/PVB/3               | -                 | -             | 40                             | 1,3  |
|          | 13              | 3/PVB/3               | 15               | 5                     | -                 | -             | 40                             | -    |
|          | 14              | 3/PVB/3               | 15               | 4                     | -                 | -             | 40                             | -    |
|          | 15              | 4/PVB/4               | 15               | 3/PVB/3               | -                 | -             | 40                             | -    |
|          | 16              | 4/PVB/4               | 15               | 5/PVB/5               | -                 | -             | 40                             | 1,3  |
|          | 17              | 4/PVB/4               | 9                | 6                     | -                 | -             | 40                             | -    |
|          | 18              | 3/PVB/3               | 9                | 3/PVB/3               | -                 | -             | 41                             | -    |
|          | 19              | 4/PVB/4               | 16               | 4                     | 16                | 4/PVB/4       | 41                             | 0,9  |
|          | 20              | 4/PVB/4               | 16               | 6/PVB/6               | -                 | -             | 41                             | 1,3  |
|          | 21              | 4/PVB/4               | 16               | 6/PVB/6               | -                 | -             | 42                             | 1,3  |
|          | 22              | 4/PVB/4               | 14               | 4                     | 14                | 4/PVB/4       | 43                             | 0,9  |
|          | 23              | 4/PVB/4               | 14               | 4                     | 14                | 3/PVB/3       | 43                             | -    |
|          | 24              | 3/PVB/3               | 14               | 6                     | 14                | 3/PVB/3       | 44                             | -    |
|          | 25              | 4/PVB/4               | 14               | 4                     | 14                | 4/PVB/4       | 44                             | 0,8  |
|          | 26              | 6/PVB/6               | 12               | 6                     | 12                | 6/PVB/6       | 44                             | 0,9  |
|          | 27              | 6/PVB/6               | 12               | 6                     | 12                | 4/PVB/4       | 44                             | 0,9  |
|          | 28              | 4/PVB/4               | 15               | 4                     | 15                | 5/PVB/5       | 44                             | -    |
|          | 29              | 4/PVB/4               | 14               | 4                     | 14                | 4/PVB/4       | 45                             | 0,77 |
|          | 30              | 6/PVB/6               | 16               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 47                             | 1,3  |
| Alumínio | 31              | 4/PVB/4               | 20               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 42                             | 0,9  |
|          | 32              | 6/PVB/6               | 20               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 43                             | 0,9  |
|          | 33              | 5/PVB/5               | 16               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 43                             | 1,6  |
|          | 34              | 6/PVB/4               | 12               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 44                             | 1,1  |
|          | 35              | 6/PVB/6               | 20               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 45                             | 1,6  |
|          | 36              | 8/PVB/9               | 15               | 6/PVB/4               | -                 | -             | 46                             | 1,1  |
|          | 37              | 6/PVB/6               | 24               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 46                             | 0,9  |
| PVC      | 38              | 4                     | 22               | 4                     | -                 | -             | 35                             | 1,3  |
|          | 39              | 6                     | 22               | 4                     | -                 | -             | 38                             | 1    |
|          | 40              | 6                     | 20               | 4                     | 20                | 4             | 40                             | 0,7  |
|          | 41              | 4/PVB/4               | 20               | 3/PVB/3               | -                 | -             | 41                             | 1,3  |
|          | 42              | 4/PVB/4               | 18               | 4                     | 18                | 3/PVB/3       | 43                             | 0,7  |
|          | 43              | 4/PVB/4               | 18               | 4                     | 15                | 4/PVB/4       | 43                             | 0,7  |
|          | 44              | 4/PVB/4               | 20               | 3/PVB/3               | -                 | -             | 44                             | 1,3  |
|          | 45              | 6/PVB/6               | 18               | 4/PVB/4               | -                 | -             | 44                             | 1,3  |
|          | 46              | 4/PVB/4               | 18               | 4                     | 15                | 4/PVB/4       | 45                             | 0,7  |

## 5 ANÁLISE CRÍTICA DO IMPACTO DE ALTERAÇÃO DE COMPONENTES

### 5.1 Introdução

Para analisar o impacto causado pela alteração de componentes em várias soluções de vidros, começou-se por estabelecer um vidro padrão para cada tipo de solução (simples, duplo e triplo), considerando as mesmas dimensões para todas as soluções. A avaliação da influência de cada componente realizou-se procedendo à variação de algumas componentes nas restantes soluções. Estas foram selecionadas tendo em conta o disponibilizado em cada uma das ferramentas dos fabricantes, permitindo a análise das propriedades térmicas e acústicas.

A análise de sensibilidade das características dos vidros a nível do desempenho térmico e acústico incluiu vidros simples apenas para comparação com outras soluções e não para o uso desta solução, uma vez que apresenta desvantagens tanto em termos térmicos como acústicos.

A caracterização das soluções e alterações efetuadas encontra-se descrita no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Caracterização das soluções envidraçadas

|         | ID                 | Composição [mm]                                     | Alteração  |
|---------|--------------------|---|--|
| Simples | <b>SF1</b>         | <b>4</b>  | <b>Padrão</b>                                    |
|         | SL1                | 44.1  | Laminado   |
| Duplo   | <b>DF2</b>         | <b>4-12-4</b>                                       | <b>Padrão</b>                                    |
|         | DF2V2              | 4-12-8  | Espessura vidro II                               |
|         | DF2C               | 4-24-4  | Caixa de ar                                      |
|         | DFL                | 4-12-44.1   | 1 laminado                                       |
|         | DL2S               | 44.1-12-44.1  | 2 laminados simétricos                           |
|         | DL2A               | 44.1-12-66.1  | 2 laminados assimétricos                         |
|         | DL2CA1             | 44.1*-12-44.1                                       | 2 laminados, 1 com película de controle acústico |
|         | DL2CA2             | 44.1*-12-44.1*                                      | 2 laminados com película de controle acústico    |
|         | Solar              | 4-12-4  | 1 película de controlo solar                     |
|         | Low-E              | 4-12-4  | 1 película de baixa emissividade                 |
| Triplo  | <b>TF3</b>         | <b>4-12-4-12-4</b>                                  | <b>Padrão</b>                                    |
|         | TF3V2              | 4-12-8-12-4   | Espessura vidro II                               |
|         | TF3V13S            | 8-12-4-12-8   | Espessura vidro I e III simétrico                |
|         | TF3V13A            | 8-12-4-12-12  | Espessura vidro I e III assimétrico              |
|         | TF3C2              | 4-12-4-20-4   | Caixa ar II                                      |
|         | TF2L1              | 44.1-12-4-12-4                                      | 1 laminado                                       |
|         | TF1L2S             | 44.1-12-4-12-44.1                                   | 2 laminados simétricos                           |
|         | TF1L2A             | 44.1-12-4-12-66.1                                   | 2 laminados assimétricos                         |
|         | TL1CA1             | 44.1*-12-4-12-4                                     | 1 laminado com controle acústico                 |
| TL2CA1  | 44.1*-12-4-12-44.1 | 2 laminados, vidro I com película controle acústico |  |

Salienta-se que as soluções que apresentam as películas de controle acústico nos vidros laminados apenas são possíveis de extrair da ferramenta *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0*.

Para além das soluções de vidros, pretende-se proceder à análise do impacto das componentes nas soluções de janelas na térmica e na acústica. A análise térmica das janelas é efetuada recorrendo à norma ISO 10077:2017 [20], uma vez que não foi possível a obtenção dos valores de  $U_w$  recorrendo a cálculo detalhado para perfis específicos. Os valores de  $U_w$  foram extraídos das Tabelas H.1 a H4, do ANEXO H da norma, que na presente dissertação se encontram no ANEXO A, Quadros A.1 a A.4. No que se refere à acústica, foram consultados resultados de ensaios laboratoriais de várias janelas. A partir destes avaliou-se a influência de algumas características, nomeadamente o tipo de caixilho, dimensões da janela e tipo de abertura.

Selecionaram-se várias soluções com variação das componentes individuais, sendo possível estabelecer a influência de caixilhos, dimensões de janelas e tipo de abertura.

## 5.2 $U_g$ das soluções de vidros

### 5.2.1 Ferramenta *CalumenLive*

Para obtenção dos valores pretendidos é necessário introduzir na ferramenta dados como o tipo de solução de vidro (simples, duplo ou triplo), a composição pretendida (espessura de vidros, espessura da caixa de gás, presença ou ausência de PVB), o tipo de gás presente na cavidade (ar, 85% árgon, 90% árgon, 90% cripton) e a presença de películas. Esta ferramenta apresenta, para além dos valores de  $U_w$ , os valores de  $R_w$  e termos de adaptação para algumas das soluções, obtidos recorrendo ao uso da norma EN ISO 10140-1 [28].

Os valores de  $U_w$  das composições são apresentados no Quadro 5.2, sendo que os valores de  $R_w$  e termos de adaptação se encontram no Quadro 5.5.

Quadro 5.2 – Dados extraídos da ferramenta *CalumenLive*.

| ID         | Fatores Luminosos       |                  |                  | Energia solar                 |                  |                  |                |                |                | Fator solar<br>g | Ar                  | Árgon               | Peso<br>Kg/m <sup>2</sup> |
|------------|-------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|
|            | Transm.<br>$\tau_v$ (%) | Refletância      |                  | Transm.<br>Solar $\tau_e$ (%) | Refletância      |                  | Absorção       |                |                |                  | U <sub>g</sub>      | U <sub>g</sub>      |                           |
|            |                         | $\rho_{v,e}$ (%) | $\rho_{v,i}$ (%) |                               | $\rho_{e,e}$ (%) | $\rho_{e,i}$ (%) | $\alpha_1$ (%) | $\alpha_2$ (%) | $\alpha_3$ (%) |                  | W/m <sup>2</sup> .K | W/m <sup>2</sup> .K |                           |
| <b>SF1</b> | <b>91</b>               | <b>8</b>         | <b>8</b>         | <b>87</b>                     | <b>8</b>         | <b>8</b>         | <b>5</b>       | -              | -              | <b>0,88</b>      | <b>5,8</b>          | -                   | <b>10</b>                 |
| SL1        | 89                      | 8                | 8                | 79                            | 7                | 7                | 14             | -              | -              | 0,82             | 5,6                 | -                   | 20,4                      |
| <b>DF2</b> | <b>83</b>               | <b>15</b>        | <b>15</b>        | <b>77</b>                     | <b>14</b>        | <b>14</b>        | <b>5</b>       | <b>4</b>       | -              | <b>0,8</b>       | <b>2,9</b>          | <b>2,7</b>          | <b>20</b>                 |
| DF2V2      | 81                      | 15               | 15               | 73                            | 14               | 13               | 5              | 8              | -              | 0,79             | 2,8                 | 2,7                 | 30                        |
| DF2C       | 83                      | 15               | 15               | 77                            | 14               | 14               | 5              | 4              | -              | 0,8              | 2,8                 | 2,7                 | 20                        |
| DFL        | 81                      | 15               | 15               | 70                            | 13               | 12               | 5              | 12             | -              | 0,78             | 2,8                 | 2,7                 | 30,4                      |
| DL2S       | 80                      | 15               | 15               | 65                            | 12               | 12               | 14             | 8              | -              | 0,72             | 2,8                 | 2,6                 | 40,81                     |
| DL2A       | 79                      | 15               | 14               | 63                            | 12               | 12               | 14             | 11             | -              | 0,72             | 2,7                 | 2,6                 | 32,76                     |
| Solar      | 52                      | 18               | 23               | 26                            | 32               | 47               | 42             | 1              | -              | 0,29             | 1,6                 | 1,2                 | 20                        |
| Low-E      | 66                      | 27               | 24               | 40                            | 44               | 43               | 14             | 2              | -              | 0,43             | 1,6                 | 1,2                 | 20                        |
| <b>TF3</b> | <b>76</b>               | <b>21</b>        | <b>21</b>        | <b>68</b>                     | <b>19</b>        | <b>19</b>        | <b>6</b>       | <b>4</b>       | <b>4</b>       | <b>0,73</b>      | <b>1,9</b>          | <b>1,8</b>          | <b>30</b>                 |
| TF3V2      | 75                      | 20               | 20               | 65                            | 18               | 18               | 5              | 8              | 3              | 0,71             | 1,9                 | 1,8                 | 40                        |
| TF3V13S    | 74                      | 20               | 20               | 62                            | 17               | 17               | 10             | 4              | 6              | 0,69             | 1,9                 | 1,7                 | 50                        |
| TF3V13A    | 73                      | 20               | 20               | 59                            | 17               | 16               | 10             | 4              | 9              | 0,69             | 1,9                 | 1,7                 | 60                        |
| TF3C2      | 76                      | 21               | 21               | 68                            | 19               | 19               | 6              | 4              | 4              | 0,73             | 1,8                 | 1,7                 | 30                        |
| TF2L1      | 75                      | 20               | 21               | 62                            | 16               | 18               | 15             | 4              | 3              | 0,67             | 1,9                 | 1,7                 | 40,4                      |
| TF1L2S     | 74                      | 20               | 20               | 58                            | 16               | 16               | 15             | 4              | 7              | 0,66             | 1,9                 | 1,7                 | 50,81                     |
| TF1L2A     | 73                      | 20               | 20               | 56                            | 16               | 15               | 15             | 4              | 10             | 0,6              | 1,8                 | 1,7                 | 60,81                     |

Após obtenção dos valores de  $U_w$  para as várias soluções, comparando a amostra padrão de vidros simples com as amostras padrão de vidro duplo e triplo, verifica-se que os vidros simples apresentam o pior desempenho térmico de entre todas as soluções, o que já era de esperar tendo em conta a inexistência de camadas adicionais que melhoram o desempenho do vidro, como as caixas de gás presentes entre vidros.

Observando os valores do coeficiente de transmissão térmica com a caixa de gás preenchida com ar ou com árgon, é de notar que apesar da utilização de árgon no espaço de gás em substituição de ar ser mais favorável ao desempenho térmico dos vidros, a diferença existente é pequena, sendo que a máxima variação observada é de apenas  $0,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

Com base nos dados recolhidos é possível proceder à comparação entre as amostras padrão e as restantes por forma a perceber a influência que deriva de pequenas alterações nos componentes individuais no desempenho térmico do vidro.

Relativamente à espessura do vidro ocorre uma melhoria ligeira do coeficiente de transmissão térmica e do fator solar, esta pode ser observada nas soluções de vidro triplo, nas amostras TF3V13S e TF3V13A em comparação com a amostra padrão, onde são aumentadas as espessuras de dois vidros e para a caixa de gás preenchida com árgon. O mesmo se verifica quando comparamos as amostras padrão de vidros duplos e triplos com as amostras com espessura de caixa de gás superior.

Analisando a influência da presença de vidros laminados é possível observar a melhoria a nível de desempenho térmico, não só devido à redução do coeficiente de transmissão térmica, mas também devido à diminuição do fator solar. A diminuição destes valores leva ao aumento do conforto térmico assegurado pelos vidros no interior do edifício desde que estes sejam empregues em soluções de caixilharia com desempenho semelhante e sejam devidamente selados. No que se refere aos valores da transmitância luminosa, já era de esperar a redução da luz que passa para o interior com o aumento das camadas de envidraçado, no entanto ainda é bastante significativa, sendo superior a 70%. A absorção dos raios solares vai aumentando com o aumento do desempenho dos vidros, sendo que o parâmetro que apresenta maior influência é a presença de PVB (vidros laminados).

A massa das soluções varia, como será de esperar, sempre que ocorre o aumento da espessura dos vidros ou a adição de películas de PVB para vidros laminados, não variando quando a caixa de gás aumenta.

No Quadro 5.2 verifica-se que a combinação Solar apresenta uma grande discrepância de valores relativamente às restantes soluções de vidro duplo apresentadas (DF2, DF2V2, DF2C, DFL, DL2S e DL2A), tal deve-se à introdução de uma película solar na face interna do vidro exterior. Com a adição de películas de controle solar o desempenho térmico é melhorado e a possibilidade de ocorrência de sobreaquecimento no verão passa a ser menor, no entanto verifica-se que a transmitância visível sofre uma diminuição acentuada, significando que a passagem de luz natural para o interior do edifício também será menor, podendo obrigar a uma maior utilização de luz artificial. Ainda assim, o desempenho térmico é melhor na solução com película do que nas restantes soluções apresentadas.

Por forma a verificar a influência da introdução de películas de baixa emissividade nos vidros procedeu-se à comparação entre as soluções DF2 e “Low-E”. Podendo verificar-se que ocorre uma diminuição da transmitância luminosa, o que leva à diminuição da passagem de luz natural para o interior do compartimento. O mesmo acontece para a transmissão solar direta. No que se refere ao fator solar e ao coeficiente de transmissão térmica, também se verifica uma diminuição acentuada dos seus valores. Esta diminuição tona-se vantajosa não só porque melhora o desempenho térmico do envidraçado, mas também devido ao facto de reduzir o risco de ocorrência de condensações.

Todas as alterações verificadas com a variação de uma componente interferem no desempenho global do vidro, no entanto salienta-se a grande influência devido à introdução de películas.

## 5.2.2 Ferramenta *Guardian Glass Analytcs*

A ferramenta de cálculo térmico da *Guardian Glass Analytcs* apenas fornece dados térmicos (ver Quadro 5.3). Para que seja possível extrair valores das composições pretendidas é necessário definir alguns parâmetros de entrada, como o tipo de vidro (simples, duplo ou triplo), a composição (espessura dos vidros, da caixa de gás e presença ou ausência de PVB) e o gás presente na cavidade.

Quadro 5.3 – Dados extraídos da ferramenta de cálculo *Guardian Glass Analytcs*.

| ID         | Luz visível                   |                         |                         | Energia solar                          |                         |                         |   |                     |                | U <sub>g</sub> |                       | Peso<br>Kg/m <sup>2</sup> |              |
|------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--|-------------------------|-------------------------|---|---------------------|----------------|----------------|-----------------------|---------------------------|--------------|
|            | Transm.<br>τ <sub>v</sub> (%) | Refletância             |                         | Transm.<br>Solar<br>T <sub>e</sub> (%) | Refletância             |                         | Absorção<br>Solar<br>α <sub>e</sub> (%) | Fator<br>solar<br>g | q <sub>i</sub> |                | [W/m <sup>2</sup> .K] |                           |              |
|            |                               | ρ <sub>v,e</sub><br>(%) | ρ <sub>v,i</sub><br>(%) |  | ρ <sub>e,e</sub><br>(%) | ρ <sub>e,i</sub><br>(%) |   |                     | Ar             | 90%<br>Árgon   | Ar                    |                           | 90%<br>Árgon |
| <b>SF1</b> | <b>91</b>                     | <b>8</b>                | <b>8</b>                | <b>87</b>                              | <b>8</b>                | <b>8</b>                | <b>5</b>                                | <b>0,88</b>         | <b>1,4</b>     | -              | <b>5,8</b>            | -                         | <b>9,6</b>   |
| SL1        | 89                            | 8                       | 8                       | 78                                     | 7                       | 7                       | 15                                      | 0,82                | 3,79           | -              | 5,6                   | -                         | 14,6         |
| <b>DF2</b> | <b>83</b>                     | <b>15</b>               | <b>15</b>               | <b>76</b>                              | <b>14</b>               | <b>14</b>               | <b>10</b>                               | <b>0,79</b>         | <b>3,56</b>    | <b>3,61</b>    | <b>2,9</b>            | <b>2,7</b>                | <b>19,19</b> |
| DF2V2      | 82                            | 15                      | 15                      | 72                                     | 14                      | 13                      | 14                                      | 0,78                | 5,88           | 5,99           | 2,8                   | 2,7                       | 28,96        |
| DF2C       | 83                            | 15                      | 15                      | 76                                     | 14                      | 14                      | 10                                      | 0,79                | 3,59           | 3,62           | 2,8                   | 2,7                       | 19,19        |
| DFL        | 82                            | 15                      | 15                      | 68                                     | 13                      | 12                      | 18                                      | 0,77                | 8,97           | 9,18           | 2,8                   | 2,7                       | 24,2         |
| DL2S       | 81                            | 15                      | 15                      | 64                                     | 12                      | 12                      | 24                                      | 0,71                | 7,25           | 7,3            | 2,8                   | 2,6                       | 29,2         |
| DL2A       | 80                            | 15                      | 15                      | 61                                     | 12                      | 12                      | 27                                      | 0,7                 | 9,22           | 9,22           | 2,7                   | 2,6                       | 44,2         |
| Solar      | 41                            | 22                      | 12                      | 29                                     | 26                      | 25                      | 45                                      | 0,34                | 4,47           | 3,95           | 1,8                   | 1,5                       | 19,19        |
| <b>TF3</b> | <b>76</b>                     | <b>21</b>               | <b>21</b>               | <b>67</b>                              | <b>19</b>               | <b>19</b>               | <b>15</b>                               | <b>0,72</b>         | <b>5,3</b>     | <b>5,35</b>    | <b>1,9</b>            | <b>1,8</b>                | <b>28,79</b> |
| TF3V2      | 75                            | 21                      | 21                      | 64                                     | 18                      | 18                      | 18                                      | 0,7                 | 6,67           | 6,73           | 1,9                   | 1,8                       | 38,56        |
| TF3V13S    | 74                            | 21                      | 21                      | 61                                     | 18                      | 18                      | 21                                      | 0,68                | 7,42           | 7,48           | 1,9                   | 1,7                       | 48,33        |
| TF3V13A    | 73                            | 21                      | 21                      | 58                                     | 17                      | 16                      | 25                                      | 0,68                | 9,79           | 9,9            | 1,9                   | 1,7                       | 58,35        |
| TF3C2      | 76                            | 21                      | 21                      | 67                                     | 19                      | 19                      | 15                                      | 0,72                | 5,22           | 5,29           | 1,8                   | 1,7                       | 28,79        |
| TF2L1      | 75                            | 21                      | 21                      | 60                                     | 16                      | 18                      | 23                                      | 0,66                | 3,79           | 5,34           | 1,9                   | 1,7                       | 33,79        |
| TF1L2S     | 74                            | 21                      | 21                      | 57                                     | 16                      | 16                      | 27                                      | 0,65                | 8,34           | 8,38           | 1,9                   | 1,7                       | 38,8         |
| TF1L2A     | 73                            | 21                      | 20                      | 54                                     | 16                      | 15                      | 30                                      | 0,65                | 10,28          | 10,37          | 1,8                   | 1,7                       | 53,79        |

Observando os dados recolhidos é de apontar que a utilização de árgon no espaço de gás em substituição de ar é mais favorável ao desempenho térmico dos vidros, apresentando uma variação máxima de  $0,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

A presente ferramenta fornece dados adicionais relativos ao fator de transmissão secundária de calor para o interior ( $q_i$ ), estes permitem avaliar a passagem de energia solar secundária através dos vidros, sendo que quanto menor o valor deste fator, menor será a quantidade de calor secundária que atravessa as camadas de vidro.

Com base nos dados recolhidos é possível verificar que os valores de  $U_g$  são iguais aos obtidos na ferramenta *CalumenLive*, conforme expectável por aplicarem o mesmo método de cálculo. Ocorrem algumas variações noutros parâmetros como o fator solar, mas estas são mínimas. Existe, no entanto uma combinação que apresenta variações, a solução “Solar”. Estas variações

devem-se ao facto de a película de controlo solar aplicada ser diferente, uma vez que cada fornecedor usa películas específicas e a informação disponibilizada acerca das mesmas é pouco detalhada.

No Quadro 5.3, tal como o verificado no Quadro 5.2 a melhor solução é a que possui película de controlo solar, melhorando o desempenho e diminuindo o risco de sobreaquecimento.

### 5.3 $U_w$ de soluções de janelas

Os valores do coeficiente de transmissão térmica dos vidros não são, por si só, uma garantia do isolamento térmico proporcionado pelas janelas nos edifícios, já que o caixilho pode condicionar bastante o desempenho global da janela. Nas situações de vidro simples até pode favorecer quando o caixilho tem bom comportamento térmico, enquanto em vidro duplo e triplo, na maior parte das vezes prejudica o desempenho. Dado que nenhuma das ferramentas acima descritas apresenta os valores de  $U_w$ , torna-se necessário recorrer à norma ISO 10077-1:2017 [20] para determinação desses valores através de soluções tabeladas.

Para se conseguir garantir soluções o mais realistas possível, procedeu-se ao uso dos Quadros A.1 a A.4 do ANEXO A, para uma fração da área do caixilho correspondente a 30% e a 20% de toda a área da janela para espaçadores normais e com desempenho melhorado. Assim torna-se possível de relacionar a influência da área do caixilho e dos espaçadores no desempenho térmico da solução envidraçada.

Para os valores de  $U_g$  apresentados nos Quadros 5.2 e 5.3, para caixa de gás preenchida com ar (solução mais comum e mais barata), tendo em conta os valores de  $U_f$  apresentados na Figura 4.1 da Secção 4.2.1.1, que se encontram de acordo com os limites apresentados no Quadro 3.1 da Secção 3.2.2, tendo em conta cada tipo de caixilho, obtiveram-se os valores de  $U_w$  indicados no Quadro 5.4.

Para o caixilho de madeira, o valor de  $U_f$  a considerar para os vidros simples será de  $U_f = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ , enquanto para os vidros duplos e triplos se optou pelo uso de  $U_f = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Para o caixilho de alumínio considerou-se  $U_f = 3,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  no caso dos vidros simples e  $U_f = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$  para vidros duplos e triplos. Finalmente para o caixilho de PVC considerou-se  $U_f = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$  para os vidros simples e  $U_f = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $U_f = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$  para vidros duplos e triplos, respetivamente.

É de ter em atenção que alguns dos valores apresentados resultam de interpolação, uma vez que nem todos os valores de  $U_g$  e  $U_f$  se encontram representados nos Quadros C.1 a C.4.

Quadro 5.4 – Valores de  $U_w$  para as soluções envidraçadas em estudo.

| ID         | Composição         | Ug<br>[W/m <sup>2</sup> .K] | Uf<br>[W/m <sup>2</sup> .K] | Uw [W/m <sup>2</sup> .K] |            |                     |            | Caixilho         |                                     |     |     |     |     |     |
|------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|---------------------|------------|------------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|            |                    |                             |                             | Espaçador normal         |            | Espaçador melhorado |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
|            |                    |                             |                             | 30%                      | 20%        | 30%                 | 20%        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>SF1</b> | <b>4</b>           | <b>5,8</b>                  | 2                           | <b>4,7</b>               | <b>5</b>   | <b>4,7</b>          | <b>5</b>   | Caixilho Madeira |                                     |     |     |     |     |     |
| SL1        | 44.1               | 5,7                         |                             | 4,7                      | 4,9        | 4,6                 | 4,9        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>DF2</b> | <b>4-12-4</b>      | <b>2,9</b>                  | 2,8                         | <b>2,7</b>               | <b>2,8</b> | <b>2,6</b>          | <b>2,8</b> |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DF2V2      | 4-12-8             | 2,8                         |                             | 2,6                      | 2,7        | 2,6                 | 2,7        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DF2C       | 4-24-4             |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DFL        | 4-12-44.1          |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DL2S       | 44.1-12-44.1       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DL2A       | 44.1-12-66.1       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>TF3</b> | <b>4-12-4-12-4</b> |                             |                             |                          |            |                     |            |                  | 1,9                                 | 1,6 | 2   | 2,1 | 2   | 2   |
| TF3V2      | 4-12-8-12-4        |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3V13S    | 8-12-4-12-8        |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3V13A    | 8-12-4-12-12       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3C2      | 4-12-4-20-4        | 1,8                         | 1,9                         | 2                        | 1,9        | 1,9                 |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF2L1      | 44.1-12-4-12-4     | 1,9                         | 2                           | 2                        | 2,1        | 2                   | 2          |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF1L2S     | 44.1-12-4-12-44.1  |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF1L2A     | 44.1-12-4-12-66.1  |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>SF1</b> | <b>4</b>           | <b>5,8</b>                  | 3,8                         | <b>5,2</b>               | <b>5,4</b> | <b>5,2</b>          | <b>5,4</b> |                  | Caixilho Alumínio com corte térmico |     |     |     |     |     |
| SL1        | 44.1               | 5,7                         |                             | 5,1                      | 5,3        | 5,1                 | 5,3        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>DF2</b> | <b>4-12-4</b>      | <b>2,9</b>                  | 2                           | <b>2,8</b>               | <b>2,9</b> | <b>2,8</b>          | <b>2,9</b> |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DF2V2      | 4-12-8             | 2,8                         |                             | 2,7                      | 2,8        | 2,7                 | 2,8        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DF2C       | 4-24-4             |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DFL        | 4-12-44.1          |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DL2S       | 44.1-12-44.1       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DL2A       | 44.1-12-66.1       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>TF3</b> | <b>4-12-4-12-4</b> |                             |                             |                          |            |                     |            | 1,9              |                                     | 1,5 | 2   | 2,1 | 2   | 2   |
| TF3V2      | 4-12-8-12-4        |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3V13S    | 8-12-4-12-8        |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3V13A    | 8-12-4-12-12       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3C2      | 4-12-4-20-4        | 1,8                         | 1,9                         | 2                        | 1,9        | 1,9                 |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF2L1      | 44.1-12-4-12-4     | 1,9                         | 2                           | 2                        | 2,1        | 2                   | 2          |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF1L2S     | 44.1-12-4-12-44.1  |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF1L2A     | 44.1-12-4-12-66.1  |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>SF1</b> | <b>4</b>           | <b>5,8</b>                  | 2                           | <b>4,7</b>               | <b>5</b>   | <b>4,7</b>          | <b>5</b>   | Caixilho PVC     |                                     |     |     |     |     |     |
| SL1        | 44.1               | 5,7                         |                             | 4,6                      | 4,9        | 4,6                 | 4,9        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>DF2</b> | <b>4-12-4</b>      | <b>2,9</b>                  | 1,2                         | <b>2,5</b>               | <b>2,7</b> | <b>2,5</b>          | <b>2,7</b> |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DF2V2      | 4-12-8             | 2,8                         |                             | 2,5                      | 2,6        | 2,4                 | 2,6        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DF2C       | 4-24-4             |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DFL        | 4-12-44.1          |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DL2S       | 44.1-12-44.1       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| DL2A       | 44.1-12-66.1       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| <b>TF3</b> | <b>4-12-4-12-4</b> |                             |                             |                          |            |                     |            |                  | 1,9                                 | 1   | 1,8 | 1,9 | 1,8 | 1,9 |
| TF3V2      | 4-12-8-12-4        |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3V13S    | 8-12-4-12-8        |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3V13A    | 8-12-4-12-12       |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF3C2      | 4-12-4-20-4        | 1,8                         | 1,8                         | 1,9                      | 1,7        | 1,8                 |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF2L1      | 44.1-12-4-12-4     | 1,9                         | 1,8                         | 1,9                      | 1,8        | 1,8                 | 1,9        |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF1L2S     | 44.1-12-4-12-44.1  |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |
| TF1L2A     | 44.1-12-4-12-66.1  |                             |                             |                          |            |                     |            |                  |                                     |     |     |     |     |     |

Analisando os resultados obtidos para os valores de  $U_w$ , é possível verificar que a variação destes tendo em conta a fração da área do caixilho, seja ela de 30% ou 20% em relação à área total da janela e o tipo de espaçador, normal ou melhorado, não altera de forma significativa estes valores, não ocorrendo qualquer variação em algumas situações.

Na generalidade, tendo em conta os valores apresentados no Quadro 5.4, verifica-se que o caixilho de PVC apresentaria as soluções com melhor desempenho térmico, seguindo-se o caixilho de madeira.

Os valores de  $U_w$  são melhores do que os valores de  $U_g$ , exceto algumas exceções no caso dos vidros duplos e triplos. Estes resultados justificam-se por se terem assumido caixilhos que já dão garantias de bom desempenho. Quando atendemos à área verifica-se que uma para área de caixilho de 30% da área da janela se obtém valores do coeficiente de transmissão térmica mais baixos, apresentando melhor desempenho. Já no que se refere ao tipo de espaçador, seja ele melhorado ou não, ocorrem pequenas variações no melhoramento do isolamento térmico. Ter em atenção que os resultados obtidos podem sofrer algumas variações uma vez que se assumiu valores do coeficiente de transmissão térmica do caixilho muito bons e não foram consideradas perdas lineares.

## 5.4 Soluções de vidros, $R_w$

### 5.4.1 Ferramenta *CalumenLive*

Como referido anteriormente, a ferramenta *CalumenLive* apresenta valores de índice de redução sonora para algumas soluções especificadas no Quadro 5.1. A ferramenta segue a norma de especificação de produto CEN EN 12758, que utiliza a norma EN ISO 10140-1 para realização do ensaio.

Os valores de  $R_w$  para algumas das soluções, encontra-se no Quadro 5.5, onde também são apresentados os valores  $R_w$  afetados dos termos de adaptação.

Quadro 5.5 – Valores de  $R_w$  possíveis de extrair do *CalumenLive*.

| ID      | $R_w$ [dB] | $R_w+C$ [dB] | $R_w+C_{tr}$ [dB] |
|---------|------------|--------------|-------------------|
| SF1     | 30         | 28           | 28                |
| SL1     | 34         | 33           | 31                |
| DF2     | 31         | 30           | 27                |
| DF2V2   | 36         | 34           | 31                |
| Solar   | 31         | 30           | 27                |
| Low-E   | 31         | 30           | 27                |
| TF3     | 32         | 31           | 27                |
| TF3V13S | 35         | 33           | 31                |
| TF2L1   | 38         | 37           | 33                |

Verificando os valores apresentados no Quadro 5.5, torna-se evidente que a melhor solução de isolamento acústico se verifica para a amostra que apresenta vidros triplos, incorporando soluções laminadas.

No entanto nem todos os vidros duplos ou triplos apresentam soluções de isolamento acústico melhor que os vidros simples, por exemplo a amostra SL1 apresenta isolamento acústico superior às amostras DF2, Solar e TF3, facto que se deve à presença de PVB na solução de vidro simples laminado e nas restantes não. As amostras SL1, DF2 e Solar possuem a mesma massa, o que evidencia a baixa influência da introdução de caixa de ar e películas de controlo solar no isolamento sonoro, demonstrando que o uso de vidros laminados possui grande importância no isolamento sonoro.

#### **5.4.2 Ferramenta *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0***

A ferramenta *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0* apresenta o desempenho acústico dos vidros, apenas, sem considerar o caixilho. Esta ferramenta é uma base de dados e, para que seja possível extrair os valores das soluções pretendidas é necessário introduzir alguma informação como o tipo de vidro (simples, duplo ou triplo), a espessura de cada vidro e de cada caixa de gás e o tipo de painel de vidro pretendido (float, laminado ou com controlo de ruído).

Os resultados extraídos encontram-se no Quadro 5.6, onde são apresentados, para as várias constituições de vidro, os valores do índice de redução sonora ponderado, os valores do índice de redução sonora atenuado com os termos de adaptação, os valores em frequência para as bandas de oitava na faixa de 125 Hz a 4000 Hz de bandas de oitava e o peso (massa) de cada composição, em  $Kg/m^2$ .

Quadro 5.6 – Valores de  $R_w$  extraídos do Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0.

| ID         | $R_w$<br>[dB] | $R_w+C$<br>[dB] | $R_w+C_{tr}$<br>[dB] | Freq. Banda de oitava (Hz) |           |           |           |           |           | Peso<br>Kg/m <sup>2</sup> |
|------------|---------------|-----------------|----------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|
|            |               |                 |                      | 125                        | 250       | 500       | 1000      | 2000      | 4000      |                           |
| <b>SF1</b> | <b>29</b>     | <b>28</b>       | <b>27</b>            | <b>20</b>                  | <b>22</b> | <b>26</b> | <b>31</b> | <b>33</b> | <b>28</b> | <b>10</b>                 |
| SL1        | 34            | 34              | 33                   | 27                         | 28        | 32        | 36        | 32        | 45        | 20,04                     |
| <b>DF2</b> | <b>30</b>     | <b>29</b>       | <b>27</b>            | <b>26</b>                  | <b>18</b> | <b>24</b> | <b>34</b> | <b>40</b> | <b>36</b> | <b>20</b>                 |
| DF2V2      | 34            | 33              | 30                   | 26                         | 22        | 29        | 35        | 41        | 47        | 30                        |
| DF2C       | 32            | 31              | 28                   | 20                         | 21        | 28        | 41        | 48        | 25        | 20                        |
| DFL        | 37            | 36              | 32                   | 25                         | 27        | 32        | 39        | 51        | 54        | 40,04                     |
| DL2S       | 37            | 36              | 33                   | 28                         | 26        | 34        | 40        | 40        | 57        | 40,08                     |
| DL2A       | 41            | 40              | 38                   | 33                         | 36        | 40        | 42        | 42        | 56        | 50,08                     |
| DL2CA1     | 43            | 41              | 38                   | 28                         | 32        | 38        | 45        | 54        | 69        | 50,09                     |
| DL2CA2     | 43            | 41              | 36                   | 24                         | 34        | 39        | 50        | 54        | 58        | 40,1                      |
| <b>TF3</b> | <b>31</b>     | <b>30</b>       | <b>26</b>            | <b>20</b>                  | <b>20</b> | <b>27</b> | <b>43</b> | <b>51</b> | <b>41</b> | <b>30</b>                 |
| TF3V2      | 36            | 35              | 31                   | 21                         | 25        | 33        | 47        | 49        | 51        | 40                        |
| TF3V13S    | 37            | 36              | 32                   | 23                         | 26        | 34        | 48        | 48        | 58        | 50                        |
| TF3V13A    | 39            | 37              | 33                   | 25                         | 28        | 37        | 47        | 52        | 61        | 60                        |
| TF3C2      | 35            | 34              | 30                   | 18                         | 25        | 32        | 45        | 50        | 45        | 30                        |
| TF2L1      | 38            | 37              | 35                   | 43                         | 26        | 40        | 37        | 53        | 43        | 40,04                     |
| TF1L2S     | 42            | 40              | 37                   | 27                         | 32        | 40        | 46        | 44        | 60        | 50,08                     |
| TF1L2A     | 44            | 42              | 39                   | 26                         | 37        | 42        | 46        | 46        | 64        | 60,08                     |
| TL1CA1     | 42            | 40              | 36                   | 23                         | 30        | 40        | 49        | 55        | 49        | 40,05                     |
| TL2CA1     | 46            | 45              | 41                   | 32                         | 35        | 43        | 48        | 51        | 57        | 59,09                     |

Observando os valores apresentados no Quadro 5.6 é possível verificar que a diferença de isolamento entre os vidros padrão, quando se adiciona uma camada de vidro com a mesma composição, é de 1 dB dos vidros simples para os duplos e dos duplos para os triplos.

Tendo por base os dados obtidos da análise a algumas soluções envidraçadas (Quadro 5.6), é possível estabelecer algumas comparações entre os tipos de envidraçado, espessura dos envidraçados, espessura do espaço de gás, e a massa. Para se conseguir avaliar a influência das componentes constituintes da solução envidraçada é necessário que estas sejam consideradas em separado.

A alteração da espessura do vidro verificada na amostra DF2V2, em comparação com a amostra padrão de vidro duplo permite-nos verificar que este incremento proporciona um aumento no índice de redução sonora de 4 dB, apresentando um isolamento sonoro considerável mesmo que com os termos de adaptação apresente resultados um pouco inferiores. No caso dos vidros triplos podem ser tiradas as mesmas conclusões. No entanto estes apresentam uma melhoria do isolamento acústico proporcionado muito superior quando são aumentadas as espessuras de dois vidros de forma assimétrica, como no caso da solução TF3V13A, em que se dá um aumento de 8 dB em comparação com a amostra padrão de vidros triplos.

Por forma a avaliar a influência da caixa de gás no desempenho acústico do vidro procede-se ao aumento da espessura desta para vidro duplos e triplos e, verifica-se que as conclusões são

as mesmas. A espessura da caixa de gás possui bastante influência na melhoria da acústica interior, uma vez que tem um aumento significativo do índice de redução sonora. Mesmo quando as variações da espessura da caixa de gás se apresentam pequenas, o impacto causado no isolamento é bastante significativo. Por exemplo, uma variação de 8 mm na caixa de ar II da composição TF3C2 provoca uma variação de 4 dB no valor de  $R_w$  quando comparado com a amostra padrão dos vidros triplos.

Observando as soluções em que houve adição de laminados é fácil perceber o seu impacto no desempenho acústico da solução. Pode comparar-se DF2V2 com DFL, uma vez que estes apresentam a mesma massa, verificando-se que a substituição de um vidro de 8 mm por um laminado de 4 + 4 mm ocorre um aumento no isolamento de 3 dB. Nos vidros simples, amostras SF1 e SL1, verifica-se que o uso de PVB leva a uma diferença de 5 dB no isolamento, no entanto importa atender à influência que o aumento da massa proporciona. Analisando as soluções de vidros duplos torna-se interessante a análise das soluções DFL e DL2S uma vez que a adição de um laminado proporciona o mesmo nível de isolamento que a adição de dois laminados simétricos (mesmas espessuras de vidro e PVB), daí ser tão importante garantir que os envidraçados possuem uma composição assimétrica (soluções DL2A e TF1L2A).

As soluções que sem dúvida proporcionam o melhor isolamento acústico derivam do melhoramento de mais do que uma componente em separado, tal pode ser verificado ao analisar as soluções de vidros laminados com adição de películas de controlo de ruído. Estas soluções de vidros duplos (DL2CA1 e DL2CA2) apresentam desempenho inferior em relação a soluções de vidros triplos (TL1CA1 e TL2CA1), isto deve-se à componente tipo de janela (tripla) que também apresenta grande influência no desempenho acústico da solução. Por forma a verificar a influência da película de controlo acústico procede-se à comparação de algumas soluções. No caso dos vidros duplos procede-se à comparação das soluções DL2S e DL2CA1, verificando-se que as adições de películas de controlo de ruído levam a um aumento no isolamento sonoro de 6 dB. No caso dos vidros triplos pode ser feita a comparação entre as soluções TF2L1 e TL1CA1, ou entre as soluções TF1L2S e TL2CA1, sendo que em ambas se verifica um aumento do isolamento sonoro de 4 dB com a introdução das películas.

As situações de isolamento mais problemáticas verificam-se para as baixas frequências, sendo que mesmo para as soluções com bom isolamento acústico, o isolamento nas baixas frequências apresenta grandes variações e valores bastante inferiores em muitas situações, como no caso das soluções DL2CA2 e TL2CA1, em que se verifica uma quebra de isolamento de 8 dB para os 125 Hz.

## 5.5 Soluções de janelas, $R_w$

Compilaram-se alguns resultados de ensaios laboratoriais de janelas com diferentes características, nomeadamente tipo de vidro e de caixa de ar, tipo de caixilho, tipo de abertura e dimensões. A descrição das janelas selecionadas e o resultado dos ensaios encontram-se no Quadro 5.7. Os resultados dos ensaios das janelas ( $R_w$ ), comparados com os dados das soluções de vidro usadas nessa janela, obtidos através da ferramenta Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0, apresentadas no Quadro 5.8, esta comparação serve para estimar o impacto no isolamento causado pela adição do caixilho.

Quadro 5.7 – Ensaio laboratoriais de janelas e alterações a considerar.

| Tipo vidro | ID | Tipo de abertura                           | Dimensões       | Tipo de Caixilho              | Composição           | $R_w$ | $R_w+C$ | $R_w+Ctr$ | Alteração                    |
|------------|----|--|-----------------|-------------------------------|----------------------|-------|---------|-----------|------------------------------|
| Duplo      | 1  | 1 folha de batente + 1 folha oscilobatente | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio com corte térmico    | 44.2-20-66.2         | 42    | 41      | 39        | Composição                   |
|            | 2  | 1 folha de batente + 1 folha oscilobatente | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio com corte térmico    | 55.2-10-44.2         | 43    | 41      | 37        |                              |
|            | 3  | 1 folha de batente + 1 folha oscilobatente | 1,23 m x 1,48 m | Madeira de Casquinha Vermelha | 44.2-10-66.2         | 39    | 38      | 36        | Gás e espessura da cavidade  |
|            | 4  | 1 folha de batente + 1 folha oscilobatente | 1,23 m x 1,48 m | Madeira de Casquinha Vermelha | 44.2-14(árgon)-66.2  | 39    | 38      | 35        |                              |
|            | 5  | 1 folha de batente + 1 folha oscilobatente | 1,23 m x 1,48 m | Madeira de pinho silvestre    | 66.2-20-66.2         | 39    | 39      | 36        | Caixilho                     |
|            | 6  | 1 folha de batente + 1 folha oscilobatente | 1,23 m x 1,48 m | Madeira                       | 66.2-20-66.2         | 45    | 44      | 41        |                              |
|            | 7  | 1 folha fixa                               | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio                      | 10-14(árgon)-66.4    | 40    | 39      | 37        | Espessura da caixa de gás    |
|            | 8  | 1 folha fixa                               | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio                      | 10-24(árgon)-1010.2  | 43    | 42      | 40        |                              |
|            | 9  | 2 folhas de correr                         | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio com corte térmico    | 8-16(90% árgon)-66.2 | 32    | 31      | 30        | Abertura                     |
|            | 10 | 2 folhas fixas                             | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio com corte térmico    | 8-16(90% árgon)-66.2 | 41    | 39      | 37        |                              |
|            | 11 | 2 folhas de correr                         | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio                      | 66.2-16-66.2         | 39    | 38      | 36        | Dimensões                    |
|            | 12 | 2 folhas de correr                         | 3,15 m x 3,15m  | Alumínio                      | 66.2-16-66.2         | 40    | 39      | 40        |                              |
| Triplo     | 13 | 1 folha de batente + 1 folha oscilobatente | 1,23 m x 1,48 m | Alumínio com corte térmico    | 6-12-5-12-44.1       | 40    | 38      | 35        | Tipo janela (comparar com 1) |

Compararam-se as janelas que possuem as mesmas dimensões, 1,23 m x 1,48 m para verificar a influência de outras componentes, como a sua composição, espessura da cavidade, gás presente na cavidade, caixilho, abertura e tipo de vidro. Para analisar a influência das dimensões da janela no seu desempenho acústico procedeu-se à seleção de uma janela com dimensões bastante superiores, 1,5 m x 3,15 m.

A influência da composição dos envidraçados no sistema de janelas, avaliou-se com duas janelas que apresentam o mesmo tipo de abertura (1 folha de batente + 1 folha oscilobatente), as mesmas dimensões (1,23 m x 1,48 m) e o mesmo tipo de material de caixilho (alumínio com corte térmico). Ambas as janelas (1 e 2) apresentam composição assimétrica, sendo que uma delas apresenta o vidro com maior espessura do lado exterior e outro apresenta um aumento de 10 mm na caixa de gás. A solução envidraçada 1 apresenta uma caixa de gás superior e maior espessura total do envidraçado, no entanto o melhor valor de  $R_w$  é verificado para a solução 2. A diferença dos resultados é bastante pequena (apenas 1 dB) e pode ser explicada por diversos fatores, nomeadamente, a vedação durante a montagem, a afinação da abertura, o caixilho (embora sejam do mesmo tipo, os dois caixilhos poderão ter algumas diferenças de fabrico, não há informação sobre o fabricante dos mesmos) e ainda a incerteza associada à medição.

Uma vez que não se teve acesso a resultados de ensaios de janelas com composição igual e com diferentes gases presente na cavidade, procedeu-se à seleção das soluções 3 e 4 para análise de influência do gás presente e da espessura da caixa de gás, sendo que os restantes parâmetros são iguais. A solução 3 para além de apresentar menos 4 mm de espessura da caixa de gás, também não possui argon no interior da cavidade, sendo expectável que esta solução tivesse um desempenho inferior. No entanto verifica-se que ambas as soluções apresentam o mesmo isolamento acústico, tal deve-se ao facto de o gás presente na cavidade apresentar densidade e velocidade de fase das ondas semelhantes ao ar. Existem outros gases, como por exemplo o hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) que conferem um melhor isolamento sonoro por ter uma velocidade de fase muito menor e uma densidade muito maior do que o ar [47].

O tipo de caixilho escolhido tem grande impacto no desempenho acústico da solução envidraçada. Para verificar essa influência, de entre os resultados disponíveis, selecionaram-se duas janelas com o mesmo tipo de abertura (1 folha de batente + 1 folha oscilobatente), as mesmas dimensões (1,23 m x 1,48 m) e a mesma composição (66.2-20-66.2), com caixilhos compostos por dois tipos de madeira diferente. A solução 6 apresenta valores de isolamento cerca de 6 dB acima do proporcionado pela solução 5, que é constituído por madeira de pinho silvestre, isto acontece porque nem todos os tipos de madeira são bons materiais para utilização em caixilhos importa a sua densidade, textura, cor, durabilidade, entre outros fatores.

Quanto ao aumento da espessura da cavidade, analisando os resultados para janelas com o mesmo tipo de abertura (1 folha fixa), as mesmas dimensões (1,23 m x 1,48 m) e o mesmo tipo de caixilho (alumínio), verifica-se um aumento do valor de  $R_w$  de 3 dB quando se incrementa 10 mm a espessura da caixa de gás, como se pode verificar para as soluções 7 e 8.

Para analisar o impacto causado no isolamento acústico pelo tipo de abertura foram selecionadas as soluções 9 e 10. As janelas apresentam as mesmas dimensões (1,23 m x 1,48 m), o mesmo tipo de caixilho (alumínio com corte térmico) e a mesma composição (8 -16 (90% árgon) - 66.2). A solução 10 apresenta um valor de  $R_w$  muito superior (mais 9 dB), o que se justifica por estarmos a comparar a pior solução de abertura em termos de estanqueidade (2 folhas de correr) com a melhor (2 folhas fixas).

Para determinação da influência das dimensões da janela no isolamento sonoro, selecionaram-se soluções com todas as características iguais exceto as dimensões. Assim, selecionaram-se janelas que possuem o mesmo tipo de abertura (2 folhas de correr), o mesmo material de caixilho (alumínio) e a mesma composição (66.2 -16 - 66.2), mas com dimensões 1,23 m x 1,48 m (ID 11) e 3,15 m x 3,15 m (ID 12). Observando os valores de isolamento proporcionado verifica-se que a janela com maiores dimensões apresenta maior isolamento acústico, o que não era esperado tendo em conta a maior área envidraçada. Este facto pode dever-se à qualidade do perfil e vedantes, cuidados d instalação ou da afinação da janela. No entanto, como já foi referido anteriormente, para outras situações, a diferença é de apenas 1 dB e poderá ser justificada por diversos fatores. Para analisar melhor as diferenças de desempenho, poderiam comparar-se as curvas de isolamento, em função da frequência, das duas janelas, que nos dão muito mais informação do que o índice ponderado (valor único).

O tipo de janela escolhida para instalação é muito importante uma vez que soluções simples, duplas ou triplas apresenta variações de isolamento devido às camadas que as ondas sonoras têm de atravessar até chegar ao interior. Tendo em conta que não foi possível selecionar duas soluções com componentes semelhantes, para comparar o desempenho de um vidro duplo com um vidro triplo, procedeu-se à comparação da solução 1 com a solução 13. Ambas as janelas apresentam o mesmo tipo de abertura (1 folha de batente + 1 folha oscilobatente), as mesmas dimensões (1,23 m x 1,48 m) e o mesmo material do caixilho (alumínio com corte térmico). No entanto a janela 1 possui vidro duplo com a composição 44.2-20-66.2 enquanto a janela 13 possui vidro triplo e a sua composição é 6-12-5-12-44.1. Apesar das diferenças na composição a diferença de massa ser mínima e verifica-se que a janela 1, com vidro duplo, apresenta um melhor isolamento acústico.

Finalmente, recorrendo novamente à ferramenta *Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0*, retiraram-se os valores do índice de redução sonora e os respetivos termos de adaptação para

---

verificar as diferenças de isolamento ocorrido entre o vidro e a janela (vidro + caixilho), Quadro 5.8.

Quadro 5.8 – Soluções envidraçadas extraídas do Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0, para comparação do  $R_w$  do vidro com o  $R_w$  da janela.

| Tipo de vidro | ID  | Composição     | $R_w$ | $R_w+C$ | $R_w+C_{tr}$ |
|---------------|-----|----------------|-------|---------|--------------|
| Duplo         | L2A | 44.2-20-66.2   | 42    | 41      | 38           |
|               | L2B | 55.2-10-44.2   | 39    | 38      | 35           |
|               | L2C | 44.2-10-66.2   | 39    | 38      | 35           |
|               | L2D | 44.2-14-66.2   | 40    | 40      | 36           |
|               | L2E | 66.2-20-66.2   | 42    | 41      | 38           |
|               | L1  | 10-14-66.4     | 40    | 38      | 35           |
|               | L1A | 10-24-1010.2   | 44    | 43      | 40           |
|               | L1B | 8-16-66.2      | 42    | 40      | 38           |
|               | L2F | 66.2-16-66.2   | 42    | 41      | 38           |
| Triplo        | T1  | 6-12-5-12-44.1 | 40    | 39      | 36           |

Quando se compara o desempenho acústico das janelas com o desempenho acústico dos vidros, verifica-se que algumas soluções de janela apresentam valores de  $R_w$  superiores ao do vidro. No entanto, na maioria dos casos, os valores de  $R_w$  do vidro apresentam um desempenho acústico melhor.

A comparação entre o desempenho das janelas e dos vidros encontram-se no Quadro 5.9.

O efeito do caixilho, vedantes, ferragens, espaçadores, películas e eventuais grelhas de ventilação conduzem, por vezes a um desempenho acústico da janela inferior ao do vidro.

Por exemplo, o efeito do caixilho verifica-se nas soluções de janela 5 e 6, em que a primeira apresenta um desempenho inferior ao do vidro L2E e a segunda apresenta um desempenho superior.

O efeito do tipo de abertura da janela no desempenho é bastante evidente nas soluções 9 e 10. Enquanto a solução 10 apenas perde 1 dB em relação ao desempenho do vidro, a solução 9 perde 10 dB em relação ao desempenho do vidro.

Quadro 5.9 – Comparação entre os valores de  $R_w$  de vidro e janelas.

| ID Janelas | $R_{w,janela}$ [dB] | Caixilho                   | ID Vidros | $R_{w,vidro}$ [dB] | $R_{w,janela} - R_{w,vidro}$ |
|------------|---------------------|----------------------------|-----------|--------------------|------------------------------|
| 1          | 42                  | Alumínio corte térmico     | L2A       | 42                 | 0                            |
| 2          | 43                  |                            | L2B       | 39                 | 4                            |
| 3          | 39                  | Madeira casquinha vermelha | L2C       | 39                 | 0                            |
| 4          | 39                  |                            | L2D       | 40                 | -1                           |
| 5          | 39                  | Madeira pinho silvestre    | L2E       | 42                 | -3                           |
| 6          | 45                  | Madeira                    |           |                    | 3                            |
| 7          | 40                  | Alumínio                   | L1        | 40                 | 0                            |
| 8          | 43                  |                            | L1A       | 44                 | -1                           |
| 9          | 32                  | Alumínio corte térmico     | L1B       | 42                 | -10                          |
| 10         | 41                  |                            |           |                    | -1                           |
| 11         | 39                  | Alumínio                   | L2F       | 42                 | -3                           |
| 12         | 40                  |                            |           |                    | -2                           |
| 13         | 40                  | Alumínio corte térmico     | T1        | 40                 | 0                            |

\*Presença de argon na cavidade para os ensaios laboratoriais (janelas)

A norma de produto para janelas EN 14351-1:2006+A2 [48] estabelece que o isolamento sonoro das janelas deve ser obtido através de ensaios laboratoriais ou para tipos específicos de janelas através de cálculo, de acordo com o anexo B da norma. Neste anexo apresentam-se valores tabelados do isolamento sonoro das janelas, que tiveram origem em ensaios de janelas com dimensões 1,23m x 1,48 m. O isolamento sonoro para janelas com maiores dimensões pode ser extrapolado de acordo com este anexo. Para obter o isolamento sonoro da janela, através da consulta das tabelas, é necessário conhecer o isolamento sonoro do vidro, o número de vedantes e o tipo de abertura da janela.

Este anexo, apesar de ser útil para a estimativa do isolamento sonoro das janelas, não cobre todas as soluções de janela possíveis (só tem resultados para vidros com isolamento até 40 dB) e além disso, baseia-se em resultados de ensaios de janelas que podem diferir, em alguns componentes, da janela em análise. Para a maior parte das janelas apresentadas nesta secção não seria possível obter uma estimativa de isolamento sonoro, uma vez que o isolamento sonoro do vidro é superior a 40 dB. Para os vidros com isolamento sonoro de 40 dB, a estimativa do isolamento sonoro da janela seria de cerca de 38 dB. No entanto, as soluções 4, 7 e 13 (ver Quadro 5.9) apresentam valores resultantes de ensaio entre 39 e 40 dB.

## 5.6 Análise qualitativa dos resultados

Por forma a avaliar a influência de cada componente no comportamento térmico e acústico, organizou-se a informação extraída das ferramentas, normas e ensaios no Quadro 5.10, onde é feita a análise qualitativa dos valores obtidos para as soluções envidraçadas selecionada.

Quadro 5.10 – Avaliação qualitativa do impacto das componentes/variáveis no comportamento térmico e acústico.

| Componente/Variável  | Impacto no comportamento térmico | Impacto no comportamento acústico |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| Espessura do Vidro   | +                                | +++                               |
| Composição do sistema envidraçado (simples, duplo, triplo) | +++                              | +++                               |
| Espessura da cavidade entre vidros                         | +                                | +++                               |
| Tipo de gás entre vidros                                   | +                                | -                                 |
| Tipo de Caixilho   | +++                              | +++                               |
| Dimensões do caixilho                                      | +                                | +                                 |
| Abertura   | +++                              | +++                               |
| Uso de películas (PVB, Low-E, solar, acústica)             | +++                              | +++                               |

Escala: - pouco; + algum; ++ muito; +++ imenso

Torna-se interessante verificar que a análise qualitativa extraída da revisão bibliográfica (Quadro 4.2) apresenta uma enorme variação, para algumas componentes, quando comparada a uma análise efetuada aos resultados obtidos dos valores extraídos de ferramentas, normas e ensaios (Quadro 5.10). Esta variação também se deve ao facto de serem seleccionadas janelas com alto desempenho, onde nem sempre é possível verificar a influência real de cada componente de forma individual no sistema de janela.

Tendo em conta os dados extraídos para análise de resultados, não é possível fazer uma análise da influência dos espaçadores e vedantes utilizados, uma vez que estas componentes não são consideradas nas soluções.

## 6 REFLEXÃO SOBRE REGRAS DE DIMENSIONAMENTO DE JANELAS

### 6.1 Introdução

Para um correto dimensionamento das janelas é preciso ter em atenção quais os fatores mais relevantes que afetam de forma mais significativa o seu desempenho térmico e acústico.

Relativamente aos vidros é importante selecionar o melhor compromisso entre comportamento térmico e acústico. É importante considerar que nem sempre as ferramentas ou os ensaios nos dão indicação dos valores de  $U_w$  e  $R_w$  que realmente se verificam quando as janelas são instaladas nas fachadas, podendo ocorrer grandes variações no desempenho térmico e acústico da janela quando aplicados no edifício.

No que diz respeito ao desempenho acústico é importante ter presente a influências das altas e baixas frequências no isolamento sonoro, sendo importante favorecer o isolamento nas baixas frequências.

### 6.2 Dimensionamento de janelas

Na escolha do sistema envidraçado, importa considerar a orientação do compartimento onde será feita a instalação do vão, o nível de ventilação pretendido para o espaço, zona climática do edifício e verificação das necessidades do projeto tendo em conta a legislação aplicável.

Por forma a selecionar os parâmetros que permitam garantir um bom dimensionamento do sistema envidraçado, recorreu-se ao Quadro 4.2 (ver Secção 4.2), onde são identificados os mais relevantes para seleção de melhores soluções e o seu grau de influência para as vertentes térmica e acústica. A escolha das melhores soluções para obter conforto térmico e acústico no interior do edifício é complexa uma vez que os parâmetros com maior influência no desempenho térmico podem não ser os mesmos quando consideramos o desempenho acústico.

No desempenho térmico das janelas importa essencialmente considerar a composição do sistema envidraçado (simples, duplo ou triplo), o tipo de gás presente na cavidade, o tipo de material do caixilho, os vedantes utilizados, o tipo de abertura do sistema e o uso de películas (controlo solar e de baixa emissividade). No que se refere ao desempenho acústico, os mesmos parâmetros não possuem o mesmo grau de influência, daí a complexidade existente na escolha do melhor sistema que garanta o bom desempenho térmico e acústico ao mesmo tempo. Os parâmetros essenciais a considerar para assegurar o melhor isolamento acústico passam pela

espessura do vidro, a composição do sistema envidraçado (simples, duplo ou triplo), a espessura conferida à cavidade e o tipo de abertura do sistema.

Considerando o que tem sido descrito ao longo da presente dissertação é possível estabelecer algumas componentes que proporcionem o desempenho melhorado do sistema envidraçado:

- Uso de vidros laminados em detrimento do monolítico;
- Recorrer à composição assimétrica do sistema;
- Aplicação de caixas de gás com maiores espessuras (em que o gás não deve ser ar, por questões térmicas);
- Uso de películas de baixa emissividade (Low-E);
- Sistemas de vidro triplo ou duplo (que já representam um bom desempenho térmico e acústico);
- Seleção de janelas com abertura de batente, oscilobatente em detrimento das janelas de correr e fixas, devido à estanqueidade ao ar e água (no primeiro caso) e ao grau de ventilação (no segundo caso).

No caso da escolha do caixilho é difícil selecionar uma solução que seja sempre a melhor uma vez que todas as soluções possuem vantagens e desvantagens. Observando o Quadro 2.4, presente na Secção 2.3.2, é importante considerar que para além do melhor desempenho térmico e acústico proporcionado pelo caixilho de madeira, este necessita de manutenções regulares e é sensível ao clima e agentes biológicos, podendo não garantir a durabilidade das restantes soluções. A seguir ao caixilho de madeira, o de PVC proporciona melhor desempenho térmico e acústico do que o de alumínio, no entanto este é suscetível a grandes amplitudes térmicas e apresenta fraca resistência mecânica. Para além da melhor resistência proporcionada pelo caixilho de alumínio, deve considerar-se a sua durabilidade superior aos restantes materiais, no entanto este é um material muito condutor que proporciona um desempenho térmico e acústico inferior, sendo que pode levar à ocorrência de condensações.

O uso de caixas de gás com espessuras maiores influencia muito mais o desempenho acústico da solução do que o desempenho térmico, espessuras mais elevadas afetam as frequências de ressonância da cavidade, assim, ocorre a melhoria do desempenho acústico na faixa das baixas frequências. Relativamente às altas frequências, o isolamento sonoro é melhorado recorrendo ao uso de camadas intermédias (películas), sendo mais notório o aumento de desempenho quando estas camadas possuem características de redução de ruído [49].

No que diz respeito ao isolamento térmico, este deve ser reforçado nos vãos de habitações com elevada área envidraçada, uma vez que as melhorias obtidas podem ser residuais. Esta análise deve ser feita compartimento a compartimento [50].

Os gases nobres garantem melhores valores de isolamento térmico das janelas, pelo que é aconselhável o seu uso em substituição do ar nas cavidades. O gás que se considerou ser adequado para o bom dimensionamento foi o argón, uma vez que apesar de existirem gases com propriedades mais benéficas do que este, tem em conta a relação qualidade/preço pensa-se que este é mais vantajoso.

Importa salientar a influência da orientação da colocação do envidraçado no edifício, uma vez que este parâmetro afeta diretamente as exigências para o coeficiente de transmissão térmica da janela e o índice de redução sonora. Numa habitação poderão ser selecionadas janelas com valores de  $U_w$  e  $R_w$  diferentes de acordo com a orientação. Em relação ao coeficiente de transmissão térmica, este deverá ser menor para a orientação norte, por forma a garantir o mesmo nível de conforto, uma vez que a exposição solar será reduzida, tendo acesso a menores quantidades de energia/calor proveniente do exterior. Relativamente ao índice de redução sonora, importa considerar a localização das fontes de ruído, selecionando as janelas com maior desempenho acústico para colocação na direção das mesmas.

### **6.3 Regras de especificação padronizadas na Norma NP 4517:2014**

A NP 4517 é um documento nacional com recomendações de aplicação da caixilharia face à exposição dos locais onde serão instaladas tendo em conta as respetivas classificações obtidas em ensaios. A norma tem como objetivo selecionar as classes de desempenho mínimo das janelas, portas exteriores e fachadas leves com vidro, a instalar em Portugal e destina-se a apoiar a aplicação de normas de produto [51].

#### **6.3.1 Coeficiente de transmissão térmica, $U_w$**

Os valores do coeficiente de transmissão térmica da janela,  $U_w$ , podem apresentar um isolamento térmico inferior nas janelas duplas, uma vez que os valores de isolamento térmico se aplicam ao vão. O valor de  $U_w$  deve ser bem especificado de acordo com o estipulado na norma EN ISO 10077-1 [52].

##### **6.3.1.1 Edifícios de habitação**

No caso de a área de janela ser inferior a 20% da área do pavimento do compartimento que serve, estão estabelecidos os valores de  $U_w$  de referência para janela e fachadas leves com vidro no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas até 20% da área do pavimento e valor do coeficiente de transmissão térmica para fachadas leves com vidro, para edifícios de habitação [51]

| Zona Climática  | I1  | I2  | I3  |
|---|-----|-----|-----|
| $U_w [W/m^2 \cdot K]$   | 2,8 | 2,4 | 2,2 |
| $U_w [W/m^2 \cdot K]$ – janela na qual será aplicado o dispositivo de oclusão de permeabilidade ao ar média | 3,6 | 3,0 | 2,7 |
| $U_{cw} [W/m^2 \cdot K]$  | 1,1 | 1,0 | 0,9 |

Já nos casos em que a área da janela é superior a 20% da área do pavimento do compartimento que serve, os valores de  $U_w$  podem ser retirados do gráfico apresentado na Figura 6.1.

Sabendo a zona climática de implementação do envidraçado e a existência ou não de dispositivos de oclusão, para uma determinada percentagem de  $A_{env}/A_{facha}$ . O gráfico da Figura 6.1 fornece os valores de  $U_w$ . É, também, possível recorrer ao valor da  $A_{env}/A_{útil}$ . Importa salientar que para se recorrer aos valores fornecidos pelo gráfico deve verificar-se que  $Profundidade/Pé\ direito = 2$ , para o compartimento relacionado.

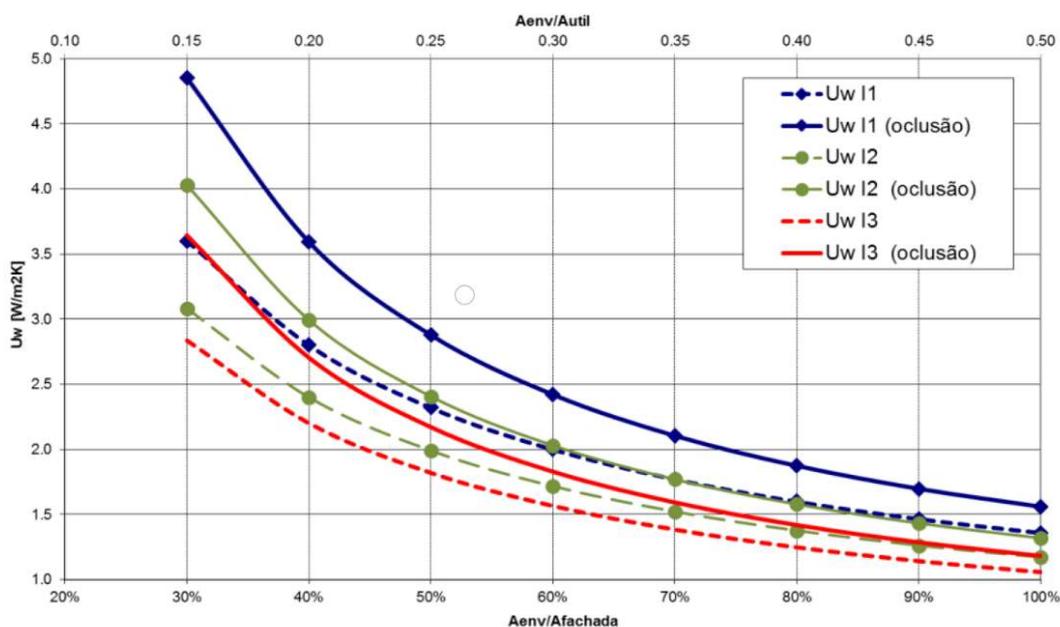


Figura 6.1 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas com área superior a 20% da área do pavimento, [51].

Caso os vãos envidraçados não sejam sombreados pelo exterior, possuam vidro duplo incolor e um fator solar superior a 0,75, para assegurar o balanço térmico equivalente ao da fachada de referência o coeficiente de transmissão térmica deve ser acrescido do incremento do Quadro 6.2. Este incremento contabiliza a ocorrência de ganhos solares através dos envidraçados das fachadas leves com vidro.

Quadro 6.2. Incremento para correção do coeficiente de transmissão térmica mínimo de vão sem sombreamento e com vidro duplo incolor, [51].

| Orientação                                    | NE/NW | E/W | SE/SW | S   |
|---|-------|-----|-------|-----|
| Incremento ( $U_w$ eq gs vidro duplo incolor) | 0,3   | 1,4 | 2,7   | 3,5 |

Para  $0,75 > g > 0,1$ , para determinar o incremento a aplicar ao coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados, recorre-se à equação (6).

$$U_{w \text{ eq gs}} * \left( U_{w \text{ eq gs vidro duplo incolor}} * \frac{0,2+0,8*g}{0,75} \right) \quad (6)$$

Em que:

$U_{w \text{ eq gs}}$  – é o coeficiente de transmissão térmica equivalente dos ganhos solares da janela com vidro duplo e  $0,1 < g < 0,75$ ;

$U_{w \text{ eq gs vidro duplo incolor}}$  – é o coeficiente de transmissão térmica equivalente dos ganhos solares da janela com vidro duplo incolor (incremento do Quadro 6.2);

$g$  – é o fator solar do vidro situado entre 0,1 e 0,75.

### 6.3.1.2 Edifícios de comércio e serviços

No caso de a área de janela ser inferior a 30% da área do pavimento do compartimento que serve, estão estabelecidos os valores de  $U_w$  de referência para janela e fachadas leves com vidro no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas até 30% da área da fachada e valor do coeficiente de transmissão térmica para fachadas leves com vidro, para edifícios de comércio e serviços, [51].

| Zona Climática  | I1  | I2  | I3  |
|---|-----|-----|-----|
| $U_w [W/m^2.K]$   | 4,3 | 3,3 | 3,3 |
| $U_w [W/m^2.K]$ – janela na qual será aplicado o dispositivo de oclusão de permeabilidade ao ar média | 6,0 | 4,4 | 4,4 |
| $U_{cw} [W/m^2.K]$  | 1,8 | 1,4 | 1,3 |

Já nos casos em que a área da janela é superior a 30% da área do pavimento do compartimento que serve, os valores de  $U_w$  podem ser retirados do gráfico apresentado na Figura 6.2.

Tal como para os edifícios de habitação, sabendo a zona climática de implementação do envidraçado e a existência ou não de dispositivos de oclusão, para uma determinada percentagem de  $A_{env}/A_{fachada}$ , o gráfico da Figura 6.2 fornece os valores de  $U_w$ . É, também, possível recorrer ao valor da  $A_{env}/A_{útil}$ . Importa salientar que para se recorrer aos valores

fornechos pelo gráfico deve verificar-se que  $Profundidade/Pé\ direito = 2$ , para o compartimento relacionado.

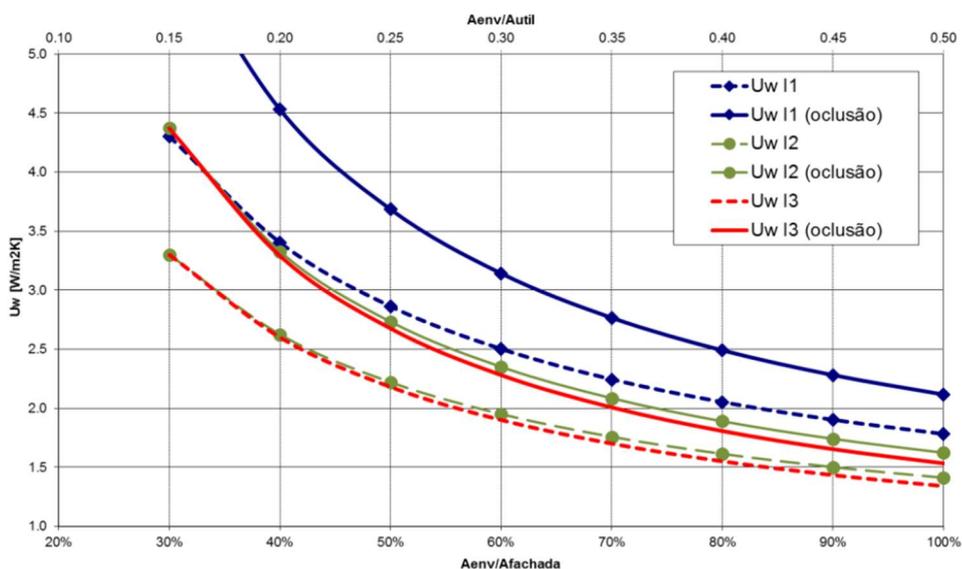


Figura 6.2 – Coeficiente de transmissão térmica de janelas com área diferente de 30% da área da fachada, para edifícios de comércio e serviços, [51].

Caso os vãos envidraçados não sejam sombreados pelo exterior, possuam vidro duplo incolor e um fator solar superior a 0,75, para assegurar o balanço térmico equivalente ao da fachada de referência o coeficiente de transmissão térmica deve ser acrescido do incremento do Quadro 6.2.

Para  $0,75 > g > 0,1$ , para determinar o incremento a aplicar ao coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados, recorre-se à equação (6).

### 6.3.2 Fator solar, $g$

Para evitar o sobreaquecimento interior é necessário ter em consideração os valores máximos do fator solar do vão. Os valores do Quadro 6.4 aplicam-se a vãos não orientados a norte e com  $5\%A_{pav} > A_{vão} > 15\%A_{pav}$ .

Quadro 6.4 – Valor limite máximo do fator solar do vão,  $g_{máx}$ , [51].

| Zona climática    | V1   | V2   | V3  |
|-------------------|------|------|-----|
| Classe de Inércia |      |      |     |
| Fraca             | 0,15 | 0,15 | 0,1 |
| Média             | 0,56 | 0,56 | 0,5 |
| Forte             | 0,56 | 0,56 | 0,5 |

Para os vãos com  $A_{vão} > 15\%A_{pav}$ , o fator solar máximo indicado no Quadro 6.3 deve ser reduzido proporcionalmente ao aumento da área envidraçada de acordo com equação (7).

$$g \leq g_{m\acute{a}x} 0,15 * \frac{A_u}{A_{env}} \quad (7)$$

### 6.3.3 Índice de isolamento sonoro, $R_w$

No caso dos edificios de habitação é necessário garantir o isolamento a sons aéreos de fachadas. Este isolamento é expresso pelo índice de isolamento sonoro  $D_{2m,nT,w}$  e está sujeito aos requisitos apresentados no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 – Limites regulamentares do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e quartos ou zonas de estar, adaptado de [51].

| $D_{2m,nT}$  | Localização   |
|--|---|
| $\geq 33$ dB   | Zonas mistas sujeitas às seguintes condições de ruído ambiente exterior:<br>$L_{den} \leq 65$ dB(A)<br>$L_n \leq 55$ dB(A)    |
| $\geq 28$ dB   | Zonas sensíveis sujeitas às seguintes condições de ruído ambiente exterior:<br>$L_{den} \leq 55$ dB(A)<br>$L_n \leq 45$ dB(A) |
| Para uma área transparente superior a 60% da área do elemento de fachada em análise, $D_{2m,nT}$ , deve ser sujeito a uma correção através dos termos de adaptação $C$ ou $C_{tr}$ , de acordo com o tipo de ruído dominante nas emissões. |   |

Assim, o valor do índice  $D_{2m,nT,w}$  pode ser obtido através da equação (8):

$$D_{2m,nT} = R_w + 10 \log\left(\frac{0,32*V}{S}\right) - 2dB \quad (8)$$

Sendo que o valor -2dB corresponde à correção relativa às transmissões marginais do ruído.

Em que:

$S$  – é a área total da fachada, [m<sup>2</sup>];

$R_w$  – índice de isolamento sonoro estimado para a fachada [dB];

$V$  – volume do espaço interior [m<sup>3</sup>].

Para as fachadas dos edificios localizados em zonas mais ruidosas, é requerido um valor mínimo de isolamento sonoro a sons aéreos de 33dB a garantir, pelos que é aconselhável incrementar este valor para melhorar o nível de conforto acústico, devendo garantir um isolamento de 35dB a 36dB.

O índice de redução sonora ponderado da fachada, de acordo com a norma, pode ser obtido através da equação (9):

$$R_w = 10 \log \frac{S}{\sum S_k * 10^{-\frac{R_{w,k}}{10}} + S_j * 10^{-\frac{R_j}{10}}} \quad (9)$$

Em que:

$S_k$  – é a área da componente opaca da fachada do compartimento [m<sup>2</sup>];

$S_j$  – é a área da janela [m<sup>2</sup>];

$R_{w,k}$  – índice de isolamento sonoro estimado para a parte opaca;

$R_j$  – índice de isolamento sonoro da caixilharia (envidraçado + caixilho).

## 6.4 Exemplo de aplicação

Os exemplos que se seguem pretendem verificar a aplicabilidade dos métodos de obtenção dos valores de  $U_w$ ,  $g$  e  $R_w$  apresentados na norma portuguesa NP 4517:2014.

Para que seja possível proceder com esta análise é necessário estabelecer as informações relativas ao edifício e ao sistema de envidraçado.

### 6.4.1 Exemplo de aplicação 1

- Edifício de habitação;
- Localização: Douro;
- Área do envidraçado é 30% da área do pavimento;
- Zona climática de inverno (I2 e V3);
- Ausência de dispositivos de oclusão;
- Fachada orientada a sul;
- Classe de inércia térmica: média;
- Perfil de alumínio com corte térmico;

- Janela de correr com 2 folhas móveis.

Para determinação do coeficiente de transmissão térmica, considerando o edifício de habitação com  $A_{env} > 30\% A_{pav}$ , dever recorrer-se ao uso da Figura 6.1. Sabe-se que a zona climática do Douro é a I2 uma vez que os Graus-dia de aquecimento são de 1764 °C e, de acordo com [53], a zona climática I2 insere-se nos graus-dia  $1300 < GD \leq 1800$ . Considerando que o sistema envidraçado não possui qualquer tipo de dispositivos de oclusão, então o valor máximo de  $U_w$  será cerca de 3,2 [W/m<sup>2</sup>.K], como se pode verificar na Figura 6.3.

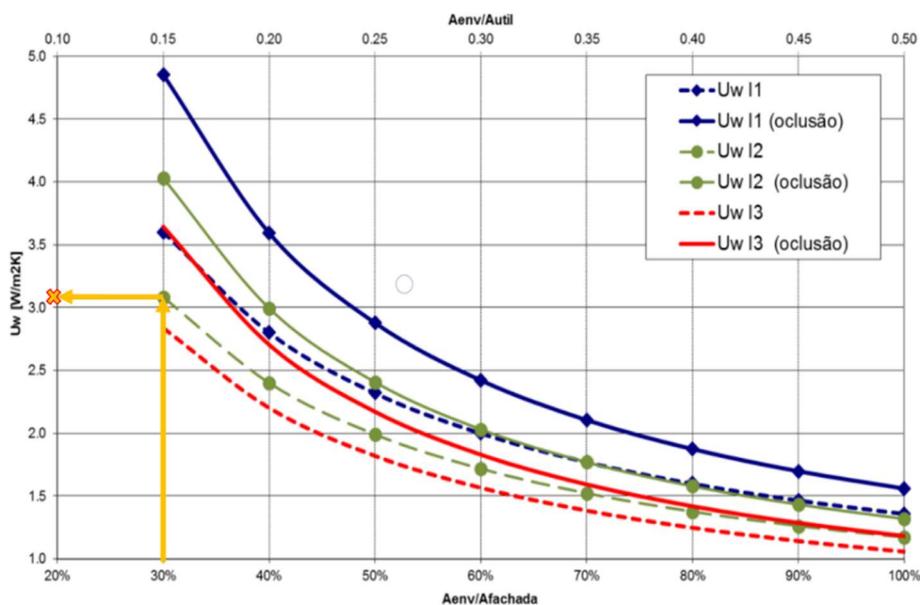


Figura 6.3 – Valor do coeficiente de transmissão térmica atendendo à informação prestada sobre o edifício e o sistema envidraçado.

O valor de  $U_w$  é bastante elevado uma vez que a área envidraçada é considerável, podendo ser melhorado com a implementação de dispositivos de oclusão ou diminuição da área envidraçada.

Relativamente ao fator solar da habitação localizada no Douro, sabendo que esta pertence à zona climática de verão V3, uma vez que  $\theta_{ext,v} = 22,7$  °C e a zona climática V3 verifica-se para  $\theta_{ext,v} > 22$  °C, de acordo com [53]. Tendo em atenção a classe de inércia térmica média, recorre-se ao Quadro 6.4 para determinação do valor de  $g_{m\acute{a}x}$  e à equação (7) para determinação do  $g$  uma vez que  $A_{env} > 30\% A_{pav}$ . Assumindo uma área útil de 10 m<sup>2</sup> e uma área envidraçada de 3 m<sup>2</sup>, temos:

$$g \leq g_{m\acute{a}x} 0,15 * \frac{A_u}{A_{env}} \Leftrightarrow g \leq 0,5 * 0,15 * \frac{10}{3} \Leftrightarrow g \leq 0,25$$

Em relação aos valores de fator solar obtidos, estes encontram-se dentro dos limites dos requisitos exigidos, no entanto valores de fator solar tão baixos podem proporcionar problemas no que se refere à passagem da luz natural para o interior do compartimento.

#### 6.4.2 Exemplo de aplicação 2

- Edifício de comércio e serviços;
- Localização: Baixo Alentejo;
- Área do envidraçado é 40% da área do pavimento;
- Zona climática de inverno (I1 e V3);
- Ausência de dispositivos de oclusão;
- Fachada orientada a este;
- Classe de inércia térmica: média;
- Perfil de alumínio com corte térmico;
- Janela oscilobatente com 2 folhas móveis.

Para determinação do coeficiente de transmissão térmica, considerando o edifício de comércio e serviços com  $A_{env} > 30\% A_{pav}$ , dever recorrer-se ao uso da Figura 6.3. Sabe-se que a zona climática do Baixo Alentejo é a I1 uma vez que os Graus-dia de aquecimento são de 1068 °C e, de acordo com [53], a zona climática I1 insere-se no intervalo dos graus-dia  $GD < 1300$ . Considerando que o sistema envidraçado não possui qualquer tipo de dispositivos de oclusão, então o valor máximo de  $U_w$  será cerca de 3,4 [ $W/m^2.K$ ], como se pode verificar na Figura 6.4.

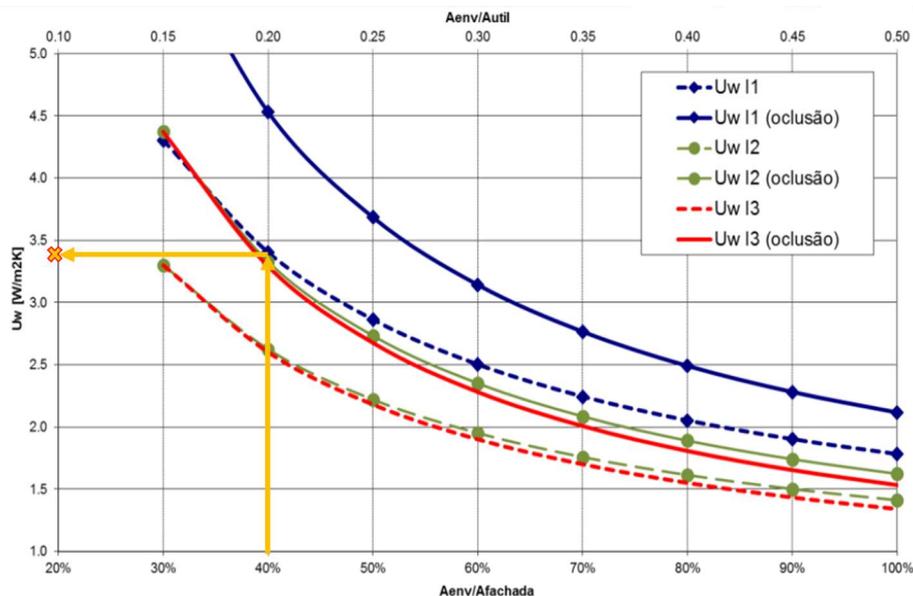


Figura 6.4 – Valor do coeficiente de transmissão térmica atendendo à informação prestada sobre o edifício e o sistema envidraçado.

Relativamente ao fator solar da habitação localizada no Baixo Alentejo, sabendo que esta pertence à zona climática de verão V3, uma vez que  $\theta_{ext,v} = 24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a zona climática V3 verifica-se para  $\theta_{ext,v} > 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de acordo com [53]. Tendo em atenção a classe de inércia térmica média, recorre-se ao Quadro 6.4 para determinação do valor de  $g_{m\acute{a}x}$  e à equação (7) para determinação do  $g$  uma vez que  $A_{env} > 30\% A_{pav}$ . Assumindo uma área útil do compartimento de  $100\text{ m}^2$  e uma área envidraçada de  $40\text{ m}^2$ , temos:

$$g \leq g_{m\acute{a}x} 0,15 * \frac{A_u}{A_{env}} \Leftrightarrow g \leq 0,5 * 0,15 * \frac{100}{40} \Leftrightarrow g \leq 0,19 ,$$

Ou seja, o fator solar do vidro a selecionar deve ser inferior ao indicado. Esta não é uma solução fácil de encontrar no mercado e, neste caso, deveria equacionar-se o uso de dispositivo de proteção ou optar pela redução da área envidraçada.

### 6.4.3 Exemplo de aplicação 3

Por forma a efetuar o cálculo do índice de isolamento sonoro da fachada é necessário estabelecer as dimensões da janela e da parte opaca, bem como o índice de redução sonora de cada elemento. No exemplo que se apresenta, considerou-se uma parede dupla de tijolo de 15 cm + tijolo de 11 cm com uma caixa de ar de 5 cm parcialmente preenchida com material absorvente, com um  $R_{w,k}$  aproximado de 50 dB e uma janela completa (vidro + caixilho) com  $R_j = 37\text{ dB}$ . Para possibilitar a observação da influência da área total da janela no isolamento sonoro, serão realizados cálculos aumentando a área da janela e diminuindo a área da parede (parte opaca).

Assumiu-se uma área total da fachada unitária,  $S = 1 \text{ m}^2$ , em que se considera por exemplo 20% para a janela,  $S_j = 0,2 \text{ m}^2$ , e 80 % para a parte opaca,  $S_k = 0,8 \text{ m}^2$ .

Os valores considerados para os cálculos, realizados recorrendo à equação (9), e os resultados obtidos encontram-se no Quadro 6.6.

Quadro 6.6 – Cálculo dos valores de  $R_w$ , de acordo com a norma NP 4517:2014.

| S | $S_k$ | $R_{w,k}$ (dB) | $S_j$ | $R_j$ (dB) | $R_w$ (dB) |
|---|-------|----------------|-------|------------|------------|
| 1 | 0,8   | 50             | 0,2   | 37         | 43,2       |
| 1 | 0,5   | 50             | 0,5   | 37         | 39,8       |
| 1 | 0,2   | 50             | 0,8   | 37         | 37,9       |

Os resultados obtidos no Quadro 6.6 sugerem, como era expectável, que o aumento da área da janela leva à diminuição do índice de redução sonora global da fachada. Para áreas de envidraçado elevadas, o desempenho global tende a aproximar-se do desempenho da janela.

Para calcular o parâmetro regulamentar,  $D_{2m,nT,w}$ , que permite avaliar o isolamento sonoro das fachadas dos edifícios, é necessário conhecer a área da fachada e o volume do compartimento (ver equação 8). Assim, como exemplo, assume-se uma sala de  $4 \times 5 \text{ m}^2$  em planta em que o pé direito é 2.7 m (situação a). A área da parede da fachada seria  $5 \times 2.7 \text{ m}^2$  e o seu volume seria  $54 \text{ m}^3$ .

Recorrendo à equação (8), obtêm-se os resultados apresentados no Quadro 6.7.

Quadro 6.7 – Valores de  $D_{2m,nT,w}$ .

| $R_w$ (dB) | $D_{2m,nT,w}$ (dB) <sup>a</sup> | $D_{2m,nT,w}$ (dB) <sup>b</sup> | $D_{2m,nT,w}$ (dB) <sup>c</sup> | $D_{2m,nT,w}$ (dB) <sup>d</sup> |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 43,2       | 42                              | 41                              | 44                              | 45                              |
| 39,8       | 39                              | 38                              | 41                              | 42                              |
| 37,9       | 37                              | 36                              | 39                              | 40                              |

É possível observar que para as dimensões da situação “a” os valores de  $D_{2m,nT,w}$  são relativamente próximos dos valores de  $R_w$ .

Para verificar a influência da área e volume no isolamento a sons aéreos de fachadas assume-se um compartimento com menor área em planta ( $3 \times 3 \text{ m}^2$ ), e um pé direito de 2,7 m (situação b), assumindo as mesmas proporções de parte opaca e envidraçada usadas no exemplo anterior. Assim, a área da fachada seria  $8,1 \text{ m}^2$  e o volume passaria a ser de  $24,3 \text{ m}^3$ . Neste caso, verifica-se uma ligeira redução do isolamento sonoro em relação ao primeiro caso.

Assumindo um aumento da área e do volume, pode considerar-se um compartimento com área em planta de  $8 \times 6 \text{ m}^2$ , e um volume de  $129,6 \text{ m}^3$  (com pé direito de  $2,7 \text{ m}$ ). A situação “c” refere-se ao comprimento da sala corresponder à parede de fachada ( $21,6 \text{ m}^2$ ) e a situação “d” à largura da sala corresponder à parede da fachada ( $16,2 \text{ m}^2$ ).

Verifica-se que em relação à situação “a”, o aumento da área da fachada e do volume, na situação “c”, conduz a um aumento do isolamento sonoro. Este aumento é ainda maior se a parede da fachada corresponder à largura do compartimento (situação “d”).

Quando a relação  $0,32V/S$  é superior a 1 tem um impacto positivo no isolamento sonoro, enquanto que quando é inferior a 1 tem um impacto negativo no isolamento sonoro.

No entanto, todos os resultados do Quadro 6.7. para  $D_{2m,nT}$  cumprem os requisitos regulamentares.

É importante, quando se usam grandes áreas de envidraçado, considerar janelas com um isolamento suficiente e bastante superior ao valor do requisito regulamentar, para existir margem que permita suprir a diminuição de isolamento devida às transmissões marginais e às eventuais relações prejudiciais do volume e da área.

O uso desta norma torna-se vantajoso uma vez que esta compila requisitos e expressões que permitem o cálculo térmico e acústico de forma facilitada aos projetistas, sem que estes percam tempo à procura da informação dispersa em livros e outras normas. No entanto, importa considerar que os valores obtidos nem sempre são realistas uma vez que não é considerada a orientação da fachada onde é colocada a janela, nem o tipo de caixilho e abertura do sistema envidraçado.

---

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação aborda a análise de várias soluções de envidraçado tanto na vertente acústica como na vertente térmica tendo em conta a garantia não só do conforto a proporcionar no interior dos edifícios, como das especificações técnicas, requisitos e leis a seguir. A análise efetuada pretendeu comparar várias soluções, por forma a que seja possível a seleção das melhores. Com a realização deste trabalho de dissertação torna-se evidente a falta de informação relativa a soluções eficientes no que diz respeito à combinação de um conforto térmico e acústico melhorado, tornando-se difícil estabelecer uma relação entre parâmetros que permitam selecionar soluções envidraçadas que favoreçam ambos. A informação disponível relativamente ao comportamento térmico e acústico em simultâneo, para além de ser escassa não relaciona diretamente os mesmos por forma a estabelecer um método de previsão das soluções otimizadas a implementar na prática. Para além disso, torna-se ainda mais difícil a escolha destas soluções uma vez que na sua generalidade as ferramentas de cálculo apenas fornecem informação relativa a vidros e não ao sistema de janela, composição vidro mais caixilho. Refira-se que, no que diz respeito ao comportamento acústico dos caixilhos, geralmente, os fabricantes dos mesmos não fornecem essa informação. Assim sendo, mesmo quando se obtém resultados favoráveis para os vidros o mesmo pode não se verificar quando aplicados na prática ou quando se considera a janela. A caracterização laboratorial das janelas, é por enquanto, a metodologia mais eficaz para avaliar o seu comportamento acústico.

O impacto ambiental, no que se refere à pegada de carbono (ver Quadro 2.4), das soluções envidraçadas selecionadas para implementação em edifícios pode ser minimizado através da seleção de materiais constituintes do vão envidraçado. A seleção adequada dos materiais permite ainda contornar perdas térmicas, diminuindo o uso de combustíveis fósseis para aquecimento (ver Quadro 4.1), e ganhos de calor indesejados. Para garantir a melhor seleção dos envidraçados para a envolvente de edifícios importa considerar o tipo de vidro, tipo de perfil e abertura da janela, entre outros componentes com grande influência no seu desempenho térmico e acústico, como ferragens, vedantes, espaçadores, películas e grelhas de ventilação. Além desses materiais, importa garantir a correta instalação do envidraçado para que a sua qualidade seja garantida. Importa referir que esta seleção nem sempre é fácil uma vez que ao selecionar os componentes que garantem o melhor desempenho térmico pode comprometer o desempenho acústico e vice-versa. No entanto alguns componentes são comuns à térmica e à acústica (ver Quadro 4.2), sendo de grande importância garantir a melhor seleção desses parâmetros como a composição do sistema envidraçado (simples, duplo ou triplo), o tipo de abertura da janela, o tipo material do caixilho e o uso de películas.

Por forma a garantir um desempenho térmico das soluções envidraçadas é importante recorrer ao uso de películas de baixa emissividade. Estas possuem grande influência no desempenho do sistema de janela ao causar a diminuição da transmitância solar direta e mesmo assim garantir bons níveis de luz natural no interior.

Com base nos dados recolhidos (ver Capítulo 5), torna-se fácil estabelecer a relação existente entre vidros duplos e vidros triplos, em termos de isolamento térmico e do fator solar. Os vidros triplos apresentam valores de coeficiente de transmissão térmica do vidro e o fator solar inferiores aos vidros duplos, o que nos permite verificar que para além de um melhor desempenho térmico estes permitem uma passagem de energia através do envidraçado inferior, devido ao maior número de camadas que os raios solares necessitam de atravessar, um fator solar menor é favorável para garantir a diminuição do risco de ocorrência de sobreaquecimento nos meses de arrefecimento.

O isolamento acústico de um único elemento de separação pode aumentar se o elemento for dividido em dois painéis separados por uma câmara de ar, no entanto, em relação aos vidros simples, os vidros duplos possuem quebras de isolamento sonoro adicionais. O mesmo se verifica ao comparar os vidros triplos com os vidros duplos com a mesma massa, daí nem sempre ser benéfico para o isolamento acústico o uso de vidros triplos em detrimento de vidros duplos [40].

Torna-se essencial destacar a influência do uso de vidros laminados com uma ou mais camadas de PVB como sendo uma das formas mais comuns de melhorar o desempenho acústico das soluções envidraçadas, sendo que este também influencia o desempenho térmico.

Realce-se que os parâmetros de escolha das soluções envidraçadas destinadas à envolvente de edifícios passam pela seleção de tipo de gás presente na cavidade, sendo favorável a escolha de gases nobres, a espessura de janela, das caixas de gás e vidros, a influência do tipo de caixilho, do tipo de janela e do tipo de abertura, a luminosidade, fator solar, influência das baixas e altas frequências, entre outros. No entanto é arriscado favorecer um parâmetro em detrimento de outro, pelo que todos os resultados expostos e análises efetuadas possam ter algum grau de subjetividade e incerteza inultrapassável.

## **7.1 Trabalhos futuros**

A falta de resultados e ensaios que relacionem a acústica e a térmica de vãos envidraçados para a construção da envolvente de edifícios evidencia a necessidade de realização de estudos que contabilizem em simultâneo todos os parâmetros essenciais e que permitam um dimensionamento de soluções envidraçadas otimizadas. A questão da sustentabilidade das soluções também deve ser alvo de atenção.

---

Devido às exigências cada vez mais rigorosas no que diz respeito ao conforto exigido no interior dos edifícios, torna-se imperativo a criação ferramentas que relacionem o comportamento acústico e térmico das janelas para apoiar os projetos na seleção das mesmas. Estas devem basear-se em resultados de ensaios laboratoriais ou ensaios in situ, ou cálculos validados experimentalmente, para permitir a avaliação das soluções mais adequadas, tendo sempre presente os requisitos a satisfazer.

Para além disto, pensa-se ser importante que as ferramentas apresentem resultados não só para vidros, mas também para caixilhos e para a janela em si, tendo em conta a ligação desta com a fachada que se pretende implementar em projeto, uma vez que a eficiência da janela pode ser prejudicada devido às ligações implementadas entre janela e fachada ou mesmo devido ao método de aplicação da mesma em obra. Este tipo de ferramenta também deveria incluir resultados da análise de custos.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Cardinale, G. Rospi, and T. Cardinale, “Numerical and experimental thermal analysis for the improvement of various types of windows frames and rolling-shutter boxes,” *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 101–110, 2015, doi: 10.1007/s40095-014-0140-2.
- [2] J. Á. Delgado, M. D. Robador, J. A. Barrera-Vera, and M. Marrero, “Glazing selection procedure for office building retrofitting in the Mediterranean climate in Spain,” *J. Build. Eng.*, vol. 33, no. April 2020, 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.101448.
- [3] ADENE - Agência para a Energia, “Curso de prescritores de janelas eficiente CLASSE<sup>+</sup> - Tema 1: Princípios e conceitos básicos,” 2021.
- [4] G. Baldinelli *et al.*, “Energy and environmental performance optimization of a wooden window: A holistic approach,” *Energy Build.*, vol. 79, pp. 114–131, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.010.
- [5] ALUNEFE, “-,” *ALUNEFE - Soluções de Caixilharia*. <http://www.alunefe.com/blog-alunefe.html> (accessed Feb. 04, 2021).
- [6] SOSOARES, “Produtos de Vidro,” *Grupo SOSOARES*. <https://www.grupososoares.pt/pt/vidro/produto/17> (accessed Feb. 02, 2021).
- [7] VitroChaves, “Silêncio e Tranquilidade,” *VitroChaves Indústria de Vidro S.A.* <https://www.vitrochaves.com/?p=499&lang=pt> (accessed Feb. 09, 2021).
- [8] Vasiglass, “Tipos de vidro, Características e Assesórios para Vidros,” *Vasiglass - Qualidade e inovação em soluções de vidro plano*. <https://vasiglass.pt/tipos-de-vidro-caracteristicas-acessorios/> (accessed Feb. 04, 2021).
- [9] S. L. Guardian Glass España C.V., “Os nossos vidros,” *Guardian Glass*. <https://www.guardiansun.pt/os-nossos-vidros> (accessed Feb. 04, 2021).
- [10] V. Mendes, “Quantificação do coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados,” 2011.
- [11] ADENE - Agência para a Energia, “Guia técnico para janelas eficientes.” Lisboa, pp. 1–11, 2019.
- [12] A. Diogo, “Reabilitação da caixilharia exterior de um edifício de serviços em Lisboa: caso de estudo,” ISEL, 2017.
- [13] A. Oliveira, “VÃOS ENVIDRAÇADOS, DESEMPENHO TÉRMICO E CONFORTO TÉRMICO HUMANO,” FEUP, 2016.

- 
- [14] L. C. F. Barbosa, “Controlo de qualidade em caixilharias de alumínio,” Universidade de Aveiro, 2010.
- [15] N. Granzotto *et al.*, “Energy and acoustic performances of windows and their correlation,” *Energy Build.*, vol. 136, pp. 189–198, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.024.
- [16] A. Witek and B. Pietruszka, “Estimating thermal transmittance of the aluminium window profiles in practice,” in *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 172, doi: 10.1051/e3sconf/202017224003.
- [17] ADENE - Agência para a Energia, “Curso de prescritores de janelas eficiente CLASSE+ - Tema 2: Características da janela,” 2021.
- [18] CAIXIAVE, “Guia das Janelas Eficientes,” Famalicão. [Online]. Available: [www.caixiavegroup.com](http://www.caixiavegroup.com).
- [19] Abravidros, “Vidro de A a Z,” *Abravidros*. .
- [20] *ISO 10077-1 - Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Parte 1: General*. 2017, p. 13.
- [21] *TECHNICAL REPORT ISO/TR 52022-2: Energy performance of buildings — Thermal, solar and daylight properties of building components and elements — Part 2: Explanation and justification*. ISO, 2017.
- [22] *ISO 52022-1: Energy performance of buildings — Thermal, solar and daylight properties of building components and elements — Part 1: Simplified calculation method of the solar and daylight characteristics for solar protection devices combined with glazing*. 2017.
- [23] *ISO 52002-3: Energy performance of buildings — Thermal, solar and daylight properties of building components and elements — Part 3: Detailed calculation method of the solar and daylight characteristics for solar protection devices combined with glazing*. 2017.
- [24] *ISO 9050: Glass in building — Determination of transmittance, ultraviolet transmittance transmittance, total solar energy light transmittance, solar direct and related glazing factors*. Switzerland: ISO copyright office, 2003.
- [25] *ISO 10140-2:2010 - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of buildings elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulations*. ISO copyright office, 2010.
- [26] *ISO 10140-3:2010 Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 3: Measurement of impact sound insulation*. 2010.
-

- 
- [27] *ISO 717-1:2013 Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation*. Caparica: IPQ, 2013.
- [28] *ISO 10140-1:2016 - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 1: Application rules for specific products*. 2016.
- [29] *ISO 10140-4:2010 - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements*. 2010.
- [30] *ISO 10140-5:2010 - Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 5: Requirements for test facilities and equipment*. ISO copyright office, 2010.
- [31] *ISO 717-1 - Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation*. 2020.
- [32] Saint-Gobain, “CalumenLive.” <https://glassanalytics.guardian.com/app/configure>.
- [33] Guardian Glass, “Guardian Glass Analytics.” <https://glassanalytics.guardian.com/app/configure>.
- [34] Guardian Glass, “Guardian Glass Acoustic Assistant 3.0.” <https://glassanalytics.guardian.com/acoustics-calculator/calculator>.
- [35] ADENE - Agência para a Energia, “Curso de prescritores de janelas eficiente CLASSE<sup>+</sup> - Tema 4: Prescrição de Parâmetros Técnicos—Caso de estudo,” 2021.
- [36] S. Saadatian, F. Freire, and N. Simões, “Embodied impacts of window systems: A comparative assessment of framing and glazing alternatives,” *J. Build. Eng.*, vol. 35, p. 102042, 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.102042.
- [37] D. NÉMETH and L. ELEK, “Keret-üveg arány befolyása az ablak hőtechnikai teljesítőképességére,” 2016.
- [38] K. Larsson and D. Glebe, “Façade insulation at low frequencies – influence of window design,” 2016.
- [39] H.-W. Bielefeld and T. DeGanyar Schüco USA, “Acoustical Performance of Aluminum Framed Façade Systems,” pp. 1513–1520, 2018, [Online]. Available: [http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/253\\_Euronoise2018.pdf](http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/253_Euronoise2018.pdf).
- [40] A. J. B. Tadeu and D. M. R. Mateus, “Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation,” *Appl. Acoust.*, vol. 62, no. 3, pp. 307–325, 2001, doi: 10.1016/S0003-682X(00)00032-3.
- [41] S. Perumal, S. Rajendrian, V. Venkatraman, D. Sundaresan, and L. Pandiyan,
-

- “Experimental study about thermal resistance of windows with air gap between two glasses used in single houses,” *Therm. Sci.*, vol. 24, pp. 515–518, 2020, doi: 10.2298/TSCI190411031P.
- [42] A. Homb, “Assessment of sound insulation of sealing solutions, window slits and openings,” in *Euronoise 2018*, 2018, pp. 1495–1502.
- [43] N. Cardinale, G. Rospi, and T. Cardinale, “Numerical and experimental thermal analysis for the improvement of various types of windows frames and rolling-shutter boxes,” *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 6, no. 2, 2015, doi: 10.1007/s40095-014-0140-2.
- [44] Z. Nunes and C. Jones, “Standardising the testing and modelling methods of predicting the sound reduction through open windows,” *Proc. Inst. Acoust.*, vol. 38, no. September, pp. 78–93, 2016.
- [45] B. Locher *et al.*, “Differences between outdoor and indoor sound levels for open, tilted, and closed windows,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 1, pp. 1–16, 2018, doi: 10.3390/ijerph15010149.
- [46] L. Busa, S. Secchi, and S. Baldini, “Effect of façade shape for the acoustic protection of buildings,” *Build. Acoust.*, vol. 17, no. 4, pp. 317–338, 2010, doi: 10.1260/1351-010X.17.4.317.
- [47] C. Hopkins, *Sound insulation*, vol. 142, no. 3605. Elsevier Ltd., 2007.
- [48] *EN 14351-1:2006+A2 - Windows and doors - Product standard, performance characteristics - Part 1: Windows and external pedestrian doorsets*. 2006.
- [49] Y. G. Tong and S. K. Tang, “Acoustical Benefits of Plenum Window as Facade Device - A Parametric Study,” *MATEC Web Conf.*, vol. 103, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201710303021.
- [50] P. do C. de Ministros, “Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro,” *Diário da República, 1ª Série - n.º 237/*, no. 2, pp. 7-(21) a 7-(45), 2020, [Online]. Available: <https://dre.pt/application/file/a/150570803>.
- [51] *NP 4517: Especificação dos requisitos de desempenho das janelas, portas e fachadas leves com vidro em função das suas solicitações*. IPQ, 2014.
- [52] *EN ISO 10077-1 - Thermal Performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Parte 1: General*. EN ISO 10077-1, 2006.
- [53] Despacho n.º 15793-F, “Zonamento Climático,” *Diário da República*, vol. 2.ª série, no. 234, pp. 26–31, 2013.
- [54] *ISO 10292 - Glass in building - Calculation of steady-state U values (thermal*

*transmittance) of multiple glazing. 1994.*

## ANEXO A – TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DAS JANELAS (ISO 10077-1:2017)

Quadro A.1 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 30% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras, [20].

| Type of glazing  | $U_g$ | Thermal transmittances, $U_w$ , for vertical windows with fraction of the frame area 30 % of the whole window area for common types of glazing spacer bars and following $U_f$ values |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------|-------|---|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                  |       | 0,80  | 1,0  | 1,2  | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,6 | 3,0 | 3,4 | 3,8 | 7,0 |
| Single           | 5,8   | 4,3   | 4,4  | 4,4  | 4,5 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,7 | 4,8 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 6,1 |
| Double or triple | 3,3   | 2,7   | 2,8  | 2,8  | 2,9 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 4,5 |
|                  | 3,2   | 2,6   | 2,7  | 2,7  | 2,8 | 2,9 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,5 | 3,6 | 4,4 |
|                  | 3,1   | 2,6   | 2,6  | 2,7  | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 4,3 |
|                  | 3,0   | 2,5   | 2,5  | 2,6  | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 4,2 |
|                  | 2,9   | 2,4   | 2,5  | 2,5  | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 4,2 |
|                  | 2,8   | 2,3   | 2,4  | 2,5  | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 4,1 |
|                  | 2,7   | 2,3   | 2,3  | 2,4  | 2,5 | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 4,0 |
|                  | 2,6   | 2,2   | 2,3  | 2,3  | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,6 | 2,9 | 3,0 | 3,2 | 4,0 |
|                  | 2,5   | 2,1   | 2,2  | 2,3  | 2,3 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 3,1 | 3,9 |
|                  | 2,4   | 2,1   | 2,1  | 2,2  | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,8 |
|                  | 2,3   | 2,0   | 2,1  | 2,1  | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,4 | 2,7 | 2,8 | 3,0 | 3,8 |
|                  | 2,2   | 1,9   | 2,0  | 2,0  | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,6 | 2,8 | 2,9 | 3,7 |
|                  | 2,1   | 1,9   | 1,9  | 2,0  | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 3,6 |
|                  | 2,0   | 1,8   | 1,9  | 2,0  | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 3,6 |
|                  | 1,9   | 1,8   | 1,8  | 1,9  | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,7 | 3,6 |
|                  | 1,8   | 1,7   | 1,8  | 1,8  | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,6 | 2,7 | 3,5 |
|                  | 1,7   | 1,6   | 1,7  | 1,7  | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 3,4 |
|                  | 1,6   | 1,6   | 1,6  | 1,7  | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 3,3 |
|                  | 1,5   | 1,5   | 1,5  | 1,6  | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,5 | 3,3 |
|                  | 1,4   | 1,4   | 1,5  | 1,5  | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 3,2 |
| 1,3              | 1,3   | 1,4   | 1,5  | 1,5  | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 3,1 |     |
| 1,2              | 1,3   | 1,3   | 1,4  | 1,5  | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 3,1 |     |
| 1,1              | 1,2   | 1,3   | 1,3  | 1,4  | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,1 | 2,2 | 3,0 |     |
| 1,0              | 1,1   | 1,2   | 1,3  | 1,3  | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,9 |     |
| 0,9              | 1,1   | 1,1   | 1,2  | 1,2  | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,9 |     |
| 0,8              | 1,0   | 1,1   | 1,1  | 1,2  | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 2,0 | 2,8 |     |
| 0,7              | 0,93  | 0,99  | 1,0  | 1,1  | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,7 |     |
| 0,6              | 0,86  | 0,92  | 0,98 | 1,0  | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,7 |     |
| 0,5              | 0,79  | 0,85  | 0,91 | 0,97 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 2,6 |     |

Quadro A.2 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 20% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras, [20].

| Type of glazing  | $U_g$ | Thermal transmittances, $U_w$ , for vertical windows with fraction of the frame area 20 % of the whole window area for common types of glazing spacer bars and following $U_f$ values |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|------------------|-------|---|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                  |       | 0,8   | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,6 | 3,0 | 3,4 | 3,8 | 7,0 |  |
| Single           | 5,8   | 4,8   | 4,8  | 4,9  | 4,9  | 5,0  | 5,0 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,4 | 6,0 |  |
| Double or triple | 3,3   | 3,0   | 3,0  | 3,0  | 3,1  | 3,1  | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,5 | 3,6 | 4,1 |  |
|                  | 3,2   | 2,9   | 2,9  | 3,0  | 3,0  | 3,0  | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,5 | 4,0 |  |
|                  | 3,1   | 2,8   | 2,8  | 2,9  | 2,9  | 3,0  | 3,0 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,9 |  |
|                  | 3,0   | 2,7   | 2,8  | 2,8  | 2,8  | 2,9  | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,9 |  |
|                  | 2,9   | 2,6   | 2,7  | 2,7  | 2,8  | 2,8  | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,8 |  |
|                  | 2,8   | 2,6   | 2,6  | 2,6  | 2,7  | 2,7  | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,7 |  |
|                  | 2,7   | 2,5   | 2,5  | 2,6  | 2,6  | 2,6  | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,1 | 3,6 |  |
|                  | 2,6   | 2,4   | 2,4  | 2,5  | 2,5  | 2,6  | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,6 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,5 |  |
|                  | 2,5   | 2,3   | 2,4  | 2,4  | 2,4  | 2,5  | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,5 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,5 |  |
|                  | 2,4   | 2,2   | 2,3  | 2,3  | 2,4  | 2,4  | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,4 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,4 |  |
|                  | 2,3   | 2,2   | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,3  | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,4 | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 3,3 |  |
|                  | 2,2   | 2,1   | 2,1  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 3,2 |  |
|                  | 2,1   | 2,0   | 2,0  | 2,1  | 2,1  | 2,2  | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,2 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 3,1 |  |
|                  | 2,0   | 2,0   | 2,0  | 2,1  | 2,1  | 2,1  | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 3,1 |  |
|                  | 1,9   | 1,9   | 1,9  | 2,0  | 2,0  | 2,1  | 2,1 | 2,1 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 3,1 |  |
|                  | 1,8   | 1,8   | 1,9  | 1,9  | 1,9  | 2,0  | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 3,0 |  |
|                  | 1,7   | 1,7   | 1,8  | 1,8  | 1,9  | 1,9  | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,9 |  |
|                  | 1,6   | 1,7   | 1,7  | 1,7  | 1,8  | 1,8  | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,8 |  |
|                  | 1,5   | 1,6   | 1,6  | 1,7  | 1,7  | 1,7  | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,7 |  |
|                  | 1,4   | 1,5   | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,7  | 1,7 | 1,7 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,7 |  |
| 1,3              | 1,4   | 1,5   | 1,5  | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,6 |     |  |
| 1,2              | 1,3   | 1,4   | 1,4  | 1,5  | 1,5  | 1,5  | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,5 |     |  |
| 1,1              | 1,3   | 1,3   | 1,3  | 1,4  | 1,4  | 1,5  | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,4 |     |  |
| 1,0              | 1,2   | 1,2   | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,4  | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,3 |     |  |
| 0,9              | 1,1   | 1,1   | 1,2  | 1,2  | 1,3  | 1,3  | 1,3 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,3 |     |  |
| 0,8              | 1,0   | 1,1   | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,2  | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 2,2 |     |  |
| 0,7              | 0,93  | 0,97  | 1,0  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 2,1 |     |  |
| 0,6              | 0,85  | 0,89  | 0,93 | 0,97 | 1,0  | 1,1  | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 2,0 |     |  |
| 0,5              | 0,77  | 0,81  | 0,85 | 0,89 | 0,93 | 0,97 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,9 |     |  |

Quadro A.3 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 30% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras com desempenho térmico melhorado, [20].

| Type of glazing  | $U_g$ | Thermal transmittances, $U_w$ , for vertical windows with fraction of the frame area 30 %, spacer bars with improved thermal performance, and following $U_f$ values |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|------------------|-------|--|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                  |       | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,6 | 3,0 | 3,4 | 3,8 | 7,0 |  |
| Single           | 5,8   | 4,3  | 4,4  | 4,4  | 4,5  | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,7 | 4,8 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 6,2 |  |
| Double or triple | 3,3   | 2,7  | 2,7  | 2,8  | 2,9  | 2,9 | 3,0 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 4,4 |  |
|                  | 3,2   | 2,6  | 2,7  | 2,7  | 2,8  | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,0 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 4,4 |  |
|                  | 3,1   | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,7  | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,5 | 4,3 |  |
|                  | 3,0   | 2,5  | 2,5  | 2,6  | 2,6  | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 4,2 |  |
|                  | 2,9   | 2,4  | 2,5  | 2,5  | 2,6  | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 4,2 |  |
|                  | 2,8   | 2,3  | 2,4  | 2,4  | 2,5  | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 4,1 |  |
|                  | 2,7   | 2,3  | 2,3  | 2,4  | 2,4  | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 | 4,0 |  |
|                  | 2,6   | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,4  | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,9 |  |
|                  | 2,5   | 2,1  | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,5 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,9 |  |
|                  | 2,4   | 2,0  | 2,1  | 2,2  | 2,2  | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,7 | 2,8 | 3,0 | 3,8 |  |
|                  | 2,3   | 2,0  | 2,0  | 2,1  | 2,2  | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,4 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,7 |  |
|                  | 2,2   | 1,9  | 2,0  | 2,0  | 2,1  | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 3,7 |  |
|                  | 2,1   | 1,8  | 1,9  | 2,0  | 2,0  | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,2 | 2,5 | 2,6 | 2,8 | 3,6 |  |
|                  | 2,0   | 1,8  | 1,8  | 1,9  | 2,0  | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 3,6 |  |
|                  | 1,9   | 1,7  | 1,8  | 1,8  | 1,9  | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,7 | 3,5 |  |
|                  | 1,8   | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,8  | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 3,5 |  |
|                  | 1,7   | 1,6  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 3,4 |  |
|                  | 1,6   | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,7  | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,5 | 3,3 |  |
|                  | 1,5   | 1,4  | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,4 | 3,2 |  |
|                  | 1,4   | 1,4  | 1,4  | 1,5  | 1,5  | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 3,2 |  |
| 1,3              | 1,3   | 1,4  | 1,4  | 1,5  | 1,5  | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 3,1 |     |  |
| 1,2              | 1,2   | 1,3  | 1,3  | 1,4  | 1,5  | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,1 | 2,2 | 3,0 |     |  |
| 1,1              | 1,2   | 1,2  | 1,3  | 1,3  | 1,4  | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 3,0 |     |  |
| 1,0              | 1,1   | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,3  | 1,4 | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,9 |     |  |
| 0,9              | 1,0   | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 2,8 |     |  |
| 0,8              | 0,95  | 1,0  | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,8 |     |  |
| 0,7              | 0,88  | 0,94   | 1,0  | 1,1  | 1,1  | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,7 |     |  |
| 0,6              | 0,18  | 0,87   | 0,93 | 0,99 | 1,0  | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 2,6 |     |  |
| 0,5              | 0,74  | 0,80   | 0,86 | 0,92 | 0,98 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 2,5 |     |  |

Quadro A.4 – Transmissão térmica para janelas verticais com fração da área da moldura 20% de toda a área da janela, tipos comuns de barras espaçadoras com desempenho térmico melhorado, [20].

| Type of glazing  | $U_g$ | Thermal transmittances, $U_w$ , for vertical windows with fraction of the frame area 20 %, spacer bars with improved thermal performance, and following $U_f$ values |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |  |
|------------------|-------|--|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                  |       | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0 | 2,2 | 2,6 | 3,0 | 3,4 | 3,8 | 7,0 |  |
| Single           | 5,8   | 4,8  | 4,8  | 4,9  | 4,9  | 5,0  | 5,0  | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,4 | 6,0 |  |
| Double or triple | 3,3   | 2,9  | 3,0  | 3,0  | 3,1  | 3,1  | 3,1  | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 4,1 |  |
|                  | 3,2   | 2,9  | 2,9  | 2,9  | 3,0  | 3,0  | 3,1  | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 4,0 |  |
|                  | 3,1   | 2,8  | 2,8  | 2,9  | 2,9  | 2,9  | 3,0  | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,9 |  |
|                  | 3,0   | 2,7  | 2,7  | 2,8  | 2,8  | 2,9  | 2,9  | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,8 |  |
|                  | 2,9   | 2,6  | 2,7  | 2,7  | 2,7  | 2,8  | 2,8  | 2,9 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,7 |  |
|                  | 2,8   | 2,5  | 2,6  | 2,6  | 2,7  | 2,7  | 2,7  | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,7 |  |
|                  | 2,7   | 2,5  | 2,5  | 2,5  | 2,6  | 2,6  | 2,7  | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,6 |  |
|                  | 2,6   | 2,4  | 2,4  | 2,5  | 2,5  | 2,5  | 2,6  | 2,6 | 2,7 | 2,6 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,5 |  |
|                  | 2,5   | 2,3  | 2,3  | 2,4  | 2,4  | 2,5  | 2,5  | 2,5 | 2,6 | 2,5 | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 3,4 |  |
|                  | 2,4   | 2,2  | 2,3  | 2,3  | 2,3  | 2,4  | 2,4  | 2,5 | 2,5 | 2,4 | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 3,3 |  |
|                  | 2,3   | 2,1  | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,3  | 2,3  | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 3,3 |  |
|                  | 2,2   | 2,1  | 2,1  | 2,1  | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 3,2 |  |
|                  | 2,1   | 2,0  | 2,0  | 2,1  | 2,1  | 2,1  | 2,2  | 2,2 | 2,3 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 3,1 |  |
|                  | 2,0   | 1,9  | 2,0  | 2,0  | 2,0  | 2,1  | 2,1  | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 3,1 |  |
|                  | 1,9   | 1,8  | 1,9  | 1,9  | 2,0  | 2,0  | 2,0  | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,5 | 2,5 | 3,0 |  |
|                  | 1,8   | 1,8  | 1,8  | 1,8  | 1,9  | 1,9  | 2,0  | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,9 |  |
|                  | 1,7   | 1,7  | 1,7  | 1,8  | 1,8  | 1,8  | 1,9  | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,9 |  |
|                  | 1,6   | 1,6  | 1,6  | 1,7  | 1,7  | 1,8  | 1,8  | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,8 |  |
|                  | 1,5   | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,7  | 1,7  | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,7 |  |
|                  | 1,4   | 1,4  | 1,5  | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,6 |  |
| 1,3              | 1,4   | 1,4  | 1,4  | 1,5  | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,5 |     |  |
| 1,2              | 1,3   | 1,3  | 1,4  | 1,4  | 1,4  | 1,5  | 1,5  | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 2,5 |     |  |
| 1,1              | 1,2   | 1,2  | 1,3  | 1,3  | 1,4  | 1,4  | 1,4  | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,4 |     |  |
| 1,0              | 1,1   | 1,2  | 1,2  | 1,2  | 1,3  | 1,3  | 1,4  | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,3 |     |  |
| 0,9              | 1,0   | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,2  | 1,2  | 1,3  | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 2,2 |     |  |
| 0,8              | 0,96  | 1,0  | 1,0  | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,2  | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 2,1 |     |  |
| 0,7              | 0,88  | 0,92   | 0,96 | 1,0  | 1,0  | 1,1  | 1,1  | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 2,1 |     |  |
| 0,6              | 0,80  | 0,84   | 0,88 | 0,92 | 0,96 | 1,0  | 1,0  | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 2,0 |     |  |
| 0,5              | 0,72  | 0,76   | 0,80 | 0,84 | 0,88 | 0,92 | 0,96 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,9 |     |  |

## ANEXO B

### B.1 Transmitância visível, $\tau_v$

No cálculo da transmitância visível é utilizada a seguinte equação (B.1):

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=780 \text{ nm}} D_{\lambda} * \tau(\lambda) * V(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=780 \text{ nm}} D_{\lambda} * V(\lambda) * \Delta\lambda} \quad (\text{B.1})$$

Em que:

$D_{\lambda}$  – distribuição espectral relativa do iluminante normalizado  $D_{65}$ ;

$\tau(\lambda)$  – fator de transmissão espectral;

$V(\lambda)$  – eficiência luminosa relativa espectral para a visão fotópica;

$\Delta\lambda$  – intervalo de comprimento de onda.

O Quadro C.1 do Anexo C apresenta os valores de  $D_{\lambda}$ ,  $V(\lambda)$  e  $\Delta\lambda$ , para intervalos de comprimento de onda de 10nm, na faixa de comprimento de onda de 380 – 780 nm. O quadro foi elaborado de forma que  $\sum D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda = 1$ .

No caso de envidraçados duplos o fator de transmissão espectral é calculado recorrendo à equação (B.2):

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)} \quad (\text{B.2})$$

No caso de envidraçados triplos o fator de transmissão espectral é calculado recorrendo à equação (B.3):

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \tau_3(\lambda)}{[1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2'(\lambda)] \cdot [1 - \rho_2'(\lambda) * \rho_3'(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho_1'(\lambda) \rho_3(\lambda)} \quad (\text{B.3})$$

Em que:

$\tau_1(\lambda)$  – fator de transmissão espectral do vidro exterior;

$\tau_2(\lambda)$  – fator de transmissão espectral do vidro interior;

$\tau_3(\lambda)$  – fator de transmissão espectral do terceiro vidro;

$\tau_n(\lambda)$  – fator de transmissão espectral do enésimo vidro [interno] (por exemplo, para vidros triplos  $n = 3$ );

$\rho_1(\lambda)$  – é o fator de reflexão espectral do vidro exterior, medido na direção da radiação incidente;

$\rho'_1(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do vidro exterior, medido na direção contrária à radiação incidente;

$\rho_2(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do vidro interior, medido na direção da radiação incidente;

$\rho'_2(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do segundo vidro, medido na direção contrária à radiação incidente;

$\rho_3(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do terceiro vidro, medido na direção da radiação incidente;

$\rho_n(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do enésimo vidro (interno), medido na direção da radiação incidente;

$\rho'_n(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do enésimo vidro (interno), medido na direção contrária à da radiação incidente.

## B.2 Refletância visível, $\rho_v$

- Exterior,  $\rho_{v,e}$

No cálculo da refletância visível exterior do vidro,  $\rho_{v,e}$ , é utilizada a seguinte equação (B.4):

$$\rho_{v,e} = \frac{\sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{\lambda=780\text{ nm}} D_{\lambda} * \rho_e(\lambda) * V(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{\lambda=780\text{ nm}} D_{\lambda} * V(\lambda) * \Delta\lambda} \quad (\text{B.4})$$

Em que:

$\rho_e(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do envidraçado exterior.

No caso de envidraçados duplos é utilizada a equação (B.5) para o cálculo do fator de reflexão espectral,  $\rho_e(\lambda)$ .

$$\rho_e(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) * \rho_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda) * \rho_2(\lambda)} \quad (\text{B.5})$$

No caso de envidraçados triplo é utilizada a equação (b.6) para o cálculo do fator de reflexão espectral,  $\rho_e(\lambda)$ .

$$\rho_e(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) * \rho_2(\lambda) * [1 - \rho_2'(\lambda) * \rho_3(\lambda)] + \tau_1^2(\lambda) * \tau_2^2(\lambda) * \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho_1'(\lambda) * \rho_2(\lambda)] * [1 - \rho_2'(\lambda) * \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) * \rho_1'(\lambda) * \rho_3(\lambda)} \quad (\text{B.5})$$

- **Interior,  $\rho_{v,i}$**

No cálculo da refletância visível interior do vidro,  $\rho_{v,i}$ , é utilizada a seguinte equação (B.7):

$$\rho_{v,i} = \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=780 \text{ nm}} D_{\lambda} * \rho_i(\lambda) * V(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=780 \text{ nm}} D_{\lambda} * V(\lambda) * \Delta\lambda} \quad (\text{B.7})$$

Em que:

$\rho_i(\lambda)$  – é o fator de reflexão espectral do envidraçado interior.

No caso de envidraçados duplos é utilizada a equação (B.7) para o cálculo do fator de reflexão espectral,  $\rho_i(\lambda)$ .

$$\rho_i(\lambda) = \rho_2'(\lambda) + \frac{\tau_2^2(\lambda) * \rho_1(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda) * \rho_2(\lambda)} \quad (\text{B.7})$$

No caso de envidraçados triplo é utilizada a equação (B.9) para o cálculo do fator de reflexão espectral,  $\rho_i(\lambda)$ .

$$\rho_i(\lambda) = \rho_3'(\lambda) + \frac{\tau_3^2(\lambda) * \rho_2'(\lambda) * [1 - \rho_2(\lambda) * \rho_1'(\lambda)] + \tau_3^2(\lambda) * \tau_2^2(\lambda) * \rho_1(\lambda)}{[1 - \rho_3(\lambda) * \rho_2'(\lambda)] * [1 - \rho_2(\lambda) * \rho_1'(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) * \rho_1'(\lambda) * \rho_3(\lambda)} \quad (\text{B.9})$$

### B.3 Transmitância solar direta, $\tau_e$

O fator de transmissão direta da energia solar,  $\tau_e$ , é determinado segundo a equação (B.10):

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=30 \text{ nm}}^{\lambda=250 \text{ nm}} S_{\lambda} * \tau(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=250 \text{ nm}} S_{\lambda} * \Delta\lambda} \quad (\text{B.10})$$

Em que:

$S_\lambda$  – distribuição espectral relativa da radiação solar;

$\tau(\lambda)$  – fator de transmissão espectral do envidraçado;

$\Delta\lambda$  – intervalo de comprimentos de onda.

De acordo com a norma ISO 9050:2003, a distribuição espectral relativa,  $S_\lambda$ , usada para calcular a transmitância solar direta  $\tau_e$ , deriva da irradiância solar global dada na ISO 9845-1:1992. Os valores correspondentes  $S_\lambda \Delta\lambda$  são fornecidos no Quadro C.2 do Anexo C apresenta os valores de  $S_\lambda \Delta\lambda$ , na faixa de comprimento de onda de 300 – 2500 nm, elaborado de tal maneira que  $\sum S_\lambda \Delta\lambda = 1$ .

#### B.4 Refletância solar direta, $\rho_e$

O fator de reflexão direta da energia solar,  $\rho_e$ , é determinado segundo a equação (B.11):

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=2500 \text{ nm}} S_\lambda * \rho(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=2500 \text{ nm}} S_\lambda * \Delta\lambda} \quad (\text{B.11})$$

Em que:

$S_\lambda$  – distribuição espectral relativa da radiação solar;

$\rho(\lambda)$  – fator de reflexão espectral do envidraçado;

$\Delta\lambda$  – intervalo de comprimentos de onda.

#### B.5 Absorção solar direta, $\alpha_e$

O fator de absorção direta da energia solar,  $\alpha_e$ , é determinado de acordo com as equações (B.12) e (B.13):

$$\alpha_e = 1 - (\tau_e + \rho_e) \quad (\text{B.12})$$

$$\alpha_e = q_i + q_e \quad (\text{B.13})$$

## B.6 Fator de transmissão secundária de calor para o interior, $q_i$

Para determinação do fator de transmissão secundária de calor para o interior é necessário conhecer o coeficiente de transmissão térmica exterior,  $h_e$ , e o coeficiente de transmissão térmica interior,  $h_i$ , das superfícies dos envidraçados. Sendo que estes se encontram normalizados:

$$h_e = 23 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_i = 3,6 * \frac{4,4 * \varepsilon_i}{0,837} \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Em que:

$\varepsilon_i$  – emissividade corrigida da superfície interior do envidraçado;

Para vidro sem revestimento temos que  $\varepsilon_i = 0,837$ , assim, vem que  $h_i = 8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

- **Envidraçados simples**

No cálculo do fator de transmissão secundária de calor para o interior para envidraçados simples é utilizada a equação (B.14):

$$q_i = \alpha_e * \frac{h_i}{h_e + h_i} \tag{B.14}$$

- **Envidraçados duplos**

No cálculo do fator de transmissão secundária de calor para o interior para envidraçados duplos é utilizada a equação (B.15):

$$q_i = \frac{\left( \frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2} + \frac{\alpha_{e2}}{\Lambda}}{h_e} \right)}{\left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda} \right)} \tag{B.15}$$

Em que:

$\alpha_{e1}$  – fator de absorção direta da energia solar do painel exterior dentro do envidraçado duplo (equação (B.16));

$\alpha_{e2}$  – fator de absorção direta da energia solar do painel interior dentro do envidraçado duplo (equação (B.17));

$\Lambda$  – condutância térmica entre a superfície exterior e a superfície interior do envidraçado duplo.

Sendo:

$$\alpha_{e1} = \frac{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} \left[ \alpha_1 + \frac{\alpha'_1(\lambda) \cdot \tau_1(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda)}{1 - \rho'_1(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda)} \right]}{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda} \quad (\text{B.16})$$

$$\alpha_{e2} = \frac{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} \left[ \frac{\alpha_2(\lambda) \cdot \tau_1(\lambda)}{1 - \rho'_1(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda)} \right] \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda} \quad (\text{B.17})$$

Em que:

$\alpha_1(\lambda)$  – fator de absorção espectral direta do painel exterior, medido na direção da radiação incidente:  $\alpha_1(\lambda) = -\tau_1(\lambda) - \rho_1(\lambda)$

$\alpha'_1(\lambda)$  – fator de absorção espectral direta do painel exterior, medido na direção oposta da radiação incidente:  $\alpha'_1(\lambda) = 1 - \tau_1(\lambda) - \rho'_1(\lambda)$

$\alpha_2(\lambda)$  – fator de absorção espectral direta do segundo painel exterior, medido na direção da radiação incidente:  $\alpha_2(\lambda) = 1 - \tau_2(\lambda) - \rho_2(\lambda)$

A condutância térmica  $\Lambda$  deve ser determinada para uma diferença de temperatura de  $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$  através da amostra e uma temperatura média da amostra de  $10^{\circ}\text{C}$  pelo método de cálculo fornecido na ISO 10292:1994 [54].

- **Envidraçados múltiplos com  $n > 2$  componentes**

No cálculo do fator de transmissão secundária de calor para o interior para envidraçados múltiplos com  $n > 2$  componentes é utilizada a seguinte equação (B.18):

$$q_i = \frac{\left( \frac{\alpha_{en}}{\Lambda_{(n-1)n}} + \frac{\alpha_{e3} + \dots + \alpha_{en}}{\Lambda_{23}} + \frac{\alpha_{e2} + \alpha_{e3} + \dots + \alpha_{en}}{\Lambda_{12}} + \frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2} + \alpha_{e3} + \dots + \alpha_{en}}{h_e} \right)}{\left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda_{12}} + \frac{1}{\Lambda_{23}} + \dots + \frac{1}{\Lambda_{(n-1)n}} \right)} \quad (\text{B.18})$$

Em que:

$\alpha_{e1}$  – absorção solar direta da energia solar direta do painel exterior dentro do envidraçado n;

$\alpha_{e2}$  – absorção solar direta da energia solar direta do segundo painel dentro do envidraçado n;

$\alpha_{en}$  – absorção solar direta da energia solar direta do enésimo painel dentro do envidraçado com n dobras;

$h_e, h_i$  – são os coeficientes de transferência de calor para fora e para dentro;

$\Lambda_{12}$  – condutância térmica entre a superfície externa do painel externo e o centro do segundo painel;

$\Lambda_{23}$  – condutância térmica entre o centro do segundo painel e o centro do terceiro painel;

$\Lambda_{(n-1)n}$  – condutância térmica entre o centro da (n – 1) ésimo painel e a superfície externa do enésimo painel.

No caso de se considerar vidros triplos, em função das características espectrais dos componentes individuais da unidade, são obtidas as seguintes equações para as absorvâncias solares  $\alpha_{e1}$ ,  $\alpha_{e2}$  e  $\alpha_{e3}$ :

$$\alpha_{e1}(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=250\text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \alpha_1(\lambda) + \frac{\tau_1(\lambda) * \alpha'_1(\lambda) * \rho_2(\lambda) * [1 - \rho'_2(\lambda) * \rho_3(\lambda)] + \tau_1(\lambda) * \tau_2^2(\lambda) * \alpha'_1(\lambda) * \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) * \rho_2(\lambda)] * [1 - \rho'_2(\lambda) * \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) * \rho'_1(\lambda) * \rho_3(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} * \Delta\lambda} \quad (\text{B.19})$$

$$\alpha_{e2}(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=250\text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \frac{\tau_1(\lambda) * \alpha_2(\lambda) * [1 - \rho'_2(\lambda) * \rho_3(\lambda)] + \tau_1(\lambda) * \tau_2(\lambda) * \alpha'_2(\lambda) * \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) * \rho_2(\lambda)] * [1 - \rho'_2(\lambda) * \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) * \rho'_1(\lambda) * \rho_3(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} * \Delta\lambda} \quad (\text{B.20})$$

$$\alpha_{e3}(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \frac{\tau_1(\lambda) * \tau_2(\lambda) * \alpha_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) * \rho_2(\lambda)] * [1 - \rho'_2(\lambda) * \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) * \rho'_1(\lambda) * \rho_3(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=2500\text{ nm}} S_{\lambda} * \Delta\lambda} \quad (\text{B.21})$$

$\Lambda_{12}$  – condutância térmica entre a superfície exterior do primeiro painel e o centro do segundo painel;

$\Lambda_{23}$  – condutância térmica entre o centro do segundo painel e a superfície mais interior do terceiro painel;

$\alpha'_2(\lambda)$  – factor de absorção espectral direta do segundo painel, medido na direção oposta à da radiação incidente:  $\alpha'_2(\lambda) = 1 - \tau_2(\lambda) - \rho'_2(\lambda)$

$\alpha_3(\lambda)$  – factor de absorção espectral direta do terceiro painel, medido na direção da radiação incidente:  $\alpha_3(\lambda) = 1 - \tau_3(\lambda) - \rho_3(\lambda)$

## ANEXO C

### C.1 Distribuição espectral relativa normalizada – ISO 9050

Quadro C.1 – Distribuição espectral relativa normalizada  $D_\lambda V(\lambda)\Delta\lambda$ , [24].

| $\lambda$ [nm] | $D_\lambda V(\lambda)\Delta\lambda * 10^2$ | $\lambda$ [nm] | $D_\lambda V(\lambda)\Delta\lambda * 10^2$ |
|----------------|--|----------------|--|
| 380            | 0  | 590            | 6,3306                                     |
| 390            | 0,0005                                     | 600            | 5,3542                                     |
| 400            | 0,003                                      | 610            | 4,2491                                     |
| 410            | 0,0103                                     | 620            | 3,1502                                     |
| 420            | 0,0352                                     | 630            | 2,0812                                     |
| 430            | 0,0948                                     | 640            | 1,381                                      |
| 440            | 0,2274                                     | 650            | 0,807                                      |
| 450            | 0,4192                                     | 660            | 0,4612                                     |
| 460            | 0,6663                                     | 670            | 0,2485                                     |
| 470            | 0,985                                      | 680            | 0,1255                                     |
| 480            | 1,5189                                     | 690            | 0,0536                                     |
| 490            | 2,1336                                     | 700            | 0,0276                                     |
| 500            | 3,3491                                     | 710            | 0,0146                                     |
| 510            | 5,1393                                     | 720            | 0,0057                                     |
| 520            | 7,0523                                     | 730            | 0,0035                                     |
| 530            | 8,799                                      | 740            | 0,0021                                     |
| 540            | 9,4427                                     | 750            | 0,0008                                     |
| 550            | 9,8077                                     | 760            | 0,0001                                     |
| 560            | 9,4306                                     | 770            | 0  |
| 570            | 8,6891                                     | 780            | 0  |
| 580            | 7,8994                                     |                |  |

## C.2 Distribuição espectral relativa da radiação solar global

Quadro C.2 – Distribuição espectral relativa normalizada da radiação solar global, adaptado de [24].

| $\lambda$ [nm] | $S_{\lambda} \Delta\lambda$ |
|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|
| 300            | 0                           | 440            | 0,013246                    | 680            | 0,012838                    | 1400           | 0,000741                    |
| 305            | 0,000057                    | 450            | 0,015343                    | 690            | 0,011788                    | 1450           | 0,003792                    |
| 310            | 0,000236                    | 460            | 0,016166                    | 700            | 0,012453                    | 1500           | 0,009693                    |
| 315            | 0,000554                    | 470            | 0,016178                    | 710            | 0,012798                    | 1550           | 0,013693                    |
| 320            | 0,000916                    | 480            | 0,016402                    | 720            | 0,010589                    | 1600           | 0,012203                    |
| 325            | 0,001309                    | 490            | 0,015794                    | 730            | 0,011233                    | 1650           | 0,010615                    |
| 330            | 0,001914                    | 500            | 0,015801                    | 740            | 0,012175                    | 1700           | 0,007256                    |
| 335            | 0,002018                    | 510            | 0,015973                    | 750            | 0,012181                    | 1750           | 0,007183                    |
| 340            | 0,002189                    | 520            | 0,015357                    | 760            | 0,009515                    | 1800           | 0,002157                    |
| 345            | 0,0026                      | 530            | 0,015867                    | 770            | 0,010479                    | 1850           | 0,000398                    |
| 350            | 0,002445                    | 540            | 0,015827                    | 780            | 0,011381                    | 1900           | 0,000082                    |
| 355            | 0,002555                    | 550            | 0,015844                    | 790            | 0,011262                    | 1950           | 0,001087                    |
| 360            | 0,002683                    | 560            | 0,01559                     | 800            | 0,028718                    | 2000           | 0,003024                    |
| 365            | 0,00302                     | 570            | 0,015256                    | 850            | 0,04824                     | 2050           | 0,003988                    |
| 370            | 0,003359                    | 580            | 0,014745                    | 900            | 0,040297                    | 2100           | 0,004229                    |
| 375            | 0,003509                    | 590            | 0,01433                     | 950            | 0,021384                    | 2150           | 0,004142                    |
| 380            | 0,0036                      | 600            | 0,014663                    | 1000           | 0,036097                    | 2200           | 0,00369                     |
| 385            | 0,003529                    | 610            | 0,01503                     | 1050           | 0,03411                     | 2250           | 0,003592                    |
| 390            | 0,003551                    | 620            | 0,014859                    | 1100           | 0,018861                    | 2300           | 0,003436                    |
| 395            | 0,004294                    | 630            | 0,014622                    | 1150           | 0,013228                    | 2350           | 0,003163                    |
| 400            | 0,007812                    | 640            | 0,014526                    | 1200           | 0,022551                    | 2400           | 0,002233                    |
| 410            | 0,011638                    | 650            | 0,014445                    | 1250           | 0,023376                    | 2450           | 0,001202                    |
| 420            | 0,011877                    | 660            | 0,014313                    | 1300           | 0,017756                    | 2500           | 0,000475                    |
| 430            | 0,011347                    | 670            | 0,14023                     | 1350           | 0,003743                    |                |                             |