

DIMENSIONAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DE VIDROS – CHOQUE TÉRMICO

DANIEL DA CRUZ ROCHA

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

Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família, e em especial à minha irmã

A educação é a premissa do progresso em toda a sociedade e em toda a família

Kofi Annan

AGRADECIMENTOS

Nesta reta final, relembro com gratidão todas as pessoas que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas, meu orientador nesta dissertação, por todo o apoio, rigor e objetividade com que me orientou, sempre disponível na resposta às minhas dúvidas.

A todos os Professores que durante estes anos contribuíram empenhadamente para a minha formação.

A todos os amigos que já o eram antes de iniciar o curso e a todos os colegas que se tornaram amigos, em especial ao Nelson e ao Zé Miguel.

À minha família por todo o apoio.

RESUMO

A utilização do vidro como material de construção é cada vez maior. Esta crescente utilização do vidro nasce da sua crescente importância nas tendências arquitetónicas mais contemporâneas, e da sua resposta face às progressivas exigências de conforto dos utilizadores dada pela constante evolução dos seus desempenhos. Decorrente deste acréscimo do uso do vidro, ocorre, naturalmente, um aumento de situações de quebra por ações mecânicas ou por choque térmico. A elaboração de metodologias de dimensionamento que previnam a ocorrência deste tipo de patologias fazem todo o sentido num contexto de uso crescente do vidro em construção.

Em Portugal não existe uma metodologia precisa de dimensionamento térmico e mecânico de vidros. De forma a contornar esta situação, é feita uma adaptação da normalização francesa a Portugal. Para esse fim são aplicadas certas indicações presentes em documentos portugueses.

Primeiramente realiza-se um enquadramento do estado de arte, referente ao vidro e ao caixilho. São destacadas certas propriedades destes elementos com influência nas metodologias de dimensionamento mecânico e térmico, posteriormente apresentadas.

Apresentada a metodologia de dimensionamento mecânico, ela é comparada com uma metodologia de dimensionamento mecânico antecedente, no sentido de se perceber a evolução em termos de exigência do dimensionamento. Com o objetivo de facilitar a aplicação prática da metodologia, são originalmente elaborados ábacos de pré-dimensionamento mecânico, complementados por um livro de cálculo de verificação da resistência. São expostos exemplos de utilização de ambas as ferramentas, bem como um guia de utilização do livro de cálculo.

No âmbito do dimensionamento térmico, a metodologia é aplicada a dois casos de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Vidro, Caixilho, Choque Térmico, Ábacos de Pré-Dimensionamento, Folha de Cálculo.

ABSTRACT

The use of glass as a construction material is increasingly higher due to the new architectural trends. With more glass use comes more glass breakage by wind action or thermal stress. The elaboration of methodologies for glass design prepared to reduce the occurrence of this kind of pathologies makes perfect sense in a context of high glass application.

In Portugal there isn't a clear methodology of thermal stress and wind action design for glasses. In order to overcome this situation, the present document adapts a French standard to the Portuguese context, based on existing national documents.

Firstly, a study is made about the types of glass and window frames. There are some highlights made about the properties with influence on the methodologies that will be presented.

When the methodology for wind action design is presented, it is compared with the previous one, according to the standards of that time. Original pre-designing graphics complemented with a spreadsheet for wind action resistance verification are presented. Some application examples of both tools are showed and a utilization guide for the spread sheet is provided.

In the thermal stress design context, the methodology presented for the purpose is applied to two study cases.

KEYWORDS: Glass, Window Frames, Thermal Stress Design, Wind Action Design, Spreadsheet

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA	2
2. O VIDRO	3
2.1. O VIDRO NA CONSTRUÇÃO	3
2.2. DESEMPENHO TÉRMICO DE UM ENVIDRAÇADO	3
2.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DO VIDRO	5
2.4. TIPOS DE VIDRO	5
2.4.1. INTRODUÇÃO	5
2.4.2. PROCESSO DE FABRICO. VIDRO RECOZIDO MONOLÍTICO	6
2.4.3. VIDRO COLORIDO NA MASSA	6
2.4.4. VIDRO ESTIRADO	7
2.4.5. VIDRO IMPRESSO	7
2.4.6. VIDRO ARAMADO	7
2.4.7. VIDRO TEMPERADO	7
2.4.8. VIDRO TERMO-ENDURECIDO	8
2.4.9. VIDRO LAMINADO	8
2.4.10. VIDRO ISOLANTE	9
2.4.11. VIDRO REVESTIDO SUPERFICIALMENTE	10
2.4.11.1. Introdução	10

2.4.11.2. Vidro de Auto-Limpeza.....	10
2.4.11.3. Vidro de Controlo Solar de Alta Refletividade.....	10
2.4.11.1. Vidro Baixo-Emissivo ou Low-e	10
2.4.11.1. Introdução	10
2.4.12. OUTROS VIDROS	12
2.5. ANÁLISE DE PARÂMETROS DE DIFERENTES TIPOS DE VIDRO	11
2.5.1. VIDROS SIMPLES.....	11
2.5.1.1. Introdução.....	11
2.5.1.2. Vidro Monolítico Recozido Incolor.....	12
2.5.1.3. Vidro Monolítico Colorido na Massa	13
2.5.1.4. Vidro Recozido de Controlo Solar de Alta Refletividade.....	13
2.5.1.5. Vidro Laminados	14
2.5.1.6. Outros vidros	15
2.5.2. VIDROS DUPLOS.....	15
2.5.2.1. Introdução.....	15
2.5.2.2. Vidro Duplo com dois vidros recozidos sem revestimento de capa	17
2.5.2.3. Vidro Duplo constituído por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro de Alta Refletividade	18
2.5.2.4. Vidro Duplo constituído por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro Baixo-Emissivo	19
2.5.2.5. Vidro Duplo constituído por um Vidro Laminado e um Vidro Recozido Incolor	20
2.5.2.6. Vidro Duplo constituído por um Vidro Laminado e um Vidro Monolítico, com uma Capa Baixa-Emissiva Associada	21
2.5.2.7. Vidro Duplo constituído por dois Vidros Laminados	21
2.5.2.8. Vidro Duplo constituído por um Vidro Baixo-Emissivo e um Vidro de Alta Refletividade	22
2.6. TIPO DE BORDO	23
2.7. NOTAS FINAIS	23
3. O CAIXILHO	25
3.1. O CAIXILHO E A ENVOLVENTE. ASPETOS FUNCIONAIS	25
3.2. SOLUÇÕES DE CAIXILHO NA FACHADA.....	25
3.2.1. INTRODUÇÃO. FACHADAS ENVIDRAÇADAS	25
3.2.1.1. Vidro Exterior Agrafado (VEA).....	26
3.2.1.2. Vidro Exterior Colado (VEC)	26
3.2.2. MODOS DE ABERTURA.....	27

3.3. TIPO DE MATERIAL	27
3.4. INÉRCIA TÉRMICA DO CAIXILHO	27
3.5. APOIOS DE VIDRO	29
3.6. NOTAS FINAIS	29
4. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO E AO CHOQUE TÉRMICO DE VIDROS	31
4.1. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO	31
4.1.1. INTRODUÇÃO.....	31
4.1.2. QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO	31
4.1.2.1. Velocidade de Rajada	31
4.1.2.2. Pressão Dinâmica do Vento.....	32
4.1.2.3. Coeficientes de Forma. Coeficientes de Pressão	32
4.1.2.4. Definição da Pressão de Cálculo	34
4.1.3. PRINCIPIO DE CÁLCULO	34
4.1.3.1. Introdução	34
4.1.3.2. Cálculo da espessura de cálculo e fator de redução, e_I e c	35
4.1.3.3. Cálculo da espessura equivalente, e_R	35
4.1.4. VERIFICAÇÕES	38
4.1.5. COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS BASEADAS NO DTU 39 P4 DE 2006 E DE 2012	39
4.1.5.1. Introdução	39
4.1.5.2. Expressões de Verificação Mecânica segundo a Metodologia Anterior	40
4.1.5.3. Expressões de Verificação Mecânica segundo a Metodologia Atual	42
4.1.5.4. Ábacos de Análise Comparativa	43
4.1.5.5. Conclusões.....	46
4.2. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DAS AÇÕES TÉRMICO	46
4.2.1. CHOQUE TÉRMICO.....	46
4.2.2. MÉTODO DE CÁLCULO	47
4.2.2.1. Introdução	47
4.2.2.2. Definição de Zonas do Vidro	48
4.2.3. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.....	48
4.2.3.1. Introdução	48
4.2.3.2. Temperatura do ar interior, θ_{ai}	48

4.2.3.3. Temperatura do ar exterior	48
4.2.3.4. Radiação Solar	49
4.2.4. CÁLCULO DAS TEMPERATURAS DO VIDRO.....	50
4.2.4.1. Temperatura na zona 1	50
4.2.4.2. Temperatura na zona 2	51
4.2.4.3. Temperatura na zona 3.....	53
4.2.5. EXIGÊNCIAS E CRITÉRIOS	55
4.2.5.1. Introdução	55
4.2.5.2. Diferença de Temperatura Máxima Admissível, $\delta\theta_{adm}$	55
4.2.5.3. Parâmetros utilizados no cálculo da diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$	56
4.2.5.4. Diferença de Temperatura Efetiva, $\delta\theta$	57
5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO	59
5.1. INTRODUÇÃO	59
5.2. ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO	60
5.2.1. INTRODUÇÃO.....	60
5.2.2. ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VIDROS DUPLOS COM DOIS VIDROS MONOLÍTICOS (MM)	62
5.2.3. ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS DUPLOS COM VIDRO MONOLÍTICO E LAMINADO (ML)	65
5.2.4. ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS DUPLOS COM DOIS VIDROS LAMINADOS (LL)	68
5.2.5. ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS SIMPLES MONOLÍTICOS (M)	71
5.2.5. ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS SIMPLES LAMINADOS (L).....	74
5.2.7. EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DE UM ÁBACO DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO	77
5.3. VERIFICAÇÃO MECÂNICA ATRAVÉS DE LIVRO DE CÁLCULO	79
5.3.1. INTRODUÇÃO.....	79
5.3.2. INSTRUÇÕES E INFORMAÇÕES ACERCA DOS DADOS DE ENTRADA E DE SAÍDA.....	80
5.3.2.1 Folha de Cálculo “1 – Ação do Vento”	80
5.3.2.2. Folha de Cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”	82
5.3.2.3. Folha de Cálculo “3 - Verificações”	85
5.3.3. EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO.....	87

5.3.3.1. Envidraçado “P”	87
5.3.3.2. Envidraçado “N”	92

6. DIMENSIONAMENTO AO CHOQUE TÉRMICO, APLICAÇÃO PRÁTICA

6.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA	97
---	----

6.2. ENVIDRAÇADO A	99
---------------------------------	----

6.2.1. INTRODUÇÃO	99
-------------------------	----

6.2.2. TEMPERATURA MÁXIMA ADMISSÍVEL DO ENVIDRAÇADO	100
---	-----

6.2.3. TEMPERATURAS DAS ZONAS DE VIDRO	101
--	-----

6.2.3.1. Introdução	101
---------------------------	-----

6.2.3.2. Cálculo do parâmetro ht	102
--	-----

6.2.3.3. Cálculo da temperatura da Zona 1 (zona da gola)	103
--	-----

6.2.3.4. Cálculo da temperatura da Zona 2 (zona ao sol)	104
---	-----

6.2.3.5. Cálculo da temperatura da Zona 3 (zona à sombra)	106
---	-----

6.2.4. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO	108
---	-----

6.3. ENVIDRAÇADO B	109
---------------------------------	-----

6.3.1. INTRODUÇÃO	109
-------------------------	-----

6.3.2. TEMPERATURA MÁXIMA ADMISSÍVEL DO ENVIDRAÇADO	111
---	-----

6.3.3. TEMPERATURAS DAS ZONAS DE VIDRO	111
--	-----

6.3.3.1. Introdução	111
---------------------------	-----

6.3.3.2. Cálculo do parâmetro ht	111
--	-----

6.3.3.3. Cálculo da temperatura da Zona 1 (zona da gola)	113
--	-----

6.3.3.4. Cálculo da temperatura da Zona 2 (zona ao sol)	115
---	-----

6.3.3.5. Cálculo da temperatura da Zona 3 (zona à sombra)	116
---	-----

6.3.4. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO	118
---	-----

6.4. REFLEXÕES FINAIS	119
------------------------------------	-----

7. CONCLUSÃO

7.1. DIFICULDADES SENTIDAS AO LONGO DO TRABALHO	125
--	-----

7.2. CONCLUSÕES GERAIS	125
-------------------------------------	-----

7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	126
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Estrutura da Dissertação.....	2
Fig.2 – Vidro Monolítico Recozido – Adaptado [9].....	6
Fig.3 – Vidro Temperado e Tensões Instaladas – Adaptado [9].....	8
Fig.4 – Vidro Laminado - Adaptado [8]	9
Fig.5 – Vidro Duplo – Adaptado [9]	10
Fig.6 – Numeração das Faces em Vidro Simples	12
Fig.7 – Espessura de um Vidro Laminado	14
Fig.8 – Esquema de Representação da Espessura de um Vidro Duplo.....	16
Fig.9 – Numeração das Faces de um Vidro Duplo	17
Fig.10 – Vidro Exterior Agrafado – Corte em Perspetiva	26
Fig.11 – Vidro Exterior Colado – Corte em Perspetiva	26
Fig.12 – Regressão Linear Baseada no Quadro 28.....	36
Fig.13 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro MM.1	44
Fig.14 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro ML.1	44
Fig.15 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro LL.1	44
Fig.16 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro MM.2	45
Fig.17 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro ML.2	45
Fig.18 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro LL.2	45
Fig.19 – Orientações de Envidraçado mais Suscetíveis à Quebra por Choque Térmico.....	47
Fig.20 – Zonas do Vidro	48
Fig.21 – Zonas Climáticas de Inverno.....	49
Fig.22 – Processo de Dimensionamento Mecânico	60
Fig.23 – Vidro Duplo constituído por dois Vidros Monolíticos (MM)	62
Fig.24 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo MM.1	64
Fig.25 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo MM.2	65
Fig.26 – Vidro Duplo constituído por um Vidro Monolítico e um outro Vidro Laminado (ML).....	65
Fig.27 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo ML.1	67
Fig.28 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo ML.2	68
Fig.29 – Vidro Duplo constituído por dois Vidros Laminados (LL).....	68

Fig.30 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo LL.1	70
Fig.31 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo LL.2	71
Fig.32 – Vidro Simples Monolítico (M)	71
Fig.33 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo M.1	73
Fig.34 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo M.2	74
Fig.35 – Vidro Simples Laminado (L)	74
Fig.36 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo L.1	76
Fig.37 – Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo L.2	77
Fig.38 – Esquema do exemplo apresentado – Envidraçado “N”	78
Fig.39 – Ábaco de Pré-Dimensionamento do Envidraçado “N”	78
Fig.40 – Diferentes Folhas de Cálculo	79
Fig.41 – Preenchimento das células da Folha de Cálculo “1- Ação do Vento”	81
Fig.42 – Dados de entrada e saída da Folha de Cálculo “1-Ação do Vento”	82
Fig.43 – Preenchimento das células da Folha de Cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”	83
Fig.44 – Zona Destinada à Definição de Espessuras Mínima dadas pelas Limitações Dimensionais .84	
Fig.45 – Dados de entrada e saída da Folha de Cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”	85
Fig.46 – Preenchimento das células da Folha de Cálculo “3 - Verificações”	86
Fig.47 – Dados de entrada e saída da Folha de Cálculo “3 - Verificações”	87
Fig.48 – Esquema em planta e corte do envidraçado “P”	87
Fig.49 – Introdução de dados de entrada na folha de cálculo “Ação do vento” e obtenção dos dados de saída	89
Fig.50 – Preenchimento da folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos” e obtenção de alguns dados de saída. Parte 1.	89
Fig.51 – Preenchimento da tabela referente à Tipologia do Envidraçado e Natureza dos seus Componentes da folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”. Parte 2.....	90
Fig.52 – Espessuras Mínimas que respeitam as Limitações Dimensionais.	90
Fig.53 – Preenchimento da folha “3 – Verificações” para o exemplo de utilização	91
Fig.54 – Esquema do Envidraçado “N” em corte e em planta	92
Fig.55 – Pressão de cálculo do Envidraçado “N” – Folha de cálculo “1 – Ação do Vento”	93
Fig.56 – Cálculo de e_1 para envidraçado “N” – “Folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”	93
Fig.57 – Apuramento de Fatores de Equivalência para o envidraçado N – “Folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”	94
Fig.58 – Verificação Mecânica do Envidraçado “N” – Folha de Cálculo “3 -Verificações”	95
Fig.59 – Passo 1 do Processo de Cálculo utilizado no Capítulo 6	97
Fig.60 – Passo 2 do Processo de Cálculo utilizado no Capítulo 6	98

Fig.61 – Passo 3 do Processo de Cálculo utilizado no Capítulo 6	99
Fig.62 – Envidraçado “A” após quebra causada por choque térmico	99
Fig.63 – Esquema em Corte do Envidraçado “A”	100
Fig.64 – Zona 1 do Vidro (Zona da Gola)	104
Fig.65 – Zona 2 (Zona ao Sol)	105
Fig.66 – Zona 3 (Zona à Sombra)	106
Fig.67 – Esquema em corte do Envidraçado “B”	110
Fig.68 – Envidraçado “B” após quebra causada por choque térmico	110
Fig.69 – Vista em Corte do Envidraçado “B” e Influência da Proteção Solar	120

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades Físicas do Vidro [3] [4]	5
Quadro 2 – Critério de classificação dos parâmetros por cor (vidros simples)	11
Quadro 3 – Propriedades de Vidros Monolíticos Recozidos Incolores, Vidro Temperado Incolor e Vidro Termo-Endurecido Incolor [4].....	12
Quadro 4 – Propriedades de Vidros Recozidos Coloridos na Massa [4].....	13
Quadro 5 – Propriedades de Vidros Recozidos de Alta Refletividade [4]	13
Quadro 6 – Propriedades de Vidros Laminados Recozidos [4]	15
Quadro 7 – Propriedades de Outros Vidros Simples [4].....	15
Quadro 8 – Critério de Classificação dos Parâmetros Térmicos (Vidros Duplos)	16
Quadro 9 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidros Recozidos Incolores [4].....	17
Quadro 10 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidros Recozidos Incolor e Colorido [4].....	18
Quadro 11 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro de Alta Refletividade (Posição 1) [4]	18
Quadro 12 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro de Alta Refletividade (Posição 2) [4]	19
Quadro 13 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidro Baixo-Emissivos (Posição 3) e Vidro Recozido Incolor [4].....	20
Quadro 14 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidro Baixo-Emissivos (Posição 2) e Vidro Recozido Incolor [4].....	20
Quadro 15 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidro Laminado e Vidro Recozido Incolor [4].....	20
Quadro 16 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Laminado e Vidro Monolítico, integrando uma capa Baixa-Emissiva [4].....	21
Quadro 17 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por dois Vidros Laminados [4]	21
Quadro 18 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Baixo-Emissivo e um Vidro de Alta Refletividade [4]	22
Quadro 19 – “Vidro Y”	23
Quadro 20 – Tipos de Bordo – Adaptado [9]	23
Quadro 21 – Inércia Térmica dos Caixilhos – Adaptação [4].....	28
Quadro 22 - Tipos de Apoio de Vidro.....	29
Quadro 23 – Expressões para o Cálculo da Velocidade [2]	32
Quadro 24 – Coeficientes de Pressão Interior (δp_i) [2].....	33
Quadro 25 – Coeficientes de Pressão Exterior Globais (δp_e) [2].	33

Quadro 26 – Coeficientes de pressão exterior locais (δp_e) [2]	34
Quadro 27 – Cálculo de e_1 [20]	35
Quadro 28 – Relação entre Espessura Nominal, e_n e Mínima, e_f , de um Vidro Monolítico Recozido [4]	36
Quadro 29 – Espessura Equivalente, e_R , em Vidro Simples [20]	36
Quadro 30 – Espessura Equivalente, e_R , em Vidro Isolantes Duplos [20]	37
Quadro 31 – Fator de Equivalência para vidros isolantes [20]	37
Quadro 32 – Fator de Equivalência para vidros laminados [20]	37
Quadro 33 – Fator de Equivalência para vidros monolíticos [20]	38
Quadro 34 – Limitações de espessura nominal em função do menor lado do vidro	39
Quadro 35 – Espessura de Cálculo, e_1 , segundo Metodologia Anterior (2006) [22]	41
Quadro 36 – Espessura Total, e_t , segundo Metodologia Anterior (2006) [22]	41
Quadro 37 – Expressões de Verificação da Resistência Mecânica segundo a Metodologia Anterior (2006) [22]	42
Quadro 38 – Expressões de Verificação da Resistência Mecânica segundo a Metodologia Atual (2012) [20]	42
Quadro 39 – Temperatura exterior máxima e mínima no Inverno e no Verão e Amplitude Térmica Diária [3]	49
Quadro 40 – Radiação solar máxima incidente, θ_{max} , e difusa, θ_{dif} em W/m^2 [3] (adaptação)	50
Quadro 41 – Condutâncias Superficiais (expressas em $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)	50
Quadro 42 – Expressões para o cálculo de R_1	51
Quadro 43 – Parâmetros intervenientes no cálculo da Temperatura na zona 2	52
Quadro 44 – Parâmetros intervenientes no cálculo da Temperatura na zona 3	54
Quadro 45 – Tensão de Trabalho de vidro, σ_{vm} [23]	56
Quadro 46 – Coeficiente k_t [23]	56
Quadro 47 – Coeficiente k_v [23]	57
Quadro 48 – Raciocínio para Cálculos da Diferença de Temperatura em Vidro Duplo	58
Quadro 49 – Condição de Verificação da Resistência Mecânica [20]	62
Quadro 50 – Definição da Espessura Equivalente (MM)	62
Quadro 51 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (MM.1)	63
Quadro 52 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $I_{máx}$. (MM.2)	64
Quadro 53 – Definição da Espessura Equivalente (ML)	66

Quadro 54 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (ML.1)	66
Quadro 55 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $I_{máx}$ (ML.2)	67
Quadro 56 – Definição da Espessura Equivalente (LL)	69
Quadro 57 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (LL.1)	69
Quadro 58 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $I_{máx}$ (LL.2)	70
Quadro 59 – Definição da Espessura Equivalente (M)	72
Quadro 60 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (M.1)	72
Quadro 61 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $I_{máx}$ (M.2)	72
Quadro 62 – Definição da Espessura Equivalente (L)	75
Quadro 63 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (L.1)	75
Quadro 64 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $I_{máx}$ (L.2)	76
Quadro 65 – Relações geométricas e correspondentes valores de δ_{pe} usados na folha de cálculo “1 – Ação do Vento”	82
Quadro 66 – Informações referentes ao envidraçado “P” e edifício a aplicar no exemplo de utilização	88
Quadro 67 – Informações Relativas ao Envidraçado “N”	92
Quadro 68 – Resumo dos resultados obtidos para os envidraçados “P” e “N”	95
Quadro 69 – Cálculo de ht do envidraçado “A”	102
Quadro 70 – Parâmetros a usar no calculo das temperaturas nas diferentes zonas do Envidraçado “A”	103
Quadro 71 – Temperaturas da Zona 2 do Envidraçado “A”	106
Quadro 72 – Temperaturas da Zona 3 do Envidraçado “A”	108
Quadro 73 – Temperaturas do Envidraçado A (Orientação E/W)	108
Quadro 74 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “A”, condições de Inverno	108
Quadro 75 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “A”, condições de Verão	109
Quadro 76 – Cálculo de ht para o envidraçado “B”	112
Quadro 77 – Parâmetros a usar no calculo das temperaturas nas diferentes zonas do Envidraçado “B”	113

Quadro 78 – Temperaturas da Zona 2 do Envidraçado “B”	116
Quadro 79 – Temperaturas da Zona 3 do Envidraçado “B”	118
Quadro 80 – Temperaturas do Envidraçado “B” (Orientação SE)	118
Quadro 81 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “B”, condições de Inverno	119
Quadro 82 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “B”, condições de Verão	119
Quadro 83 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,10$	121
Quadro 84 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,20$	121
Quadro 85 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,14$	122
Quadro 86 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,15$	122

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

a – Maior dimensão em planta do edifício

b – Menor dimensão em planta do edifício

c – Fator de redução

E – Módulo de elasticidade do vidro (72 GPa) [GPa]

e_f - Espessura de cálculo [mm]

e_R - Espessura equivalente [mm]

e_t – Espessura total que representa o somatório das espessuras de fabrico e/ou equivalentes dos componentes de um envidraçado para a metodologia de dimensionamento mecânico precedente [mm]

e_f – Espessura Mínima de Fabricação [mm]

g – Fator solar ou fator de transmissão total da energia solar

h – Altura do edifício acima do solo [m]

h' – Altura da parte superior do envidraçado acima do solo [m]

h_e – Condutância superficial exterior [W/(m²°C)]

h_i – Condutância superficial interior [W/(m²°C)]

h_t – coeficiente de transmissão térmica de vidro duplo sem estore calculado de acordo com o DTU 39 [W/(m²°C)]

k_a – coeficiente dependente da inclinação do vidro e das suas condições de apoio

k_t – coeficiente dependente da natureza do caixilho e de o vão ser reentrante ou à face do edifício

k_v – coeficiente de sensibilidade do vidro ao choque térmico

l – Lado menor do vidro [m]

L – Lado maior do vidro [m]

P – Pressão estática do vento; Pressão de Cálculo, Diferença de pressão entre o exterior e o interior [Pa]

R_0 – resistência térmica nominal do vão envidraçado [(m².°C) /W]

R_1 – resistência térmica efetiva do vidro [(m².°C) /W]

S – Área do vidro [m²]

U_g – Coeficiente de transmissão térmica superficial do vão [W/(m².°C)]

v – Velocidade do vento [m/s]

w – Pressão dinâmica do vento [Pa]

U - Coeficiente de transmissão térmica [W/m²°C]

α – Coeficiente de dilatação térmica linear do vidro [°C-1]

A – Fator de absorção energética de vidro simples

- A_{1e} – Fator de absorção energética da energia solar do painel exterior (1)
- A_{2e} – Fator de absorção energética da energia solar do painel interior (2)
- β – Ângulo que o envidraçado faz com a horizontal [°]
- δp – Coeficientes de pressão
- δp_e – Coeficientes de pressão exterior
- δp_i – Coeficientes de pressão interior
- $\delta \theta$ – Diferença de temperatura entre duas zonas de um mesmo vidro [°C]
- $\delta \theta_{adm}$ – Diferença de temperatura máxima admissível [°C]
- ε – Fator de equivalência
- ε_1 – Fator de equivalência de vidros isolantes
- ε_2 – Fator de equivalência de vidros simples laminados
- ε_3 – Fator de equivalência de vidros simples monolíticos
- φ – Fluxo solar incidente [W/m²]
- θ_{dif} – Radiação difusa [W/m²]
- θ_{max} – Radiação solar máxima em regime permanente [W/m²]
- ζ_{adm} – Tensão admissível [MPa]
- ζ_{th} – Tensão térmica [MPa]
- ζ_{vm} – Tensão de trabalho do vidro [MPa]
- θ – Ângulo que o talude do terreno faz com a horizontal [°]
- θ_{ae} – Temperatura ambiente exterior [°C]
- $\theta_{ae,max}$ – Temperatura ambiente exterior máxima [°C]
- $\theta_{ae,min}$ – Temperatura ambiente exterior mínima [°C]
- $\theta_{ae,min_corrigida}$ – Temperatura ambiente exterior mínima corrigida de 5°C para ter em conta o efeito da radiação [°C]
- θ_{ai} – Temperatura ambiente interior [°C]
- θ_1 – Temperatura na zona 1 (gola) [°C]
- θ_{2_ext} – Temperatura do vidro exterior na zona 2 [°C]
- θ_{2_int} – Temperatura do vidro interior na zona 2 [°C]
- θ_{3_ext} – Temperatura do vidro exterior na zona 3 [°C]
- θ_{3_int} – Temperatura do vidro interior na zona 3 [°C]
- e_i, e_j, e_k e e_l - Espessuras de vidro monolíticos, de vidros laminados ou de lâminas de vidros laminados [mm]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

“Símbolo de modernidade arquitetónica desde o século XIX, o vidro é igualmente um material tecnologicamente avançado, funcional e refinado ...contribui de forma acentuada para a melhoria do conforto do lar. A diversidade dos vidros e das suas funções, proporcionam hoje ao projetista uma grande liberdade para pôr em prática uma verdadeira arquitetura de luz que satisfaz plenamente as exigências do conforto moderno” [4].

O vidro tem grande relevância na construção contemporânea, principalmente em fachadas, onde cada vez mais se desenham edifícios com mais e maiores vãos envidraçados. No entanto, o emprego do vidro, nem sempre é feito da forma mais cuidada e decorrente disso, surgem muitas situações de quebra de vidro, em particular devido à ação do vento e ao choque térmico, resultado de grandes diferenças de temperatura entre diferentes pontos do vidro. Principalmente no que se refere à quebra por choque térmico, não tem sido dada a importância devida a esta anomalia, algo frequente e indevidamente acautelada.

Em Portugal não tem sido dada grande importância a este tipo de problema. Tanto que não existem indicações nacionais claras dedicadas ao dimensionamento mecânico de vidros. É do maior interesse, o desenvolvimento de metodologias orientadas à realidade nacional, que possam ser aplicadas, de maneira a que exista maior critério e responsabilidade na utilização do vidro na construção.

1.2 OBJETIVOS

Não existindo metodologia nacional clara dedicada a este tipo de problemática, os modelos criados serão baseados em normas francesas, que se adaptam à realidade portuguesa através do auxílio de indicações de certos documentos nacionais. No âmbito da metodologia de dimensionamento mecânico, o Regulamento de Segurança e Ações [2] é utilizado para a quantificação da ação do vento, por sua vez, no âmbito do dimensionamento térmico, o ITE 52 [3] define os dados climáticos a serem usados. As recomendações técnicas, e propriedades dos vidros baseiam-se no manual da Saint *Gobain Glass* [4].

As metodologias criadas serão limitadas a domínios de aplicação definidos em pormenor posteriormente. Mais notoriamente no âmbito de dimensionamento ao choque térmico, será adotado um método em regime permanente, eventualmente menos preciso e mais simples, de maneira a concretizar o trabalho no tempo disponível. Foi definido também que apenas vidros verticais apoiados perifericamente seriam objeto de estudo, para ambas as metodologias.

O objetivo do trabalho passa pela definição de modelos quantitativos de dimensionamento térmico e mecânico de vidros em fachadas. Este documento entende ser uma atualização e progressão do trabalho realizado por *Maria Francisca Lima Carneiro Cavaleiro* em trabalho similar [1].

No contexto da metodologia de dimensionamento mecânica pretende-se a sua atualização face ao surgimento de nova versão normativa, e a consequente análise comparativa com a antecedente. Neste contexto, deseja-se a criação de ferramentas que facilitem a aplicação prática da metodologia na vertente de pré-dimensionamento, nomeadamente através de ábacos. De maneira a efetuar o processo de verificação da resistência mecânica pede-se igualmente a elaboração de um livro de cálculo original em *Microsoft Office Excel 2016*.

Na vertente do dimensionamento térmico são sugeridas duas aplicações práticas do modelo. Sugere-se uma aplicação do modelo definido e a retirada de possíveis ilações sobre resultados obtidos.

É importante referir que no presente trabalho não foram tidos em consideração aspetos tecnológicos de colocação do vidro.

1.3 ESTRUTURA

A organização deste trabalho é feita em 7 capítulos nos quais se inclui este primeiro de carácter introdutório e um último de conclusões (ver figura 1).

O presente capítulo pretende clarificar o âmbito do trabalho, os objetivos e a estruturação do estudo.

No capítulo das conclusões são apresentadas reflexões sobre o que foi desenvolvido e resultados obtidos, são expostas as dificuldades encontradas e apresentadas propostas sobre futuros desenvolvimentos.

O capítulo 2 enquadra o uso do vidro na construção com as crescentes exigências de conforto para o utilizador. São abordadas as principais propriedades do vidro do ponto de vista do isolamento térmico e controlo solar, bem como definidas algumas propriedades físicas. São expostas várias soluções de envidraçados onde são analisadas e comparadas as suas características.

O capítulo 3 descreve as várias soluções de caixilho na fachada e suas características relevantes no decurso do trabalho.

O capítulo 4 descreve as metodologias que estão na base dos modelos que se pretendem desenvolver. A metodologia de dimensionamento mecânico é atualizada e são feitas comparações de carácter exigencial com a precedente.

No capítulo 5 são desenvolvidos no âmbito da metodologia de dimensionamento mecânico, ábacos de pré-dimensionamento de vidros complementados por um livro de cálculo para a verificação da resistência mecânica. Explica-se a utilização de cada ferramenta com exemplos práticos.

No capítulo 6 é aplicada a metodologia de dimensionamento térmico a dois casos de estudo.



Fig.1 – Estrutura da Dissertação

2

O VIDRO

2.1. O VIDRO NA CONSTRUÇÃO

Atualmente verifica-se cada vez mais o uso frequente de grandes vãos envidraçados em novos edifícios. Esta tendência é um dos pilares da arquitetura moderna. O vidro possibilita responder à necessidade de dissolver as fronteiras do edifício, de conectar os residentes ao ambiente exterior, de comunicar os espaços [1].

O vidro permite o aproveitamento da energia solar, a luz natural traz alegria ao edifício ao mesmo tempo que a privacidade do interior é preservada [4].

A utilização do vidro na fachada implica que não se ponham em causa as funções básicas de um edifício, principalmente em termos de conforto. Deste modo, hoje mais que nunca existem várias soluções de produtos vidreiros que respondem a vários tipos de problemáticas no uso de vidros. Alguns desses problemas prendem-se com o controlo solar e isolamento térmico conveniente, a acústica, a segurança e claro a beleza arquitetónica.

No âmbito deste trabalho, as propriedades do vidro interessantes a nível acústico, de segurança, e de estética não serão abordados. Será dada maior relevância a fenómenos e propriedades dos vidros em termos de isolamento térmico e controlo Solar, muito influentes no dimensionamento ao térmico.

2.2. DESEMPENHO TÉRMICO DE UM ENVIDRAÇADO

A existência de um envidraçado apresentará usualmente uma fragilidade no que toca ao isolamento térmico da envolvente.

Serão aqui abordadas brevemente as formas de troca de calor no envidraçado e quais os parâmetros a ter em conta principalmente em termos de controlo solar e isolamento térmico.

Considerando o envidraçado como uma divisão entre um ambiente mais frio e outro mais quente, o calor será trocado entre os dois ambientes através dos mecanismos clássicos de condução, convecção e radiação. O **coeficiente de transmissão térmica**, U , funciona como indicador da facilidade com que existem trocas de calor pelos três diferentes mecanismos, no vidro e nos respetivos elementos da caixilharia [6].

Quanto mais alto o valor de U , mais transmissão de calor irá ocorrer no envidraçado. Pretende-se, na generalidade dos casos, reduzir trocas térmicas num edifício, daí ser desejável um valor de U o mais baixo possível.

Uma importante característica associada ao desempenho das janelas é a capacidade de controlar ganhos solares. O coeficiente U , embora inclua no seu valor as trocas energéticas pela forma de radiação, não apresenta sensibilidade relativamente à sua influência relativa no fenómeno.

De uma forma simplificada, quando a radiação solar incide sobre um vidro, uma parte da energia (em forma de radiação) é refletida, outra é absorvida pelo vidro e uma terceira é transmitida diretamente para o interior. A parte absorvida é transmitida tanto para o exterior como para o interior. [2].

Existem fatores que nos dão a conhecer em termos energéticos, para cada produto vidreiro, qual a percentagem de fluxo energético incidente que é transmitido, refletido e absorvido. Estes fatores são calculados segundo a norma NP EN 410 [6].

O melhor indicador, e desde já, o mais usado, para distinguir a capacidade de entrada de energia em dado produto vidreiro é o **fator solar**, g . Este fator inclui a parcela do fluxo energético transmitido diretamente e a parcela que é absorvida para o interior por radiação e convecção. O fator solar é igualmente obtido conforme a norma NP EN 410 [6].

A redução do fator solar é proporcional à redução do ganho solar que resulta da transmissão para o interior da radiação solar incidente na janela. Trata-se naturalmente de um objetivo desejável nos períodos quentes devido à possibilidade de sobreaquecimento e inconveniente nos períodos frios [7].

A **absorção energética** de cada vidro é um fator importantíssimo a ter em conta neste trabalho para a questão do dimensionamento térmico. A **absorção energética** é uma parcela do fluxo de energia radiativa que é absorvida pelo vidro, e será transmitida (para o interior) ou refletida (para o exterior). Para apenas um painel de vidro a absorção energética respetiva é representada por A . Para um vidro duplo $Ae1$ representa a absorção energético do painel exterior e $Ae2$ a do painel interior [4].

As características do envidraçado até aqui apresentadas (U e g), são as mais relevantes no campo da térmica de um envidraçado. No entanto, destaca-se a importância da relação entre a energia luminosa incidente e a que efetivamente é transmitida ao interior, no campo do controlo solar de um envidraçado. Fala-se da **transmissão luminosa** (Tl), obtida pela norma igualmente pela NP EN 410 [6].

A parcela luminosa incidente é refletida tal como a não luminosa para o exterior e para o interior. Define-se a **reflexão luminosa interior**, Rl_i e a **reflexão luminosa exterior**, Rl_e . É necessário cautela, em determinados tipos de solução de envidraçado com alta Rl_e , como por exemplo os vidros de alta refletividade abordados posteriormente, por efeitos nefastos à possível vegetação exterior próxima, causado pela radiação incidente refletida pelo envidraçado [4].

2.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DO VIDRO

As principais propriedades físicas do vidro, e seus valores correntes, encontram-se sintetizadas no quadro 1 [3] [4].

Quadro 1 – Propriedades Físicas do Vidro [3] [4]

Propriedades	Valor Característico
Resistência à Tração	De 30 a 70 MPa.
Resistência à Compressão	Aproximadamente 1000 MPa.
Resistência à Flexão	De 40 MPa para um vidro recozido. Para um vidro temperado entre 120 MPa e 200 MPa.
Densidade	2,5
Massa Volúmica	2500 Kg / m ³
Módulo Elasticidade, E	72 GPa [3]
Coefficiente de Poisson, ν	0,2
Dureza	O vidro tem dureza de 6,5 na escala de Mohr, entre a Ortoclase e o Quartzo.
Coefficiente de Dilatação Térmica Linear	Toma o valor de $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para intervalos de temperatura de 20 $^\circ\text{C}$ a 300 $^\circ\text{C}$.

No que toca a uma das temáticas principais desta dissertação, o dimensionamento térmico de vidros, das propriedades físicas expostas no quadro 1, apenas o módulo de elasticidade, E , e o coeficiente de dilatação, α , serão uteis.

2.4. TIPOS DE VIDRO

2.4.1. INTRODUÇÃO

Existem vários fatores a controlar na escolha de um vidro num projeto. Especificar a solução adequada do tipo envidraçado a utilizar define o sucesso do projeto.

A indústria vidreira está em constante inovação. Novos tipos de vidro são lançados constantemente, na tentativa de superar a performance dos existentes.

Serão assim apresentados até à data deste trabalho, várias variedades de vidro existentes no mercado atualmente. Com tamanha variedade de soluções vidreiras, não será difícil encontrar uma solução que permita alcançar as propriedades de controlo de ganho solar, luz e isolamento desejadas [4].

2.4.2. PROCESSO DE FABRICO. VIDRO RECOZIDO MONOLÍTICO.

O vidro recozido monolítico, outras vezes chamado de vidro *float*, é o vidro originário do processo de fabrico com o mesmo nome, *float*, inventado pela empresa britânica *Pilkington* ainda em atividade [8]. Passa por fazer flutuar a matéria vítrea num banho de estanho. Este processo foi uma enorme revolução no fabrico do vidro, possibilitando obter vidros planos lisos pouco defeituosos. O vidro recozido por si só é um produto, mas é também a base para a fabricação de outros tipos de vidro transformados abordados adiante [4].

A composição de um vidro recozido é a seguinte [4]:

- Sílica, sob a forma de areia (70 a 72%);
- Um fundente, o sódio, sob a forma de carbonato e sulfato (cerca de 14%);
- Um estabilizante, a cal, na forma de calcário (cerca de 10%);
- Diversos óxidos, como a Alumina e o Magnésio, que melhoram as propriedades físicas do vidro, especificamente a resistência aos fenómenos atmosféricos;
- Por vezes óxidos metálicos para conferir coloração à massa (caso de vidros de cor).

A esta mistura vitrificável, no intuito de baixar a temperatura de fusão e acelerar a estabilização do material, é adicionado vidro partido, também chamado de casco. Esta mistura é fundida a temperaturas próximas dos 1550°C. À saída do forno, o vidro é designado de produto base [4].

O vidro monolítico recozido assim é chamado devido ao fato de ele próprio ser fabricado por um processo de recozimento, através de um resfriamento controlado que evita uma tensão residual no vidro. O vidro posteriormente poderá ser cortado, usinado, polido ou perfurado. [4]

De referir também a existência no mercado do vidro extra claro, obtido pela menor presença de ferro na sua composição, dando origem a uma maior transmissão luminosa, *Tl*. [4].

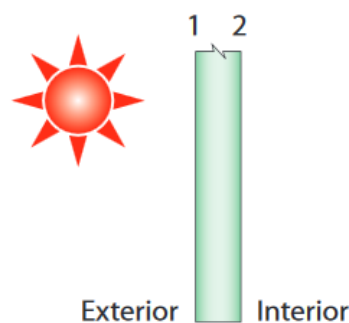


Fig.2 – Vidro Monolítico Recozido – Adaptado [9]

2.4.3. VIDRO COLORIDO NA MASSA

Os vidros coloridos na massa, são obtidos pelo mesmo processo do que os vidros recozidos monolíticos, apenas com diferenças na sua composição devido à presença de óxidos metálicos.

No passado o vidro colorido era usado como forma de reduzir a transmissão de energia solar. Porém devido à sua grande absorção energética, A , tende a irradiar o calor absorvido para o interior, além de reduzir a entrada de luz visível, (redução de Tl). Atualmente, para o propósito da redução da transmissão energética e consequentemente dos ganhos solares, os vidros baixo-emissivos tratados adiante são mais vantajosos [9]. No entanto os vidros coloridos são uma opção a ter em conta, principalmente em termos estéticos.

2.4.4. VIDRO ESTIRADO

Este tipo de vidro plano base é originado por um processo de fabrico mais antigo, diferente do processo float. Este processo de fabrico passa pela estiragem mecânica vertical da matéria vítrea. O vidro pode ser incolor ou colorido na sua massa. É muito pouco usado hoje em dia [10].

2.4.5. VIDRO IMPRESSO

O vidro impresso é um vidro plano base, incolor ou de cor, translúcido, obtido por estiramento e laminagem do vidro. Ele pode ter motivos gravados nas suas faces, impressos pela passagem do cilindro no momento da laminagem [4]. Este vidro pode também ser aramado.

2.4.6. VIDRO ARAMADO

O processo de fabrico consiste em colocar através da passagem entre cilindros, uma malha metálica no núcleo do material vítreo ainda em fusão. Na eventualidade de quebrar, a malha irá reter os fragmentos de vidro, prevenindo o ferimento de pessoas. É bastante usado em sistemas de proteção contra incêndios, decorrente de ser considerado um vidro de segurança [4].

2.4.7. VIDRO TEMPERADO

Existem dois tipos de vidros temperados, os temperados termicamente e os temperados quimicamente. Os primeiros, por larga margem, são os mais usuais na construção.

O processo de transformação do vidro float em vidro temperado termicamente passa por submeter o vidro float a uma temperatura crítica (aproximadamente 600°C) seguido de um arrefecimento brusco com jatos de ar. Este processo introduz um estado de compressão na zona superficial do vidro, enquanto o núcleo do vidro é submetido a um estado de tensão. As tensões de compressão na zona superficial do vidro aumentam a resistência do vidro às tensões de origem térmica e mecânica [3]. Por esta razão o vidro temperado é cerca de quatro a cinco vezes mais forte do que um vidro recozido monolítico da mesma espessura, e quando quebra, os seus estilhaços serão muito pequenos e assim muito menos suscetíveis de causar lesões. É por este motivo considerado um vidro de segurança.

O vidro temperado não pode ser cortado ou perfurado após resfriamento, e qualquer tratamento como o jateamento, a gravação a ácido ou até mesmo o polimento das bordas, podem causar a quebra do vidro [9].

Este tipo de vidro está sujeito à fratura espontânea pelo que um teste de qualidade rigoroso é necessário. O teste realizado é o tratamento térmico *Heat Soak*, que consiste num ciclo de submissões do vidro a altas temperaturas [4].

O vidro temperado quimicamente é um vidro recozido cuja superfície é reforçada após um processo tecnológico envolvendo trocas de iões a altas temperaturas. Este processo tecnológico muito avançado permite a têmpera de vidros curvos ou de formas singulares e de espessuras muito reduzidas, outrora muito difíceis de temperar por meio térmico [4].

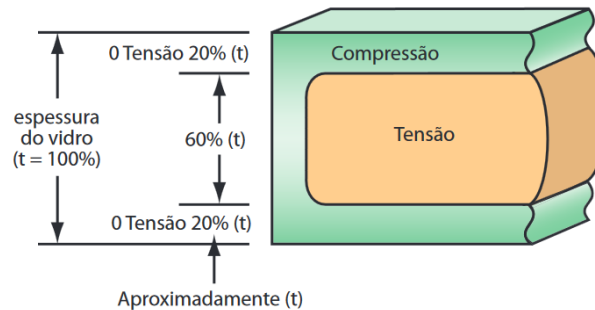


Fig.3 – Vidro Temperado e Tensões Instaladas – Adaptado [9]

2.4.8. VIDRO TERMO-ENDURECIDO

Os vidros termo-endurecidos, também chamados de semi-temperados, sofrem um tratamento térmico muito especial. Este tratamento consiste em ciclos de aquecimento e resfriamento que lhe conferem uma resistência mecânica e térmica aproximadamente duas vezes superior à de um vidro recozido monolítico da mesma espessura. Contudo a sua resistência térmica e mecânica é inferior à do vidro temperado [11].

Ao contrário do vidro temperado ele tem reduzida sensibilidade á fratura espontânea, logo a aplicação do teste *Heat Soak* é desnecessária [4].

Quando quebra, este vidro forma estilhaços de grandes dimensões, não podendo ser usado como um vidro de segurança. A sua aplicação é aconselhada a situações em que se deseja um vidro reforçado contra a ação do vento ou resistente ao choque térmico. A gravação com ácido, o jateamento ou o polimento das bordas podem causar a quebra do vidro. Também não deve ser perfurado ou cortado após o tratamento térmico [11].

2.4.9. VIDRO LAMINADO

Este vidro consiste na união de dois ou mais panos de vidro, de apenas um ou vários tipos de vidro, através de intercalares plásticos resistentes, utilizando pressão e calor.

O intercalar mais usado é o butiral de polivinil (PVB). Ele permite ao vidro resistir à penetração de objetos impactantes. Na eventualidade do vidro quebrar, devido à ação do intercalar, o vidro tenderá a permanecer na moldura, evitando que estilhaços caiam ou voem. Geralmente o vidro permanecerá intacto reduzindo o risco de ferimentos. Por esta razão é considerado um vidro de segurança [12].

A possível combinação de diferentes tipos de vidro e de diferentes espessuras torna o vidro laminado ideal para responder a uma grande variedade de solicitações. Exemplo disso é a incorporação de vidro temperado ou semi-temperado numa unidade de vidro laminado, aumentando a sua resistência ao impacto.

Em termos acústicos, o vidro laminado é também ele vantajoso, dado que atenua bastante a transmissão de som, graças ao PVB intercalado [9].

Os vidros laminados bloqueiam quase todo o tipo de radiações ultravioletas, constituído uma outra vantagem deste tipo de vidros [4].

Existe também a possibilidade de fabricar vidros laminados de cor ou até mesmo com motivos decorativos. Para este efeito basta que o fabrico de um intercaler de cor ou impresso com motivos [9].

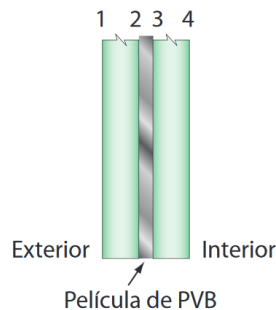


Fig.4 – Vidro Laminado - Adaptado [9]

2.4.10. VIDRO ISOLANTE

É composto de duas ou mais lâminas de vidro onde é colocada entre elas uma camada de gás. Os dois vidros são selados nas bordas de maneira a constituírem um sistema estanque mecanicamente estável e durável, próprio para a introdução de uma camada de gás [9] [13].

Este tipo de vidro é comumente chamado de vidro duplo, mas devido à inclusão nesta categoria de uma unidade de três vidros, o vidro triplo, optou-se por vidro isolante como denominação do tipo de vidro. O uso do vidro triplo é bastante raro em Portugal, e o seu uso apenas faz sentido em climas mais severos, como o do Norte da Europa, não sendo dada relevância a este tipo de vidro neste trabalho.

Nesta categoria são utilizados espaçadores ou intercalares, normalmente de alumínio, que fixam a distância entre os vidros. Dentro dos espaçadores é colocado um desidratante ou dessecante com vista a eliminar a humidade antes e após o fabrico. A vedação entre os vidros é garantida através da fixação aos vidros de um espaçador, usando um material betuminoso em toda a periferia [4].

O gás introduzido entre os painéis é na maioria das vezes ar. No entanto para melhores performances é possível a colocação de argón ou cripton, gases nobres com melhores propriedades térmicas.

É possível a utilização de várias combinações de vidros no vidro isolante, sejam eles temperados, semi-temperados, laminados, recozidos, coloridos ou revestidos.

Este tipo de tecnologia é a forma mais eficaz de reduzir transferências de calor num envidraçado.

Do ponto de vista de maximização do isolamento térmico, o uso de vidro baixo-emissivo é o recomendado neste tipo de solução. A tecnologia de vidros baixo-emissivos encontra-se já bastante desenvolvida, e o aprimoramento térmico foca-se agora cada vez mais na tecnologia do espaçador [4].

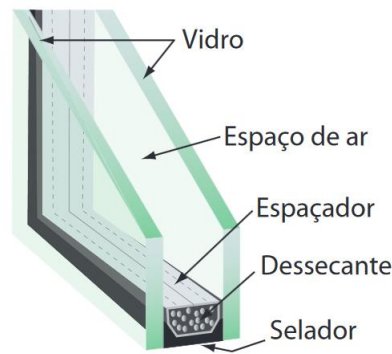


Fig.5 – Vidro Duplo – Adaptado [9]

2.4.11. VIDRO REVESTIDO SUPERFICIALMENTE

2.4.11.1. Introdução

Dentro desta categoria encontra-se uma grande multiplicidade de vidros. É especialmente dentro deste tipo de vidro que a inovação se fez notar nas últimas décadas.

Obtém-se principalmente por deposição de determinados compostos, principalmente óxidos metálicos, sobre a superfície de um vidro monolítico recozido. O revestimento aplicado visa alterar as propriedades base do vidro, nomeadamente o fator solar, g , a transmissão da luz, Tl , a cor e a emissividade [3].

2.4.11.2. Vidro de Auto-Limpeza

Este vidro é revestido por uma capa de um material de natureza mineral, foto catalítico, hidrófilo e transparente. Esta capa permite que as partículas de sujidade orgânicas sejam decompostas por ação dos raios UV. Conjuntamente com a ação deslizante da água da chuva, a sujidade é assim removida. Este tipo de vidros tem em vista uma redução na manutenção de um envidraçado. Pode ser aplicado em todo o tipo de ambientes [4].

2.4.11.3 Vidro de Controlo Solar de Alta Refletividade

Em geral, apresenta alta refletividade o que permite uma redução do ganho do calor resultante da reflexão e absorção. Se a capa se posicionar na superfície interior do edifício, o vidro apresentará maior grau de absorção energética, A , situação prejudicial em termos de choque térmico. Tem o inconveniente da transmissão de luz visível, Tl , ser algo reduzida. Surgem no mercado com grande variedade de cores de revestimento [4].

2.4.11.4 Vidro Baixo-Emissivo ou Low-e

O vidro é um dos mais populares e versáteis materiais de construção de hoje em dia. Para esse efeito contribui o seu enorme desenvolvimento na performance solar e térmica. Este desenvolvimento deve-se em larga parte ao aprimoramento da tecnologia do vidro baixo-emissivo.

A habilidade com que um material irradia energia é conhecida como emissividade. Os envidraçados como todos os materiais, irradiam calor, para o exterior ou interior, dependendo da emissividade e temperatura das suas superfícies [14].

Num vidro simples, a emissividade é de aproximadamente 0,84. Significa isto que o vidro absorve e transmite 84% da energia térmica sobre forma de radiação incidente no vidro. Um vidro de baixa emissividade tem uma emissividade que vai desde 0,35 até 0,04 [14].

Este tipo de vidro relativamente neutro em aparência reduz assim os ganhos e perdas de calor pela radiação infravermelha (energia térmica). O valor de U diminui, e a eficiência energética aumenta. Reduzir a emissividade da superfície do vidro é, portanto, uma excelente forma de melhorar o isolamento térmico do envidraçado.

As tecnologias mais avançadas apresentam vidros baixo-emissivos com diversas camadas, projetados para superior transmissão da luz visível (baixa reflexão) e considerável redução das transferências de calor. A este tipo de vidros de alta performance, dá-se o nome de vidros de espectro seletivo [4].

2.4.12. OUTROS VIDROS

Existem outros tipos de vidro originados por outros tipos de tratamento. Por exemplo o vidro serigrafado, é um vidro na qual é depositado por meio de um ecrã têxtil um motivo original em esmalte opaco, muito interessante do ponto de vista estético.

De referir também a existência do vidro borossilicato, um vidro com um coeficiente de dilatação térmica muito reduzido, que pode ter diversas aplicações nomeadamente como vidro resistente ao choque térmico.

Um vidro, transformado ou não, pode, dependendo do caso, pode sofrer tratamentos de esmaltagem ou lacagem, que dão diferentes características e qualidades estéticas ao vidro.

2.5. ANÁLISE DE PARÂMETROS DE DIFERENTES TIPOS DE VIDRO

2.5.1. VIDROS SIMPLES

2.5.1.1. Introdução

Será feita uma análise aos principais parâmetros estudados, para alguns tipos de vidros simples.

Os parâmetros analisados são os seguintes:

- Coeficiente de transmissão térmica do vão, U , expresso em $(W/(m^2 \cdot K))$;
- Absorção energética, A , %;
- Fator solar, g ;
- Transmissão luminosa, Tl , %.

Os valores dos parâmetros serão apresentados com determinada cor e classificados qualitativamente, de acordo com o quadro 2, conforme a sua grandeza. Os parâmetros a azul ou a verde serão desejáveis.

Quadro 2 – Critério de classificação dos parâmetros por cor (vidros simples)

U	[0 ; 1,7]	[1,8 ; 2,2]	[2,3 ; 3,2]	[3,3 ; 6]
	Excelente	Bom	Razoável	Mau
A	[0 ; 14]	[15 ; 39]	[40 ; 60]	[61 ; 100]
	Excelente	Bom	Razoável	Mau
g	[0 ; 0,28]	[0,29 ; 0,57]	[0,58 ; 0,68]	[0,69 - 1]
	Excelente	Bom	Razoável	Mau
Tl	[0 ; 43]	[44 ; 65]	[66 ; 83]	[84 ; 100]
	Mau	Razoável	Bom	Excelente

A figura 6 ilustra a forma como as faces de um vidro simples são numeradas. A face 1 encontra-se voltada para o exterior, enquanto a face 2 encontra-se voltada para o interior.

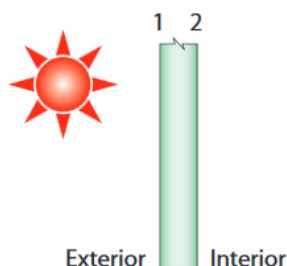


Fig.6 - Numeração das Faces em Vidro Simples

Os valores de parâmetros dos vidros expostos são baseados em vidros presentes no manual *Saint Gobain Glass* [4]. Note-se que para vidros do mesmo tipo, de outros fabricantes, os valores apresentados podem ser ligeiramente diferentes.

Os vidros baixo-emissivos não são normalmente encontrados no mercado na tipologia de vidro simples. Os seus parâmetros serão analisados posteriormente como constituinte de vidro duplo.

2.5.1.2. Vidro Monolítico Recozido Incolor

São apresentados no quadro 2, algumas soluções de vidros monolíticos recozidos incolores presentes no mercado [4]. Uma conclusão notória é a excelente luminosidade (elevada transmissão luminosa, TI) oferecida pelos vidros incolores, tal como uma absorção energética, A , relativamente reduzida. Os vidros extra-claros (soluções nº 2 e 4 do quadro 2) possibilitam uma transmissão luminosa, TI , ainda superior.

Conclui-se na análise ao quadro 3, após a observação das soluções nº 1, 6 e 7, que a transformação do vidro recozido em vidro temperado ou em termo-endurecido, não altera as características espectrofotométricas do vidro. De resto esta conclusão é válida para todos os envidraçados que possuem vidros tratados termicamente. O tratamento térmico apenas altera as propriedades mecânicas do vidro original e nunca as propriedades aqui analisadas. [4].

Quadro 3 – Propriedades de Vidros Monolíticos Recozidos Incolores, Vidro Temperado Incolor e Vidro Termo-Endurecido Incolor [4]

Nº	Vidro Monolítico Incolor	U	A (%)	g	TI (%)
1	Recozido incolor - 6 mm	5,7	14	0,82	89
2	Recozido extra-claro - 6 mm	5,7	2	0,90	91
3	Recozido incolor - 10 mm	5,6	21	0,78	86
4	Recozido incolor extra-claro - 10mm	5,6	4	0,89	91
5	Recozido incolor - 15 mm	5,5	29	0,72	84
6	Temperado incolor - 6mm	5,7	14	0,82	89
7	Termo-Endurecido – 6 mm	5,7	14	0,82	89

2.5.1.3. Vidro Monolítico Colorido na Massa

São apresentados no quadro 4, algumas soluções de vidros monolíticos coloridos na massa [4]. O vidro recozido colorido na massa como já foi referido possui uma forte absorção energética, A , em alguns vidros superior a 60 %, o que o torna um vidro sensível à quebra por choque térmico. A transmissão luminosa, Tl , é reduzida, por essa razão este tipo de vidro é considerado um vidro de controlo solar.

Quadro 4 – Propriedades de Vidros Recozidos Coloridos na Massa [4]

Nº	Vidro Recozido Monolítico Colorido na Massa	U	A (%)	g	Tl (%)
1	Cor - Bronze - 6 mm	5.7	46	0,61	49
2	Cor - Bronze - 10 mm	5.6	62	0,49	33
3	Cor - Gris - 6 mm	5.7	51	0,57	41
4	Cor - Gris - 10 mm	5.6	67	0,45	24
5	Cor - Rosa - 10 mm	5.6	35	0,69	59
6	Cor - Verde - 10 mm	5.6	64	0,48	63

2.5.1.4. Vidro Recozido de Controlo Solar de Alta Refletividade

Este tipo de vidro recozido conjugado com uma capa de alta refletividade tem as suas propriedades muito semelhantes aos vidros recozidos coloridos na massa. São ambos vidros direcionados ao controlo solar.

A capa de óxidos com propriedades de elevada refletividade pode ser posicionada do lado exterior (posição 1), ou no lado interior (posição 2) (ver figura 6). O revestimento do vidro é melhor aproveitado quando a capa é posicionada exteriormente (posição 1), desta forma, as radiações são mais rapidamente refletidas, impedindo que o vidro absorva tanta radiação (A). Por conseguinte o fator solar, g , é relativamente minorado, isto sem alterar a luminosidade transmitida ao interior, Tl , como se verifica no quadro 5, comparando as soluções nº 8 e 9, ou as soluções nº10 e 11.

A posição da capa influencia o aspeto visual exterior do vidro, sendo que a principal razão da maioria dos vidros deste tipo contar com a capa posicionada voltada para o interior (posição 2), e não para o exterior, como é o caso das soluções nº 1 a 7 do quadro 5, se dever ao melhor aspeto estético exterior oferecido por essa configuração [4].

Quadro 5 – Propriedades de Vidros Recozidos de Alta Refletividade [4]

Nº	Com capa exterior de Controlo Solar	U	A (%)	g	Tl (%)
1	Alta Refletividade A neutro - 6mm (Pos.2)	5.8	46	0,58	54
2	Alta Refletividade B incolor - 6mm (Pos.2)	5.7	25	0,52	32
3	Alta Refletividade B gris - 6mm (Pos.2)	5.7	62	0,53	15
4	Alta Refletividade B verde - 6mm (Pos.2)	5.7	64	0,37	26
5	Alta Refletividade C azul pastel - 6 mm (Pos.2)	4.9	66	0,27	14
6	Alta Refletividade C verde - 6mm (Pos.2)	4.7	79	0,23	12
7	Alta Refletividade C argent - 6mm (Pos.2)	5.0	62	0,30	20
8	Alta Refletividade D incolor - 6mm, capa exterior (Pos.1)	5.7	30	0,60	47
9	Alta Refletividade D incolor - 6mm, capa interior (Pos.2)	5.7	60	0,46	24

10	Alta Refletividade D havana - 6mm, capa exterior (Pos.1)	5.7	23	0,58	47
11	Alta Refletividade D havana - 6mm, capa interior (Pos.2)	5.7	43	0,42	24

2.5.1.5. Vidro Laminado

O vidro laminado é muito distinto entre ele, devido à possibilidade de agregar lâminas de vidro de todos os tipos, assim ele pode assumir várias performances, dependendo dos vidros que o constituam. No quadro 6 são expostos alguns vidros laminados simples, divididos em três grupos: os vidros laminados de proteção, os vidros laminados de proteção contra incêndios, e os vidros laminados anti-reflexo direcionado principalmente a montras ou áreas comerciais. Todos os vidros laminados apresentados são constituídos por lâminas de vidro recozido.

As espessuras do vidro laminado são normalmente expressas da forma “ $ab.x$ mm”. A letra a representa a espessura nominal da primeira lâmina de vidro. A letra b representa a espessura nominal da segunda lâmina de vidro. A letra x representa o número de películas de PVB utilizadas, sendo que por uma película de PVB, entende-se uma película de PVB de 0,38 milímetros (ver figura 7) [4].

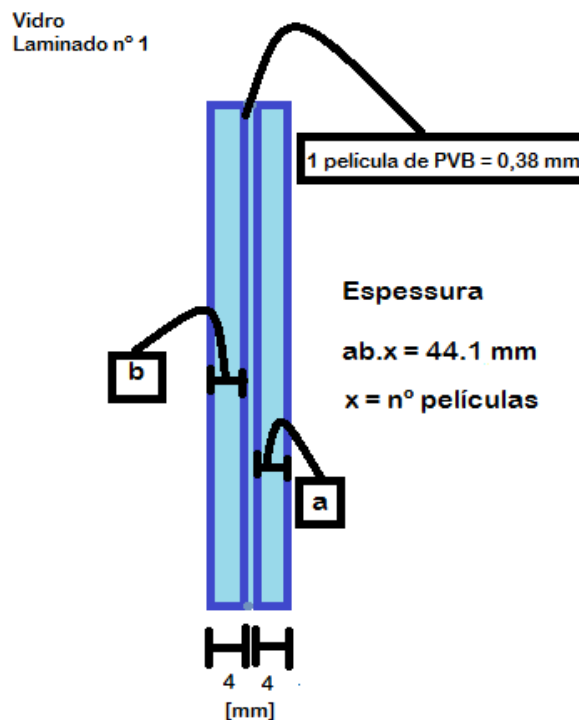


Fig.7 – Espessura de um Vidro Laminado

Tomando a solução de vidro laminado simples de proteção nº 1 do quadro 6, a sua espessura é representada por 44.1 mm. Isto significa que a primeira lâmina, tal como a segunda lâmina, apresenta uma espessura de 4 mm, e que as duas lâminas se encontram ligadas por apenas uma película de 0,38 milímetros de PVB. (ver figura 7). O vidro laminado referido apresenta assim uma espessura de aproximadamente 8 milímetros.

Quadro 6 – Propriedades de Vidros Laminados Recozidos [4]

Nº	Vidro Laminado	U	A (%)	g	TI (%)
1	Proteção A 44.1 8mm	5,7	22	0,70	87
2	Proteção A 66,1 12 mm	5,6	28	0,73	85
3	Proteção B 33.2 7 mm	5,7	20	0,78	87
4	Proteção B 66.2 13 mm	5,6	30	0,72	85
5	Proteção B 15 mm	5,6	33	0,70	85
6	Proteção reforçada 22 mm	5,4	33	0,66	84
7	Corta-fogo 16 mm	5,2	35	0,65	83
8	Corta-fogo 23 mm	5,6	30	0,72	98
9	Anti-reflexo 66.2 13 mm	5,6	30	0,72	98

2.5.1.6. Outros vidros

Estão definidos no quadro 7 vários tipos de vidro simples existentes no mercado juntamente com seus parâmetros, ainda não apresentados neste subcapítulo. Note-se que os seus parâmetros são relativamente distintos entre eles. São expostos alguns tipos de vidros serigrafados (nº 7, 8, 9 e 10), dois tipos de vidro tratados por esmaltagem (nº 2 e 3) e outros dois tipos de vidro foscados a ácido (nº 4 e 5). São apresentados igualmente um vidro impresso incolor (nº1) e um vidro laminado com PVB colorido (nº 11).

Quadro 7 – Propriedades de Outros Vidros Simples [4]

Nº	Outros Vidros	U	A (%)	g	TI (%)
1	Impresso incolor - 6mm	5,7	16	0,82	87
2	Esmaltado translúcido, face interior - 6mm	5,7	42	0,59	49
3	Esmaltado translúcido, face exterior -6mm	5,8	42	0,90	49
4	Foscado a ácido, face interior, incolor -5mm	5,8	15	0,81	88
5	Foscado a Ácido, face exterior, gris -5mm	5,8	47	0,58	49
7	Serigrafado temperado branco 30 %, posição 1 - 6mm	5,7	18	0,68	70
8	Serigrafado temperado, branco 30 %, posição 2 - 6mm	5,7	24	0,70	70
9	Serigrafado temperado, preto 30 %, posição 1 - 6mm	5,7	37	0,65	62
10	Serigrafado temperado, preto 30 %, posição 2 - 6mm	5,7	38	0,65	62
11	Laminado de Cor - 9mm	5,7	54	0,55	47

2.5.2. VIDROS DUPLOS

2.5.2.1. Introdução

Serão analisados grupo a grupo diferentes grupos de soluções de vidros duplos, destacando as suas principais características e propriedades comuns. Os parâmetros analisados são:

- o coeficiente de transmissão térmica do vão, U , expresso em $(W/m^2 \cdot K)$, para camadas de gás entre os painéis de vidro de ar ou de argon;
- a absorção térmica do vidro exterior, A_{e1} ;

- a absorção térmica do vidro interior, A_{e2} ;
- o fator solar, g ,
- a transmissão luminosa, Tl
- a reflexão luminosa exterior, R_{le} , representada por diferente simbologia, Rl .

Os valores dos parâmetros serão apresentados com determinada cor e classificados qualitativamente, de acordo com o quadro 8, conforme a sua grandeza. Os parâmetros a azul ou a verde serão desejáveis.

Quadro 8 – Critério de Classificação dos Parâmetros Térmicos (Vidros Duplos)

g	[0 ; 0,28]	[0,29 ; 0,57]	[0,58 ; 0,68]	[0,69 - 1]
	Excelente	Bom	Razoável	Mau
A_{e1} e A_{e2}	[0 ; 14]	[15 ; 39]	[40 ; 60]	[61 ; 100]
	Excelente	Bom	Razoável	Mau
Tl	[0 ; 43]	[44 ; 65]	[66 ; 83]	[84 ; 100]
	Mau	Razoável	Bom	Excelente
U, ar e $U, \text{árgon}$	[0 ; 1,7]	[1,8 ; 2,2]	[2,3 ; 3,2]	[3,3 ; 6]
	Excelente	Bom	Razoável	Mau

Por simplificação a espessura de um vidro duplo é representada por um sistema tipo “ $d(m)g$ ”, em que as letras d e g representam as espessuras respectivas dos dois vidros e a letra m entre parênteses, representa a espessura da camara de gás entre vidros (ver figura 8).

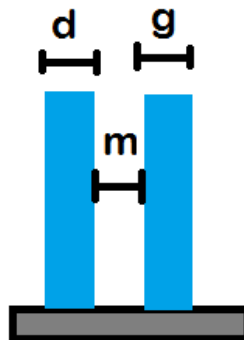


Fig.8 – Esquema de Representação da Espessura de um Vidro Duplo

As faces interior e exterior dos vidros presentes num vidro isolante são numeradas conforme ilustrado na figura 9. As faces 1 e 2 pertencem ao vidro exterior, enquanto as faces 3 e 4 pertencem ao vidro interior. As faces de número ímpar estão voltadas para o exterior, enquanto as faces de número par encontram-se voltadas para o interior.

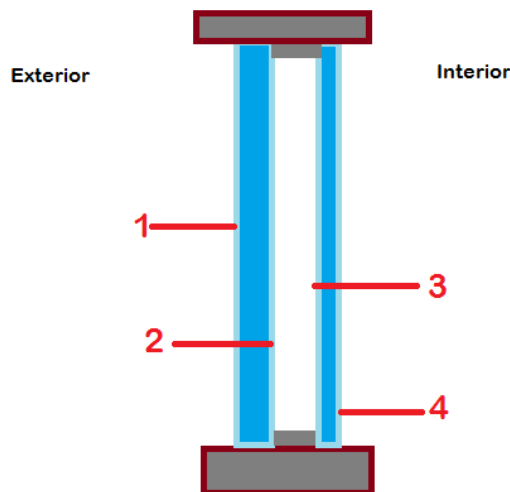


Fig.9 – Numeração das Faces de um Vidro Duplo

Tal como foi referido para vidros simples, também para vidros duplos expostos de seguida, os valores dos parâmetros são baseados em vidros apresentados no manual da *Saint Gobain Glass* [4]. Refere-se que para outros fabricantes, os valores apresentados podem ser ligeiramente diferentes.

2.5.2.2. Vidro Duplo com dois vidros recozidos sem revestimento de capa

Numa análise ao vidro duplo constituído por dois vidros recozidos sem revestimento de capa, nota-se a influencia da espessura da caixa de ar na diminuição do coeficiente U , por exemplo, quando se compara espessura os vidros nº 3 e 4 do quadro 9. O vidro nº 3, com vidros mais espessos, mas com menor espessura de caixa de ar, possui um isolamento térmico inferior ao do vidro 4, que possui menor espessura de vidros, associado a uma maior caixa de ar.

Este tipo de solução de vidros recozidos mesmo sem qualquer revestimento de capa resulta numa diminuição, para aproximadamente metade da rapidez com que existem trocas de calor no envidraçado, traduzido pelo coeficiente U , quando comparado com um vidro simples.

O vidro duplo constituído por dois vidros recozidos incolores, devido à sua natureza, possui uma baixa absorção energética, A , uma elevada transmissão luminosa, TI e, por conseguinte, uma baixa refletividade exterior, RI_e . A desvantagem trazida por uma elevada transmissão térmica, TI , é um elevado fator solar, g .

O fator solar, g , é atenuado quando um dos vidros incolores é substituído por um vidro colorido na massa. Isto ocorre muito à custa da enorme absorção energética, A , do vidro colorido que implica uma inconveniente perda de transmissão luminosa, TI (ver quadro 10).

Quadro 9 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidros Recozidos Incolores [4]

Nº	Recozido + Recozido	g	A_{e1} (%)	A_{e2} (%)	TI (%)	RI (%)	U , Ar	U , Árgon
1	Incolor x 2 - 8(16)8 mm	0,68	19	11	77	14	2,7	
2	Incolor x 2 - 6(16)6 mm	0,72	14	10	79	14	2,7	
3	Incolor x 2 - 6(12)6 mm	0,72	14	10	79	14	2,8	-
4	Incolor x 2 - 4(15)5 mm	0,75	10	9	80	14	2,7	-

5	Incolor x 2 - 5(12)5 mm	0,74	13	9	80	14	2,9	-
---	-------------------------	------	----	---	----	----	-----	---

Quadro 10 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidros Recozidos Incolor e Colorido [4]

Nº	Recozido + Recozido de Cor	<i>g</i>	<i>A_{e1}</i> (%)	<i>A_{e2}</i> (%)	<i>TI</i> (%)	<i>RI</i> (%)	<i>U, Ar</i>	<i>U, Árgon</i>
1	Cor bronze + Incolor - 6(12)6 mm	0,49	47	7	44	7	2,8	-
2	Cor gris + Incolor - 6(12)6 mm	0,46	52	6	37	6	2,8	-

2.5.2.3. Vidro Duplo constituído por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro de Alta Refletividade

Todas as soluções existentes no mercado definidas nos quadros 11 e 12, referem-se apenas á solução de um vidro duplo constituído por um vidro de alta refletividade como vidro exterior e um vidro recozido incolor como vidro interior.

Esta solução de vidro duplo caracteriza-se por uma elevada absorção energética, *A*, do vidro exterior, tanto mais elevada quanto mais escura for a cor da capa de alta refletividade. A capa pode ocupar duas posições: voltada para o exterior (quadro 11) e voltada para o interior (quadro 12). As implicações associadas a cada posição já foram abordadas em 2.5.2.4. para o vidro simples de alta refletividade, e mantêm-se para esta solução de vidro duplo.

Com este tipo de solução é possível conseguir fatores solares, *g* muito baixos, geralmente alcançados face a uma baixíssima transmissão solar, *TI*, e uma elevada absorção energética, *A*.

Os valores do coeficiente de transmissão térmica, *U*, não são muito diferentes dos valores de *U* da solução de vidro duplo constituída por dois vidros recozidos sem revestimento. A principal melhoria em termos térmicos da conjugação de um vidro recozido incolor com um vidro de alta refletividade, é a mesma ocorrida obtida da conjugação do vidro recozido colorido na massa ao vidro recozido exterior; isto é, a diminuição do fator solar, *g*.

Conclui-se que o uso do vidro de alta refletividade tem como objetivo a diminuição do fator solar, *g*, através da sua refletividade energética que provoca, na maioria dos casos, uma indesejada diminuição de entrada de luz visível, isto é, uma diminuição de transmissão luminosa, *TI*.

Quadro 11 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro de Alta Refletividade (Posição 1) [4]

Nº	Capa de Alta Refletividade (Posição 1)	<i>g</i>	<i>A_{e1}</i> (%)	<i>A_{e2}</i> (%)	<i>TI</i> (%)	<i>RI</i> (%)	<i>U, Ar</i>	<i>U, Árgon</i>
1	Alta Refletividade D neutro + Incolor - 6(12)6 mm	0,41	17	7	29	54	2,8	-
2	Alta Refletividade D gris + Incolor - 6(12)6 mm	0,28	36	4	13	53	2,8	-
3	Alta Refletividade D argent + Incolor - 6(12)6 mm	0,59	12	8	61	35	2,8	-
4	Alta Refletividade D havana + Incolor - 6(12)6 mm	0,32	45	4	22	34	2,8	-

Quadro 12 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro de Alta Refletividade (Posição 2) [4]

Nº	Recozido + Vidro Alta Refletividade (Posição 2)	<i>g</i>	<i>A_{e1}</i> (%)	<i>A_{e2}</i> (%)	<i>TI</i> (%)	<i>RI</i> (%)	<i>U, Ar</i>	<i>U, Árgon</i>
5	Alta Refletividade D neutro + Incolor - 6(12)6 mm	0,42	25	7	29	46	2,8	-
6	Alta Refletividade D gris + Incolor - 6(12)6 mm	0,31	62	4	13	13	2,8	-
7	Alta Refletividade D argent + Incolor - 6(12)6 mm	0,59	13	9	61	35	2,8	-
8	Alta Refletividade D havana + Incolor - 6(12)6 mm	0,34	61	4	22	12	2,8	-
9	Alta Refletividade C pastel + Incolor - 6(12)6 mm	0,24	67	2	18	18	2,6	-
10	Alta Refletividade C verde - 6(12)6 mm	0,15	80	1	11	23	2,5	-

2.5.2.4. Vidro Duplo constituído por um Vidro Recozido Incolor e um Vidro Baixo-Emissivo

O vidro duplo composto por um vidro recozido incolor e um outro vidro baixo-emissivo, é uma excelente solução em termos de redução do coeficiente de transmissão térmica, *U*. As soluções apresentadas nos quadros 13 e 14 permitem a conjugação de uma camada de gás composta por ar ou árgon, que permitem um coeficiente *U* próximo de $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Isto trata-se de uma redução de aproximadamente 500 % em relação a um vidro simples.

A associação do vidro baixo-emissivo permite baixar as transferências de calor por radiação, devido á redução da emissividade do vidro, assunto já abordado em 2.4.10.4. A capa age como uma barreira térmica entre as envolventes interior e exterior.

A posição da capa influencia a prestação térmica da unidade de vidro isolante. São consideradas duas posições possíveis da capa: no vidro exterior voltada para o interior (posição 2), ou no vidro interior voltada para o exterior (posição 3).

A posição 2 é mais favorável em época quente, altura em que se pretende reduzir os ganhos solares. A barreira está posicionada numa posição em que o calor é refletido numa posição anterior à da camara de ar e à do vidro interior, minorando a quantidade de energia térmica absorvida e transmitida por estes componentes. Assim o vidro exterior estará mais suscetível a uma alta absorção energética, *A_{e1}*, enquanto o vidro interior será poupado (baixo *A_{e2}*). O fator solar, *g*, será relativamente reduzido nesta configuração de posição de capa (fator solar, *g*, na ordem de 0,40). Os exemplos 1 e 2 do quadro 14 demonstram esta situação.

A posição 3 é benéfica em época fria, quando se pretende evitar perdas de calor para o exterior. A capa baixo-emissiva encontra-se mais próxima do interior, sendo mais eficaz a refletir a radiação em forma de calor para o interior, bem como, em maximizar os possíveis ganhos solares. Espera-se assim que para o mesmo tipo de envidraçado, o fator solar, *g*, seja mais elevado quando a capa se encontra na posição 3. As soluções de 1 a 6 do quadro 13 detêm a capa na configuração mencionada.

Quadro 13 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidro Baixo-Emissivos (Posição 3) e Vidro Recozido Incolor [4]

Nº	Capa na Posição 3	g	A _{e1} (%)	A _{e2} (%)	TI (%)	RI (%)	U, Ar	U, Árgon
1	Incolor + Baixo-Emissivo A - 4(12)4 mm	0,71	10	10	73	21	2,3	2,0
2	Incolor + Baixo-Emissivo A - 5(16)4 mm	0,70	13	9	72	21	2,1	1,9
3	Incolor + Baixo-Emissivo B - 4(16)4 mm	0,69	10	20	67	18	1,7	1,5
4	Incolor + Baixo-Emissivo B - 6(12)6 mm	0,65	15	21	67	18	1,9	1,6
5	Incolor + Baixo-Emissivo C - 6(12)6 mm	0,61	16	17	74	11	1,7	1,4
6	Incolor + Baixo-Emissivo E - 6(12)6 mm	0,60	18	14	75	12	1,6	1,3

Quadro 14 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidro Baixo-Emissivos (Posição 2) e Vidro Recozido Incolor [4]

Nº	Capa na Posição 2	g	A _{e1} (%)	A _{e2} (%)	TI (%)	RI (%)	U, Ar	U, Árgon
1	Baixo-Emissivo D + Incolor - 6(12)6 mm	0,41	34	3	69	12	1,4	1,1
2	Baixo-Emissivo D + Incolor - 8(16)8 mm	0,4	37	4	67	11	1,4	1,1

2.5.2.5. Vidro Duplo constituído por um Vidro Laminado e um Vidro Recozido Incolor

No quadro 15 estão caracterizadas as soluções de vidros duplos constituídos por um vidro laminado e um vidro recozido incolor. Os vidros laminados considerados são igualmente de natureza recozida incolor. Por esta razão os parâmetros desta tipologia de vidro se assemelham aos do vidro duplo constituídos por dois vidros recozidos incolores abordados em 2.5.2.2.

Quadro 15 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por Vidro Laminado e Vidro Recozido Incolor [4]

Nº	Vidro Recozido Exterior + Vidro Laminado Interior	g	A _{e1} (%)	A _{e2} (%)	TI (%)	RI (%)	U, Ar	U, Árgon
1	Incolor + Laminado Proteção A - 8(6)33.1 mm	0,68	19	12	78	14	3,2	-
2	Incolor + Laminado Proteção A - 8(6)44.1 mm	0,67	15	18	77	14	3,2	-
3	Incolor + Laminado Proteção A - 8(12)44.2 mm	0,67	18	16	77	14	2,8	-
4	Incolor + Laminado Proteção A - 10(16)88.2 mm	0,63	22	22	72	13	2,6	-
5	Incolor + Laminado Proteção A - 4(12)33.2 mm	0,73	11	15	80	14	2,9	-
6	Incolor + Laminado Proteção A - 6(12)44.1 mm	0,70	15	16	78	14	2,8	-
7	Incolor + Laminado Proteção B - 8(12)44.2 mm	0,68	12	25	76	14	3	-

2.5.2.6. Vidro Duplo constituído por um Vidro Laminado e um Vidro Monolítico, com uma Capa Baixa-Emissiva Associada

No quadro 16 são apresentadas unidades de:

- vidro duplo com um vidro baixo emissivo exterior e um vidro laminado interior (nº1 e nº2);
- vidro duplo com vidro laminado exterior e um vidro baixo-emissivo interior (nº3);
- vidro duplo com um vidro recozido exterior associado a um vidro laminado com capa baixo-emissiva (nº4).

Dada a natureza das tipologias de vidro envolvidas: vidros laminados recozidos ou monolíticos recozidos, com a integração de uma capa num dos dois vidros, é natural esperar-se que o comportamento deste tipo de unidades de vidro duplo seja semelhante ao descrito em 2.5.3. 4 (vidro duplo constituído por vidro monolítico e vidro baixo-emissivo).

Quadro 16 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Laminado e Vidro Monolítico, integrando uma capa Baixa-Emissiva [4]

Nº	Baixo-Emissivo Exterior + Laminado Interior	<i>g</i>	<i>A_{e1}</i> (%)	<i>A_{e2}</i> (%)	<i>TI</i> (%)	<i>RI</i> (%)	<i>U, Ar</i>	<i>U, Árgon</i>
1	Incolor + Laminado Proteção B com revestimento baixo-emissivo A - 6(12)44.2 mm	0,41	34	5	68	12	1,6	1,1
2	Incolor + Laminado Proteção B com revestimento baixo-emissivo A - 8(6)33.1 mm	0,42	29	4	70	12	1,6	1,1
Nº	Laminado Exterior + Baixo-Emissivo Interior	<i>g</i>	<i>A_{e1}</i> (%)	<i>A_{e2}</i> (%)	<i>TI</i> (%)	<i>RI</i> (%)	<i>U, Ar</i>	<i>U, Árgon</i>
3	Laminado Proteção A + Baixo-Emissivo A - 33.1(12)4 mm	0,63	20	17	68	18	1,9	1,5
Nº	Recozido Exterior + Laminado Baixo-Emissivo Interior	<i>g</i>	<i>A_{e1}</i> (%)	<i>A_{e2}</i> (%)	<i>TI</i> (%)	<i>RI</i> (%)	<i>U, Ar</i>	<i>U, Árgon</i>
4	Incolor + Laminado Proteção A com revestimento baixo-emissivo C - 4(12) 44,1 mm	0,62	12	20	74	11	1,7	1,2

2.5.2.7. Vidro Duplo constituído por dois Vidros Laminados

São expostas no quadro 17, soluções de vidros isolantes com dois vidros laminados. As unidades de vidro duplo nº 1 e 2 são constituídas por componentes recozidos incolores e têm o seu comportamento semelhante ao descrito em 2.5.3.2.

Quadro 17 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por dois Vidros Laminados [4]

Nº	Vidro Recozido Exterior + Vidro Laminado Interior	<i>g</i>	<i>A_{e1}</i> (%)	<i>A_{e2}</i> (%)	<i>TI</i> (%)	<i>RI</i> (%)	<i>U, Ar</i>	<i>U, Árgon</i>
1	Incolor + Laminado Proteção A 8(6)33.1 mm	0,68	19	12	78	14	3,2	-
2	Incolor + Laminado Proteção A - 8(6)44.1 mm	0,67	15	18	77	14	3,2	-

3	Incolor + Laminado Proteção A - 8(12)44.2 mm	0,67	18	16	77	14	2,8	-
4	Incolor + Laminado Proteção A - 10(16)88.2 mm	0,63	22	22	72	13	2,6	-
5	Incolor + Laminado Proteção A - 4(12)33.2 mm	0,73	11	15	80	14	2,9	-
6	Incolor + Laminado Proteção A - 6(12)44.1 mm	0,70	15	16	78	14	2,8	-
7	Incolor + Laminado Proteção B - 8(12)44.2 mm	0,68	12	25	76	14	3	-

2.5.2.8. Vidro Duplo constituído por um Vidro Baixo-Emissivo e um Vidro de Alta Refletividade

A associação de um vidro baixo-emissivo e de um vidro de elevada refletividade resulta numa unidade de vidro duplo com um excelente comportamento térmico (ver quadro 18). Trata-se de uma unidade com um coeficiente de transmissão térmica, U , muito reduzido (próximo de $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) e um fator solar, g , também ele muito baixo.

Este tipo de envidraçado representa a melhor solução com vista à redução das trocas de calor num envidraçado. Apesar de tudo reduz de forma drástica a transmissão luminosa interior, TI , o que constitui uma enorme desvantagem.

Quadro 18 – Propriedades de Vidros Duplos constituídos por um Vidro Baixo-Emissivo e um Vidro de Alta Refletividade [4]

Nº	Vidro Controlo Solar Exterior + Vidro Baixo-Emissivo Interior	g	A_{e1} (%)	A_{e2} (%)	TI (%)	RI (%)	U, Ar	$U, \text{Árgon}$
1	Alta Refletividade C azul + Baixo Emissivo F - 6(12)6 mm	0,19	69	3	17	18	1,6	1,1
2	Alta Refletividade C verde + Baixo Emissivo F - 6(12)6 mm	0,11	80	1	10	23	1,6	1,1
3	Alta Refletividade C crómio + Baixo Emissivo F - 6(12)6 mm	0,14	64	2	12	30	1,6	1,1
4	Alta Refletividade C água marinha + Baixo Emissivo F - 6(12)6 mm	0,09	83	1	6	22	1,6	1,1

Numa unidade de vidro duplo pretende-se que o coeficiente de transmissão térmico, o fator solar e as absorções solares sejam minimizados. Uma solução que apresente valores a azul para estes parâmetros, constitui uma solução muito desejável no que diz respeito ao que se pretende que um envidraçado apresente em relação a esse mesmo parâmetro, ao invés de valores a vermelho, nada desejáveis. No caso da transmissão luminosa, espera-se que o seu valor seja o mais alto possível, e assim os valores a verde-escuro são os mais desejáveis, em oposição aos vermelhos.

Finalizando a análise das várias soluções de vidros isolantes, conclui-se que não existe um vidro perfeito, isto é, um vidro em que os seus parâmetros sejam considerados excelentes. Ainda assim podemos apontar que por exemplo, uma solução de vidro duplo com ambos os vidros recozidos, e vidro exterior revestido por uma capa baixo-emissiva na posição 2, constitui uma solução muito interessante. Veja-se o vidro nº1 presente no quadro 13, aqui apelidado de “Vidro Y” (ver quadro 19). Embora as performances em termos de fator solar e absorção energética não sejam plenamente satisfatórias, estão muito próximas disso.

Quadro 19 – “Vidro Y”

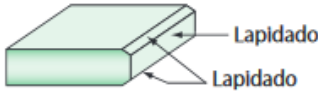
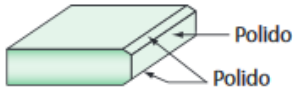
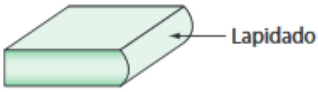
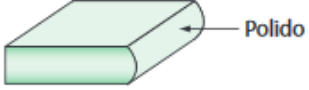
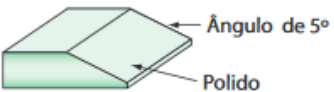
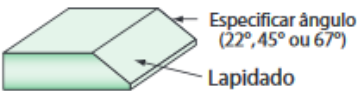
Nº	Vidro Y	g	A _{e1} (%)	A _{e2} (%)	TI (%)	RI (%)	U, Ar	U, Árgon
1	Baixo-Emissivo D + Incolor - 6(12)6 mm	0,41	34	3	69	12	1,4	1,1

2.6. TIPO DE BORDO

Os vidros em fase final de fabrico são cortados a diamante numa mesa. Após este processo a superfície de corte é irregular e com pequenas fendas. A este tipo de bordo dá-se o nome de bordo em bruto [3]. O tipo de bordo de um vidro é um parâmetro a ter em conta no dimensionamento térmico do vidro. A metodologia de dimensionamento térmico abordado no capítulo 4 diferencia apenas bordos em bruto de bordos polidos.

A título informativo, o quadro 20 define vários tipos de acabamento de bordo polido [9]. A lapidação de uma superfície implica somente a retificação da mesma com o objetivo de a tornar lisa. O polimento de uma superfície além de a tornar lisa, oferece-lhe uma aparência espelhada.

Quadro 20 – Tipos de Bordo – Adaptado [9]

Acabamento	Esquema	Aplicação
Lapidado Reto		Vidro Exterior Colado com borda exposta
Polido Reto		Vidro Exterior Colado com acabamento diferenciado
Meia-Cana		Espelhos, Vidros, Decorativos para móveis
Meia-Cana Polida		Espelhos, Vidros, Decorativos para móveis
Bisel lapidado		Vidro Exterior Colado
Bisel polido		Espelhos, Vidros, Decorativos de móveis

2.7. NOTAS FINAIS

Neste capítulo foi realizada uma introdução acerca do uso do vidro na construção e as suas problemáticas, dando especial foco às trocas de calor.

As propriedades físicas do vidro foram definidas. Seguidamente foram abordados os principais parâmetros utilizados para quantificar fenômenos de trocas de calor e ganhos solares ocorridos, bem como, parâmetros indicadores da luminosidade possibilitada pelo envidraçado. Os parâmetros mais relevantes são:

- o coeficiente de transmissão térmica do vão, U , expresso em $(W/(m^2 \cdot K))$;
- a absorção térmica, A , A_{e1} e A_{e2} ;
- o fator solar, g ,
- a transmissão luminosa, TI ;
- a reflexão luminosa exterior, RI .

Neste capítulo foram ainda listados e caracterizados os tipos de vidro mais comuns do mercado. Os tipos de vidro mais relevantes quanto à natureza vidreira são: o vidro recozido com ou sem revestimento, o vidro laminado, o vidro temperado e o vidro termo-endurecido.

Estes tipos de vidro podem ser assemblados em unidades de vidro simples ou em unidades de vidro isolante.

Para diferentes tipos de soluções de vidro foram analisados os parâmetros já referidos, tentando se estabelecer para cada tipo de envidraçado, um padrão em termos de grandeza desses mesmos parâmetros. Esta análise foi feita para vidros simples e vidros duplos. Apesar do vidro simples se encontrar em desuso, muito graças a impossibilidades de cariz normativo, entendeu-se que para alguns tipos de vidro, o seu comportamento é melhor entendido quando analisado desacompanhado.

No âmbito do dimensionamento mecânico, apenas o subcapítulo dedicado ao tipo de vidro é relevante para a escolha dos fatores de redução a utilizar na ocasião do dimensionamento, abordado no capítulo 4.

No âmbito do dimensionamento térmico, parte-se do princípio que todos os tipos de vidro abordados têm o mesmo módulo de Young, E , e coeficiente de dilatação térmica, α , com seus valores definidos neste capítulo em 2.3.

Tal como no dimensionamento mecânico, o tipo e natureza dos produtos vidreiros envolvidos influenciam o cálculo na parte térmica. O tipo de bordo, polido ou em bruto, é um fator também a ter em conta para este dimensionamento.

O coeficiente de transmissão térmica, U , as absorções energéticas dos painéis exterior e interior em vidro duplo, A_{e1} e A_{e2} são muito importantes no processo de dimensionamento térmico. Estes parâmetros são intervenientes no cálculo de temperaturas do vidro, explicado no capítulo 4.

É importante sensibilizar o leitor para a questão do preço dos vidros com características melhoradas, no entanto na presente dissertação este tema não foi abordado.

3

O CAIXILHO

3.1. O CAIXILHO E A ENVOLVENTE. ASPETOS FUNCIONAIS

A caixilharia serve de suporte e fixação dos vidros em fachada, absorvendo as solicitações atuantes nestes. O sistema de caixilharias é relevante para um edifício ser considerado eficiente e confortável.

Como parte integrante da fachada espera-se que o caixilho respeite vários aspetos funcionais intervenientes no desempenho da fachada. Alguns dos aspetos funcionais estão sujeitos a classes de desempenho europeias em função de pressões de referência associados à ação do vento. Os aspetos considerados são a permeabilidade ao ar, a estanquidade à água e a resistência ao vento e deformação [15].

Os caixilhos são classificados após serem submetidos a ensaios normalizados. A resistência mecânica à ação do utilizador, a força de manobra e a durabilidade são outros aspetos abordados pelo ITE 51 [15], existindo ensaios normalizados no intuito de classificação de um caixilho para cada aspeto [15].

Os caixilhos ainda devem ter em atenção a satisfação de necessidades no que diz respeito ao isolamento térmico, isolamento de ruídos exteriores e de transmissão luminosa [16].

3.2. SOLUÇÕES DE CAIXILHO NA FACHADA

3.2.1. INTRODUÇÃO. FACHADAS ENVIDRAÇADAS

A caixilharia surge na fachada em vãos preenchidos usualmente por portas e janelas. Estas soluções são as mais típicas, principalmente em edifícios habitacionais. O desenvolvimento posterior desta dissertação focar-se-á neste tipo de solução mais comum. No entanto, outras soluções de vidro na envolvente existem, nomeadamente, as fachadas envidraçadas cada vez mais frequentes na arquitetura moderna.

Um importante aspeto das fachadas envidraçadas é o uso de um sistema de montagem de vidro que privilegie a minimização da visão exterior da caixilharia ou até a elimine por completo, maximizando a área de vidro e em consequência a área iluminada.

Referem-se adiante os casos do Vidro Exterior Colado (VEC) e o Vidro Exterior Agrafado (VEA). Existem outros sistemas de fachadas em vidro mais tradicionais: o sistema de Vidro Exterior Preso (VEP), o mais tradicional, envolve a fixação do vidro ao caixilho por bites [4].

3.2.1.1 Vidro Exterior Agrafado (VEA)

O sistema de Vidro Exterior Agrafado (VEA) permite realizar paredes em vidro sem caixilho. O vidro é suportado pontualmente, exponenciando a entrada de luz natural (ver figura 10).

Os sistemas de montagem resumem-se a duas peças fundamentais distintas: grampos e as rótulas. É possível neste sistema a montagem de vidro duplo com caixa de ar [17].

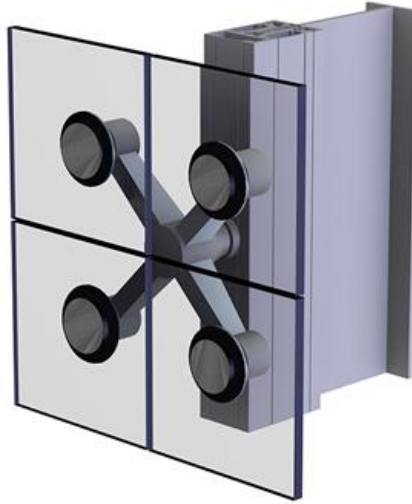


Fig.10 – Vidro Exterior Agrafado – Corte em Perspetiva

3.2.1.2 Vidro Exterior Colado (VEC)

Esta tecnologia permite através da dissimulação da caixilharia obter uma fachada que evidencia a presença do vidro. O vidro está solidarizado ao chamado mástique “estrutural”, que funciona como elemento de transferência de tensões para um aro de suporte. Este aro é fixo posteriormente a uma estrutura portante já preparada. Desta forma é executada uma superfície exterior sem perfis de caixilho à vista, como se pode observar na figura 11 [4] [18].



Fig.11 – Vidro Exterior Colado – Corte em Perspetiva

3.2.2. MODOS DE ABERTURA

O modo de abertura de uma janela deve adequar-se à sua função. Existem variadíssimos modos de abertura, desde as basculantes, as pivotantes e as giratórias sejam elas de eixo horizontal ou vertical e de abertura para o exterior ou interior. Existem também as janelas de gelosia ou de lâminas orientáveis.

Destaco neste texto as janelas de correr ou deslizantes, e as de guilhotina, especialmente se se tratarem de janelas isolantes ou de vidro duplo. Neste tipo de janelas existe a possibilidade dos painéis dos vidros se sobreporem total ou parcialmente. Este acontecimento constitui um agravamento das condições de ocorrência de quebra do vidro por choque térmico, devido ao aumento de temperatura no espaço entre os dois painéis de vidro duplo.

3.3 TIPO DE MATERIAL

A escolha do material usado no caixilho tem considerável influência no seu desempenho. Os materiais mais usados na fabricação de caixilhos são:

- Metal, usualmente o Alumínio;
- Madeira;
- Materiais Compósitos de Madeira;
- PVC (Policloreto de Vinil);
- Fibra de Vidro.

Em Portugal os mais habituais são: a madeira, o alumínio e o PVC

Naturalmente todos possuem as suas vantagens e desvantagens. Destaca-se a manutenção, a resistência mecânica, a rapidez de transmissão de calor e o custo como fatores a ter em conta na escolha do material.

O alumínio apesar de ser forte, leve, e quase não precisar de manutenção possui fraca capacidade de isolamento térmico. Uma forma de contornar o problema é a instalação de uma barreira térmica, que consiste em preencher o interior do perfil com uma tira de poliamida, um material de muito baixa condutividade. Esta adaptação denominada de perfil de alumínio com corte térmico, melhora muito as suas propriedades térmicas [19].

A madeira tem bom comportamento térmico, mas o desgaste provocado pelos fenómenos atmosféricos implica grande manutenção.

Os materiais compósitos de madeira trazem iguais ou superiores propriedades térmicas e mecânicas quando comparadas à madeira convencional, mas são mais estáveis, com melhor comportamento à humidade.

O PVC apesar de não ser um material tão forte como os outros, possui bom comportamento térmico e é económico. É também resistente à radiação UV.

O uso da fibra de vidro tem crescido nos últimos anos, é tida como mecanicamente resistente, de grande durabilidade, com a particularidade de poder ser pintada e recriar o aspeto da madeira [19].

3.4. INÉRCIA TÉRMICA DO CAIXILHO

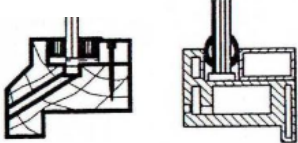
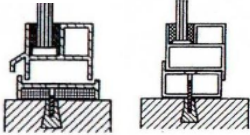

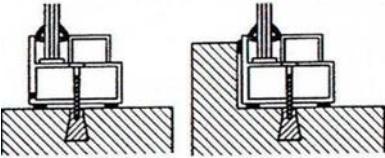
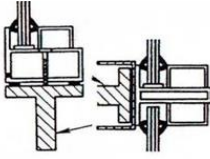

A fixação dos vidros é efetuada normalmente em caixilhos, que condicionam a temperatura do vidro presente na zona da gola (zona do vidro em contacto com o caixilho). Atendendo à pequena massa dos

perfis de suporte de vidro e à sua condutibilidade térmica, a temperatura no interior da gola também pode ser afetada pela variação de temperatura do elemento de enquadramento do vão onde o caixilho se encontra instalado [4].

O tipo de material do caixilho, as suas características, dimensões e a envolvente na qual ele é montado determinam a sua inércia térmica [4].

Existem três classes de inércia térmica a considerar: a inércia térmica fraca, a inércia térmica média, e a inércia térmica forte. O quadro 21 apresenta para vários tipos de caixilhos qual o seu tipo de inércia térmica.

Quadro 21 – Inércia Térmica dos Caixilhos – Adaptação [4]

Inércia Térmica Fraca	Esquema
Caixilho de Vidro Isolante em Madeira ou PVC.	
Caixilharia de fraca condutância em aço de perfil fino, ou em alumínio com ou sem rotura térmica sem qualquer contacto com a parede ou em armação metálica pesada.	
Vidro Exterior Colado (VEC).	
Inércia Térmica Média	Esquema
Caixilho em aço fixo ou móvel.	
Caixilho fixo em alumínio ou aço, em contacto com a parede ou com uma armação metálica pesada.	
Inércia Térmica Forte	Esquema
Caixilho num material mineral; Caixilho Metálico gravado em materiais minerais.	

O tipo de inércia térmica do caixilho indica a facilidade com que este altera a sua temperatura. Quanto mais forte é a inércia térmica menor é a velocidade de alteração da temperatura no caixilho [15]

A questão da inércia térmica do caixilho influencia de forma séria a temperatura do vidro na zona do bordo (zona onde existe contacto entre vidro e caixilho). Esta é uma variável fundamental para o dimensionamento térmico do vidro, abordado neste trabalho.

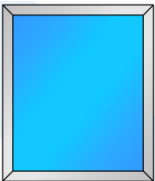
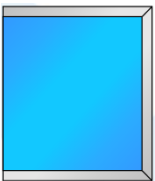

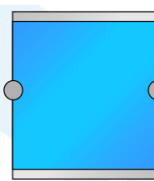
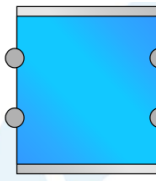
Os caixilhos mais usados em Portugal são os de alumínio com ou sem rutura térmica, de madeira e de PVC. Todos os caixilhos referidos, mais usados em Portugal, são caixilhos de inércia térmica fraca [1]

3.5. APOIOS DE VIDRO

O vidro pode estar apoiado no caixilho continuamente por quatro lados, três lados, ou apenas dois lados, conjugado com eventuais apoios pontuais.

O mais habitual é o vidro estar apoiado em quatro lados continuamente. São definidos os vários tipos de apoio que o caixilho pode fornecer ao vidro o quadro 22.

Quadro 22 - Tipos de Apoio de Vidro

Tipo de Apoio	Quatro apoios contínuos (apoiado perifericamente)	Três apoios contínuos	Dois apoios contínuos opostos	Dois apoios contínuos opostos com dois pontuais.	Dois apoios contínuos opostos com quatro pontuais.
Esquema					

A definição do tipo de apoio que é fornecido ao vidro é fundamental no processo de dimensionamento mecânico do vidro.

Na regulamentação francesa, é definido que um vidro retangular nos casos em que é apoiado continuamente em dois lados, com apoios pontuais nos outros dois lados a uma distância entre pontos apoiados inferior a 30 cm, é considerado perifericamente apoiado [20].

3.6. NOTAS FINAIS

Neste capítulo foram mencionadas exigências básicas do caixilho enquanto constituinte da fachada, bem como, soluções de envidraçado. Quanto às soluções do envidraçado, é importante referir que este trabalho desenvolver-se-á mais a situações em que a solução construtiva seja a janela. Contudo são abordadas neste capítulo outras soluções, em particular, as fachadas envidraçadas.

São enumerados os diferentes modos de abertura de uma janela, e neste assunto, é importantíssimo referir uma situação muito gravosa na temática do dimensionamento térmico. Esta situação refere-se à sobreposição de vidros proporcionada por janelas de guilhotina ou de correr, principalmente se se tratar de uma janela de vidro duplo.

Ainda neste capítulo foram apresentados os materiais mais usuais no fabrico do caixilho, onde caso a caso foram referidas as vantagens e desvantagens de cada um. Os materiais mais usados em Portugal são a madeira, o alumínio e o PVC.

Foram categorizados vários tipos de caixilho tendo em conta a sua inércia térmica. Esta propriedade do caixilho apresenta muita influência na matéria do dimensionamento térmico, a estudar posteriormente.

Na temática do dimensionamento mecânico, o tipo de apoio do vidro determina a forma como a espessura mínima resistente do vidro é calculada.

4

METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO E AO CHOQUE TÉRMICO DE VIDROS

4.1. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

4.1.1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento mecânico dos vidros tem como propósito a definição de uma espessura mínima para o envidraçado, que garanta a não quebra dos mesmos durante a sua vida, devido a ações mecânicas.

O domínio da metodologia de dimensionamento mecânico abordada neste capítulo dirige-se apenas a:

- Vidros planos, simples e duplos;
- Vidros monolíticos recozidos ou temperados (não aramados) e vidros laminados;
- Vidros verticais (na normalização francesa corresponde a vidros com $\beta \geq 60^\circ$ [20]);
- Vidros com quatro apoios;
- Vidros situados a uma altura máxima de 100 metros;
- Vidros localizados em Portugal Continental e arquipélagos dos Açores e da Madeira.

No âmbito deste trabalho apenas a ação do vento irá ser considerada. Ações como a do peso próprio ou a do peso da neve não serão consideradas devido ao domínio da aplicação se direcionar apenas a vidros verticais. Nestes casos estas ações terão componente nula.

A metodologia usa o RSA [2] para quantificar a ação do vento através de uma pressão de cálculo. Essa pressão de cálculo será depois usada para definir uma espessura mínima. A definição de uma espessura mínima é feita usando a norma francesa DTU 39 P4 2012 [20].

4.1.2. QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO

4.1.2.1. Velocidade de Rajada

O cálculo da velocidade de rajada de vento, v , (expressa em m/s), depende da localização do edifício que contém o envidraçado, e da localização do envidraçado no próprio edifício. Mais concretamente a velocidade de rajada depende dos seguintes fatores [2]:

Zona do Território: Duas zonas são consideradas. A zona B inclui os arquipélagos da Madeira e Açores, tal como os territórios continentais portugueses a menos de 5 Km do mar ou a altitude superior a 600 metros. O restante território é incluído na Zona A [2].

Rugosidade Aerodinâmica: São considerados dois tipos de rugosidade. A rugosidade I é própria de edifícios que se situem em zonas urbanas onde edifícios de médio e grande porte predominam. A rugosidade II é atribuída às restantes zonas como zonas de periferia urbana ou zonas rurais [2].

Altura acima do solo do envidraçado (h’): medida até à parte superior da janela, expressa em metros. Para esta metodologia apenas é válida uma altura inferior ou igual a 100 metros [2].

O quadro 23 apresenta as expressões utilizadas para o cálculo da velocidade de rajada. [2]

Quadro 23 – Expressões para o Cálculo da Velocidade [2]

	Rugosidade I	Rugosidade II
Região A	$v = 18 \times \frac{h'^{0,28}}{10} + 14 \text{ [m/s] (1)}$ <p>para $h' \leq 15 \text{ m}, v = 34 \text{ m/s}$</p>	$v = 25 \times \frac{h'^{0,20}}{10} + 14 \text{ [m/s] (2)}$ <p>para $h' \leq 10 \text{ m}, v = 39 \text{ m/s}$</p>
Região B	$v = 19,8 \times \frac{h'^{0,28}}{10} + 15,4 \text{ [m/s] (3)}$ <p>para $h' \leq 15 \text{ m}, v = 37,4 \text{ m/s}$</p>	$v = 27,5 \times \frac{h'^{0,20}}{10} + 15,4 \text{ [m/s] (4)}$ <p>para $h' \leq 10 \text{ m}, v = 42,9 \text{ m/s}$</p>

A título de exemplo, a velocidade de rajada a considerar para um envidraçado a 25 metros de altura, localizado na Madeira em ambiente rural (Zona B e rugosidade aerodinâmica do tipo II), é calculado da seguinte forma:

$$v = 27,5 \times \frac{h'^{0,20}}{10} + 15,4 = 27,5 \times \frac{25^{0,2}}{10} + 15,4 = 20,64 \text{ m/s} \quad (5)$$

4.1.2.2. Pressão Dinâmica do Vento

A pressão dinâmica do vento, w (expressa em Pa), é calculada apenas em função da velocidade do vento, v , através da seguinte expressão 6 [21]:

$$w = 0,613 \times v^2 \text{ [Pa]} \quad (6)$$

4.1.2.3 Coeficientes de Forma. Coeficientes de Pressão

Os coeficientes de forma podem ser de dois tipos: coeficientes de pressão ou de força. Para o propósito desta metodologia, que será a determinação de uma pressão uniformemente distribuída sobre a superfície do envidraçado, opta-se apenas pela utilização dos coeficientes de pressão por serem aqueles mais adequados.

Os coeficientes de pressão exterior e interior, respetivamente δp_e e δp_i , são afetados de sinal positivo ou negativo consoante correspondam a pressões ou a sucções exercidas na face do elemento. [2]

A ação resultante sobre o elemento é obtida somando vectorialmente as resultantes das pressões que se exercem numa e noutra face do elemento.

Os coeficientes de pressão interior (δp_i) dependem da existência de aberturas na envolvente do edifício e da sua importância e distribuição no contorno da construção [2]. Apresenta-se no quadro 24 os valores de δp_i para as diferentes situações de permeabilidade.



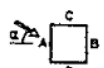
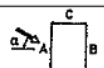
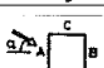
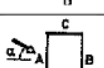
Quadro 24 – Coeficientes de Pressão Interior (δp_i) [2]

Quatro fachadas com permeabilidade semelhante:		-0,3
Duas fachadas opostas com permeabilidade semelhante e duas impermeáveis:		
	Vento normal às fachadas permeáveis	0,2
	Vento normal às fachadas impermeáveis	-0,3

Os coeficientes de pressão exterior (δp_e) dependem fundamentalmente da forma da construção e da direção e sentido de atuação do vento. De referir a existência de dois tipos de coeficientes de pressão exterior: os coeficientes globais e os coeficientes locais. Os coeficientes de pressão exterior globais dependem das relações geométricas do edifício, da direção do vento (0° no caso de ser perpendicular ou 90° no caso de ser tangente) e da fachada do edifício que se pretende analisar (A, B, C ou D) [2]. Os coeficientes de pressão exterior globais são apresentados no quadro 25.

As letras a e b representam a maior e menor dimensão em planta do edifício, e h , a sua altura.

Quadro 25 – Coeficientes de Pressão Exterior Globais (δp_e) [2].

Relações Geométricas do edifício		Planta	Direção do vento	Acções globais sobre as superfícies			
				A	B	C	D
$h/b \leq 1/2$	$1 < a/b \leq 3/2$		0°	0,7	-0,2	-0,5	-0,5
			90°	-0,5	-0,5	0,7	-0,2
	$3/2 < a/b \leq 4$		0°	0,7	-0,25	-0,6	-0,6
			90°	-0,5	-0,5	0,7	-0,1
$1/2 < h/b \leq 3/2$	$1 < a/b \leq 3/2$		0°	0,7	-0,25	-0,6	-0,6
			90°	-0,6	-0,6	0,7	-0,25
	$3/2 < a/b \leq 4$		0°	0,7	-0,3	-0,7	-0,7
			90°	-0,5	-0,5	0,7	-0,1
$3/2 < h/b \leq 6$	$1 < a/b \leq 3/2$		0°	0,8	-0,25	-0,8	-0,8
			90°	-0,8	-0,8	0,8	-0,25
	$3/2 < a/b \leq 4$		0°	0,7	-0,4	-0,7	-0,7
			90°	-0,5	-0,5	0,8	-0,1

Em certas zonas restritas, junto a arestas de paredes por exemplo, desenvolvem-se ações importantes cujo cálculo se faz com os respectivos coeficientes de pressão. Estas pressões localizadas não se adicionam às pressões exteriores definidas para o edifício e devem ser tidas em conta em certos elementos secundários como as janelas, se tal for mais desfavorável [2].

O uso de coeficientes de pressão exterior de ação global ou local fica ao critério de quem esteja a dimensionar. Normalmente o uso de coeficientes de pressão exterior locais conduz a pressões de cálculo mais desfavoráveis, contudo será realizada uma análise mais concreta relativamente a este tema no capítulo 5. Os coeficientes de pressão exterior locais são apresentados no quadro 26.

Quadro 26 – Coeficientes de pressão exterior locais (δpe) [2]

Relações Geométricas do edifício		Acções locais a considerar na faixa
$h/b \leq 1/2$	$1 < a/b \leq 3/2$	-0,8
	$3/2 < a/b \leq 4$	-1,0
$1/2 < h/b \leq 3/2$	$1 < a/b \leq 3/2$	-1,1
	$3/2 < a/b \leq 4$	-1,1
$3/2 < h/b \leq 6$	$1 < a/b \leq 3/2$	-1,2
	$3/2 < a/b \leq 4$	-1,2

4.1.2.4. Definição da Pressão de Cálculo

A definição da pressão de cálculo estática e uniformemente distribuída na superfície do envidraçado devido à ação do vento, P , chamada também de pressão de cálculo, é obtida pela expressão 7.

$$P = w \times (\delta pe - \delta pi) \text{ [Pa]} \tag{7}$$

Os coeficientes de pressão exterior e interior são adimensionais, mas tanto a pressão dinâmica (w) como a pressão estática do vento (P) se exprimem em Pascal [2].

4.1.3. PRINCÍPIO DE CÁLCULO

4.1.3.1. Introdução

O dimensionamento mecânico de um envidraçado é baseado na expressão 8:

$$e_R \geq e_1 \times c \text{ [mm]} \tag{8}$$

A espessura equivalente do envidraçado para o cálculo à resistência mecânica, e_R , é expressa em mm, bem como a espessura de cálculo, e_1 . O fator de redução, c , é adimensional [20].

4.1.3.2. Cálculo da espessura de cálculo e fator de redução, e_1 e c

O fator de redução, c , apenas toma dois valores possíveis: 1 ou 0,9. O fator toma o valor de 0,9, apenas quando o envidraçado se localiza no rés-do-chão e em que a sua altura desde o solo exterior à sua parte superior seja inferior a 6 metros [20]. Para todos os outros casos, o fator toma o valor de 1 [20].

A espessura de cálculo, e_1 , para o domínio da aplicação referido em 4.4.1, tem a sua expressão de cálculo a depender da relação L/l , isto é, a relação entre o lado maior do envidraçado, L , com o lado menor do envidraçado, l . As expressões relativas ao cálculo da espessura de cálculo, e_1 , são apresentadas no quadro 27 [20].

Quadro 27 – Cálculo de e_1 [20]

Espessura de Cálculo	
$L/l \leq 2,5$	$e_1 = \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \text{ [mm]} \quad (9)$
$L/l > 2,5$	$e_1 = \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]} \quad (10)$

Para um envidraçado com forma “mais quadrada”, ($L/l \leq 2,5$), o cálculo da espessura de cálculo, e_1 , depende da pressão de cálculo, P , expressa em Pa, definida em 4.1.2.4., e da área do envidraçado, S , expressa em m^2 .

O cálculo da espessura de cálculo, e_1 , para um envidraçado com forma “mais retangular”, ($L/l > 2,5$), é função do lado menor do envidraçado, l , expresso em m, e da pressão de cálculo, P , expressa em Pa.

4.1.3.3. Cálculo da espessura equivalente, e_R

A espessura equivalente procura estabelecer uma espessura proporcional àquilo que o envidraçado em questão oferece em termos de resistência mecânica. No método tratado a espessura equivalente, e_R depende da espessura dos painéis de vidro e da sua natureza (recozida, temperada, impressa, etc.)

As indicações presentes no DTU 39 P4 [20] apontam para o uso de espessuras nominais, e_n , no cálculo de e_R . Todavia neste trabalho optou-se por considerar as espessuras mínimas de fabricação, e_f , no sentido de tornar o processo de dimensionamento ainda mais exigente.

Por simplificação assumiu-se que a relação entre a espessura nominal, e_n , e a espessura mínima de fabricação, e_f , ambas expressas em milímetros, são relacionadas segundo a expressão 11.

$$e_f = (0,9573 \times e_n) + 0,0335 \text{ [mm]} \quad (11)$$

A expressão 11 resulta de uma regressão linear baseada na relação entre as espessuras nominais, e_n , e a espessura mínima de fabricação, e_f , de um vidro monolítico simples recozido do manual da *Saint-Gobain Glass* [4], definida no quadro 28.

A regressão linear apresenta uma forte correlação (R^2 muito próximo de 1) como se comprova na figura 12. Desta forma é considerado fundamentado o uso desta expressão para relacionar os dois tipos de espessuras.

Considera-se também que as espessuras dos intercalares do vidro laminado são tão pequenas que podem ser desprezadas face às espessuras dos painéis.

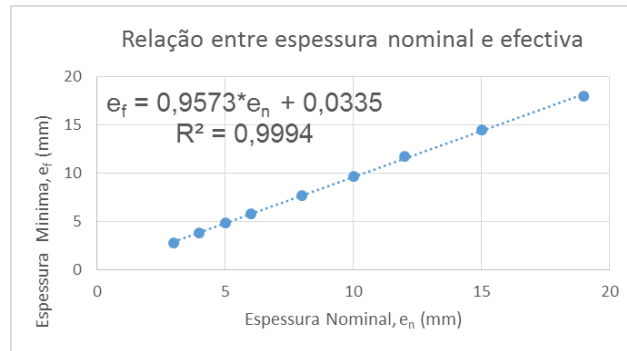


Fig.12 – Regressão Linear Baseada no Quadro 28

Quadro 28 – Relação entre Espessura Nominal, e_n e Mínima, e_f , de um Vidro Monolítico Recozido [4]

e_n [mm]	e_f [mm]
3	2,8
4	3,8
5	4,8
6	5,8
8	7,7
10	9,7
12	11,7
15	14,5
19	18

O tipo de envidraçado determina a forma como se efetua o cálculo da espessura equivalente, e_R .

Os tipos de envidraçados considerados são: o vidro simples monolítico, o vidro simples laminado, o vidro isolante duplo, seja ele com dois componentes monolíticos, com um componente monolítico e um outro laminado, ou com ambos os componentes laminados. As expressões 12, 13, 14, 15 e 16 usadas no cálculo da espessura equivalente, e_R , são apresentadas no quadro 29 e 30 [20].

Quadro 29 – Espessura Equivalente, e_R , em Vidro Simples [20]

Espessura Equivalente	
Vidro Simples Monolítico	$e_R = \frac{e}{\varepsilon_3}$ [mm] (12)
Vidro Simples Laminado	$e_R = \frac{e_i + e_j + \dots + e_n}{0,9 \times \varepsilon_2 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)}$ [mm] (13)

Quadro 30 – Espessura Equivalente, e_R , em Vidro Isolantes Duplos [20]

Espessura Equivalente	
Vidro Duplo com dois componentes monolíticos	$e_R = \frac{e_i + e_j}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} \text{ [mm]} \quad (14)$
Vidro Duplo com um componente monolítico e outro laminado	$e_R = \frac{e_i + \frac{e_j + e_k}{0,9 \times \varepsilon_2}}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} \text{ [mm]} \quad (15)$
Vidro Duplo com dois componentes laminados	$e_R = \frac{\frac{e_i + e_j}{0,9 \times \varepsilon_2} + \frac{e_k + e_l}{0,9 \times \varepsilon_2}}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} \text{ [mm]} \quad (16)$

As variáveis e_i , e_j , e_k e e_l representam a espessura de fabrico de painéis monolíticos ou de lâminas de vidro que compõem vidros laminados. Todas estas espessuras são expressas em milímetros [20].

As variáveis ε_1 , ε_2 e ε_3 são fatores de equivalência. Os fatores de equivalência traduzem no método de cálculo presente, a forma como a natureza dos componentes e a tipologia do envidraçado, influencia a resistência do mesmo face às ações mecânicas (vento).

O fator de equivalência ε_1 está associado à presença de vidro isolante, enquanto o fator ε_2 traduz o tipo de vidro laminado. O fator ε_3 materializa no dimensionamento a natureza (temperada, recozida, etc.) dos vidros ou lâminas presentes.

Na escolha do fator de equivalência ε_1 , o vidro isolante triplo (originalmente considerado no documento) não é considerado por não se encontrar dentro do domínio definido para este texto. Os diferentes valores que podem tomar os fatores de equivalência no dimensionamento são sintetizados nos quadros 31, 32 e 33 [20].

Quadro 31 – Fator de Equivalência para vidros isolantes [20]

Vidros Isolantes	ε_1
2 produtos vidreiros	1,6

Quadro 32 – Fator de Equivalência para vidros laminados [20]

Vidros Laminados		ε_2
Laminado de Segurança	Composto por 2 lâminas de vidro	1,3
	Composto por 3 lâminas de vidro	1,5
	Composto de 4 lâminas de vidro ou mais	1,6
Laminado	Compostos por 2 lâminas de vidro	1,6
	Composto por 3 lâminas de vidro ou mais	2,0

O DTU 39 P4 distingue na escolha do fator de equivalência, ε_2 , vidros laminados de segurança de simplesmente vidros laminados. Os segundos englobam todos os vidros que sejam compostos pela assemblagem de um ou mais lâminas de vidro agregadas por um intercalar plástico resistente. O vidro laminado de segurança é um vidro laminado que em caso de quebra, a camada intermédia tem a função de reter os fragmentos de vidro no lugar, limitando a dimensão da abertura, proporcionando uma

resistência residual e que reduz o risco de lesões por corte ou penetração. Esta distinção é feita segundo a norma francesa NF EN ISO 12543 [21].

Quadro 33 – Fator de Equivalência para vidros monolíticos [20]

Vidros Monolíticos	ϵ_3
Vidro Recozido	1
Vidro Recozido Armado	1,2
Vidro Estirado	1,1
Vidro Impresso	1,1
Vidro Impresso Armado	1,3
Vidro Temperado	0,61
Vidro Esmaltado Temperado	0,77
Vidro Impresso Temperado	0,71
Vidro Termo-Endurecido	0,8
Vidro Termo-Endurecido Esmaltado	1
Vidro Borossilicato	1
Vidro Borossilicato Temperado	0,61
Vidro Temperado Quimicamente	0,55

No que diz respeito ao fator de equivalência ϵ_3 , foram apresentadas várias naturezas de vidro a título informativo, no quadro 33. No entanto, o vidro recozido, o vidro termo-endurecido e o vidro temperado constituem as naturezas de vidro mais comuns do quotidiano.

4.1.4. VERIFICAÇÕES

Para complementar a verificação de resistência mecânica do vidro, a norma francesa DTU 39 P4 estabelece ainda limitações dimensionais apenas para vidros monolíticos, definindo uma espessura mínima a aplicar. Para vidros com área, S , superior a 5 m^2 [20]:

- A espessura nominal do vidro deve ser superior ou igual a 6 mm quando a parte inferior do vidro está a mais de 0,60 m do solo;
- A espessura nominal do vidro deve ser superior ou igual a 8 mm quando a parte inferior do vidro está a menos de 0,60 m do solo.

O documento DTU 39 P4 estabelece ainda espessuras nominais mínimas para vidros monolíticos, em função do menor lado do vidro, l , apresentadas no quadro 34 [20].

Quadro 34 – Limitações de espessura nominal em função do menor lado do vidro

l max. [m]	espessura nominal [mm]
--------------------------------	-------------------------------

0,66	3
0,92	4
1,5	5
2	6
3	8

É sugerido uma limitação da flecha máxima do vidro, para controlar a sua deformação. Esta limitação apenas é aplicável a vidros que tenham pelo menos um bordo livre ou no caso de vidros em coberturas de fraca pendente [20]. Nenhum destes casos pertence ao domínio da metodologia, pelo que essa verificação não será efetuada.

4.1.5. COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS BASEADAS NO DTU 39 P4 DE 2006 E DE 2012

4.1.5.1. Introdução

A metodologia de dimensionamento mecânica usada neste capítulo é baseada na norma francesa mais recente, o DTU 39 P4 de 2012 [20]. Neste subcapítulo será efetuada uma análise comparativa entre esta metodologia e a mais antiga, baseada no DTU 39 P4 de 2006 [22], como usada por *Maria Francisca Lima Carneiro Cavaleiro* em trabalho similar [1].

Esta análise tem como principal objetivo perceber se a norma evoluiu no sentido de tornar o dimensionamento mecânico de vidro mais ou menos exigente.

Este estudo comparativo será feito para três tipos de vidro duplo:

- Vidro Duplo constituído por dois vidros monolíticos recozidos (representados pela simbologia MM).
- Vidro Duplo constituído por um vidro monolítico recozido e um vidro laminado de segurança com duas lâminas recozidas (representados pela simbologia ML).
- Vidro Duplo constituído por dois vidros laminados de segurança com duas lâminas recozidas (representados pela simbologia LL).

A análise comparativa será feita através de ábacos que relacionam a pressão de cálculo, P com uma de duas variáveis: a menor dimensão do vidro, l , em metros, e, a área do envidraçado, S , em metros quadrados, para uma dada espessura.

A elaboração dos ábacos apresentados é baseada nas expressões de verificação da resistência mecânica dos vários tipos de vidro duplo para cada metodologia.

Foi apresentado neste capítulo as indicações que levam à verificação da resistência mecânica seguindo o documento mais recente. Serão apresentadas as expressões finais usadas na elaboração dos ábacos no que diz respeito a esta mesma metodologia. Estes ábacos aqui apresentados são elaborados com o mesmo raciocínio do que os ábacos de pré-dimensionamento apresentados no capítulo 5, que se baseiam nas mais recentes indicações, assim, para maior detalhe no que diz respeito à obtenção das expressões de verificação, o leitor pode consultar o referido capítulo.

De maneira a fundamentar as expressões usadas na elaboração dos ábacos no que diz respeito à metodologia mais antiga, será feito um breve apanhado da metodologia, direcionado principalmente para os tipos de vidro abordados, frisando as principais diferenças com a atualidade. Para maior detalhe,

o leitor poderá consultar o próprio DTU 39 P4 de 20016 ou então o texto de *Maria Francisca Cavaleiro* [1].

Entendeu-se ser do maior interesse apresentar de forma muito curta a metodologia mais antiga. Devido a não possuir aplicação corrente e não representar grande utilidade no desenvolvimento deste trabalho.

4.1.5.2. Expressões de Verificação Mecânica segundo a Metodologia Anterior

Serão oferecidos aqui os fundamentos envolvidos na construção das expressões de verificação mecânica, para os tipos de vidro duplo abordados segundo a metodologia anterior.

Primeiramente, são apresentados alguns aspetos a reter da metodologia anterior [22] em relação à mais recente [20], apresentada ainda neste capítulo:

- A pressão de cálculo, P , é obtida da mesma forma, seguindo as indicações presentes no RSA [2].
- O fator de redução, c , é apenas aplicável a vidros simples monolíticos para condições diferentes e onde assume valores também eles diferentes.
- A verificação da segurança faz-se de maneira diferente, onde se compara uma espessura total, e_t , ao produto da espessura de cálculo, e_1 , e um fator de equivalência. No caso de vidros simples monolíticos, este produto é multiplicado pelo fator de redução.
- Os fatores de equivalência tomam valores diferentes. Para os tipos de vidro duplo considerados, apenas o valor do fator de equivalência de vidro duplo, ε_1 , é alterado. Na metodologia anterior o fator, ε_1 , é igual a 1,5 [22], diferente do valor atual, igual a 1,6 [20].
- A espessura de cálculo, e_1 , tal como na metodologia mais recente, é calculada através de duas expressões, dependendo da sua relação entre lado maior e lado menor do vidro, L/l . A espessura de cálculo, e_1 , é calculada em função da pressão de cálculo, P , e da área do envidraçado, S , na metodologia mais recente para $L/l \leq 2,5$ [20] e para $L/l \leq 3$ na metodologia mais antiga [22]. Para $L/l > 2,5$ seguindo as indicações do documento mais recente, e para $L/l > 3$ segundo as indicações mais antigas, a espessura de cálculo, e_1 , é calculada em função da pressão de cálculo, P , e da menor dimensão do vidro, l [20] [22].

A verificação mecânica dos vidros duplos, segundo a metodologia precedente efetua-se quando a condição 17 é satisfeita [22].

$$e_t \geq \varepsilon_1 \times e_1 \text{ [mm]} \quad (17)$$

O fator de equivalência, ε_1 , para vidro duplo toma o valor de 1,5, de acordo com as indicações passadas.

Assim, para a metodologia antiga, a condição de verificação mecânica, para os tipos de vidro duplo considerados pode ser escrita da seguinte forma:

$$e_t \geq 1,5 \times e_1 \text{ [mm]} \quad (18)$$

A espessura de cálculo, e_1 , depende, tal como acontece na metodologia contemporânea, da relação entre lado maior e menor do vidro, L/l . A cada tipo de relação entre lado maior e menor, L/l , foi atribuído um número, conforme apresentado no quadro 35, que será daqui em diante usado como elemento

diferenciador entre os tipos de vidro, no que diz respeito ao seu tipo de coeficiente L/l . A espessura de cálculo é obtida segundo as expressões do quadro 35 [22].

Quadro 35 - Espessura de Cálculo, e_1 , segundo Metodologia Anterior (2006) [22]

Espessura de Cálculo, e_1 (2006)			
1	$L/l \leq 3$	$e_1 = \sqrt{\frac{P \times S}{72}} \text{ [mm]}$	(18)
2	$L/l > 3$	$e_1 = \frac{l \times \sqrt{P}}{4,9} \text{ [mm]}$	(19)

As simbologias utilizadas na obtenção da espessura de cálculo são iguais às utilizadas na metodologia atual.

O quadro 36 apresenta as expressões utilizadas no cálculo da espessura total, e_t .

Quadro 36 – Espessura Total, e_t , segundo Metodologia Anterior (2006) [22]

Tipo de Vidro	Espessura total, e_t (2006)	
MM	$e_t = e_i + e_j \text{ [mm]}$	(20)
ML	$e_t = \frac{e_k}{\varepsilon_2} + e_i \text{ [mm]}$	(21)
Nota: $\varepsilon_2 = 1,3$ (vidro laminado de segurança de duas lâminas) [22]		
LL	$e_t = \frac{e_k + e_l}{\varepsilon_2} \text{ [mm]}$	(22)
Nota: $\varepsilon_2 = 1,3$ (vidro laminado de segurança de duas lâminas) [22]		

Nas expressões de cálculo da espessura total, e_t , as simbologias e_i e e_j referem-se a espessuras nominais de vidros monolíticos, e e_k e e_l a espessuras nominais aproximadas de vidros laminados, onde a espessura do PVB é desprezada. Todas as espessuras são expressas em milímetros.

Os fatores de equivalência ε_2 e ε_3 são adimensionais, e os seus valores são explicitados em nota no quadro 36.

Tendo em conta a condição 17 e a informação exposta até aqui acerca da metodologia antiga, é possível apresentar as expressões de verificação da resistência mecânica para os vidros considerados. Elas são reescritas, em forma de equação, de maneira a representar a situação de condição fronteira para a verificação.

Os ábacos posteriormente expostos irão basear-se nestas expressões.

Quadro 37 - Expressões de Verificação da Resistência Mecânica segundo a Metodologia Anterior (2006) [22]

Tipo de Vidro		Baseado no DTU 39 P4 2006	
MM.1	Verificação para $L/l \leq 3$	$e_i + e_j = \sqrt{\frac{P \times S}{72}} \text{ [mm]}$	(23)
MM.2	Verificação para $L/l > 3$	$e_i + e_j = 1,5 \times \frac{l \times \sqrt{P}}{4,9} \text{ [mm]}$	(24)
ML.1	Verificação para $L/l \leq 3$	$\frac{e_k}{1,3} + e_i = 1,5 \times \sqrt{\frac{P \times S}{72}} \text{ [mm]}$	(25)
ML.2	Verificação para $L/l > 3$	$\frac{e_k}{1,3} + e_i = 1,5 \times \frac{l \times \sqrt{P}}{4,9} \text{ [mm]}$	(26)
LL.1	Verificação para $L/l \leq 3$	$\frac{e_k + e_l}{1,3} = 1,5 \times \sqrt{\frac{P \times S}{72}} \text{ [mm]}$	(27)
LL.2	Verificação para $L/l > 3$	$\frac{e_k + e_l}{1,3} = 1,5 \times \frac{l \times \sqrt{P}}{4,9} \text{ [mm]}$	(28)

As simbologias utilizadas são as mesmas daquelas utilizadas no quadro 35 e 36. As expressões já se encontram com os fatores de equivalência convenientemente substituídos.

4.1.5.3. Expressões de Verificação Mecânica segundo a Metodologia Atual

Serão diretamente apresentadas as expressões de condição fronteira para a verificação de resistência mecânica (ver expressão 8) segundo a metodologia contemporânea, atendendo às características dos vidros envolvidos.

As expressões de cálculo da espessura de cálculo, e_l , e espessura resistente, e_R , podem ser revistas novamente nos quadros 27 e 30.

Os fatores de equivalência a serem tomados para os vidros em questão, segundo as mais recentes indicações são [20]:

- $\varepsilon_1 = 1,6$ (vidro duplo);
- $\varepsilon_2 = 1,3$ (vidro laminado de segurança constituído por duas lâminas)
- $\varepsilon_3 = 1$ (vidro recozido).

Quadro 38 - Expressões de Verificação da Resistência Mecânica segundo a Metodologia Atual (2006) [20]

Tipo de Vidro		DTU 39 P4 2012	
MM.1	Verificação para $L/l \leq 2,5$	$\frac{e_i + e_j}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} = \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \text{ [mm]}$	(29)
MM.2	Verificação para $L/l > 2,5$	$\frac{e_i + e_j}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} = \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]}$	(30)
ML.1	Verificação para $L/l \leq 2,5$	$\frac{e_i + \frac{e_k}{0,9 \times \varepsilon_2}}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} \geq \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \text{ [mm]}$	(31)

ML.2	Verificação para $L/l > 2,5$	$\frac{e_i + \frac{e_k}{0,9 \times \varepsilon_2}}{0,9 \times \varepsilon_1 \times MAX(\varepsilon_3)} \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]}$	(32)
LL.1	Verificação para $L/l \leq 2,5$	$\frac{e_i + e_k}{0,9 \times \varepsilon_1 \times MAX(\varepsilon_3)} \geq \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \text{ [mm]}$	(33)
LL.2	Verificação para $L/l > 2,5$	$\frac{e_i + e_k}{0,9 \times \varepsilon_2} \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]}$	(34)

4.1.5.4. Ábacos de Análise Comparativa

Após a descrição de ambas as metodologias fica em evidência que, em ambas as metodologias, para cada tipo de vidro duplo, a sua verificação mecânica é feita segundo duas variáveis diferentes (S [m²] e l [m]), dependendo da sua relação entre lado maior e menor do vidro, L/l .

Uma grande particularidade é o facto de o valor de L/l que determina o uso de uma de duas expressões, ser diferente em cada metodologia. Torna-se assim mais difícil comparar as metodologias, quando para dado domínio de L/l , uma metodologia sugere uma verificação de segurança em função de diferentes variáveis.

Posto isto, decidiu-se limitar a aplicação da análise comparativa a dois domínios de relação entre lado maior e menor do vidro, L/l :

1. Domínio 1: menor ou igual a 2,5 ($L/l \leq 2,5$);
2. Domínio 2: maior a 3 ($L/l > 3$).

Os ábacos são constituídos pelos seguintes elementos:

- Eixo das Ordenadas: área do envidraçado, S ou lado menor do vidro, l , consoante o domínio da relação entre lado maior e lado menor;
- Eixo das Abscissas: pressão de cálculo, P ;
- Duas curvas de condição fronteira de verificação para cada metodologia (2006 e 2012). As expressões foram substituídas por espessuras consideradas medianas para cada tipo de vidro. Na verdade, bastaria substituir por um valor diferente de zero desde que sejam usadas espessuras iguais para cada curva ou expressão.

Os ábacos apresentados não têm qualquer aplicação prática. A informação que se retirará deles será puramente qualitativa.

São apresentados os ábacos para os domínios de relação entre lado maior e menor do vidro, L/l , menor ou igual a 2,5 (domínio 1) e maior do que 3 (domínio 2), para os três tipos de vidro duplo considerados: MM, ML e LL (ver figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18).

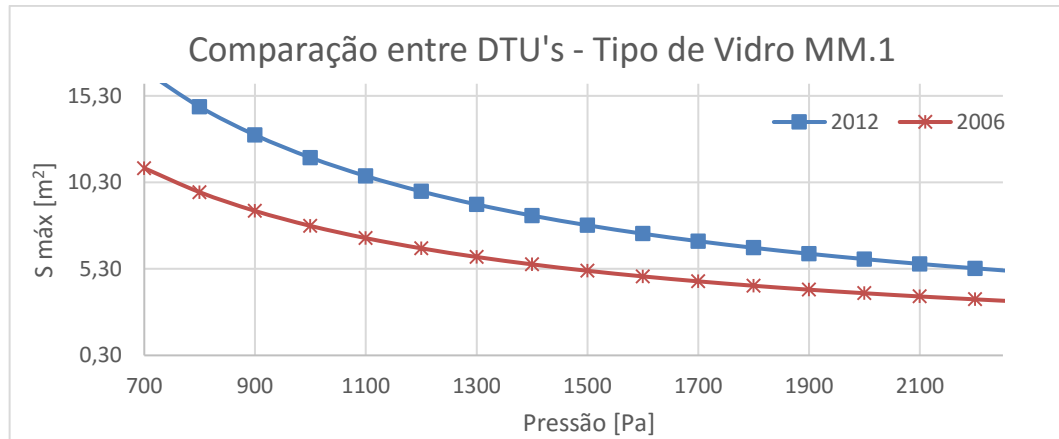


Fig.13 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro MM.1

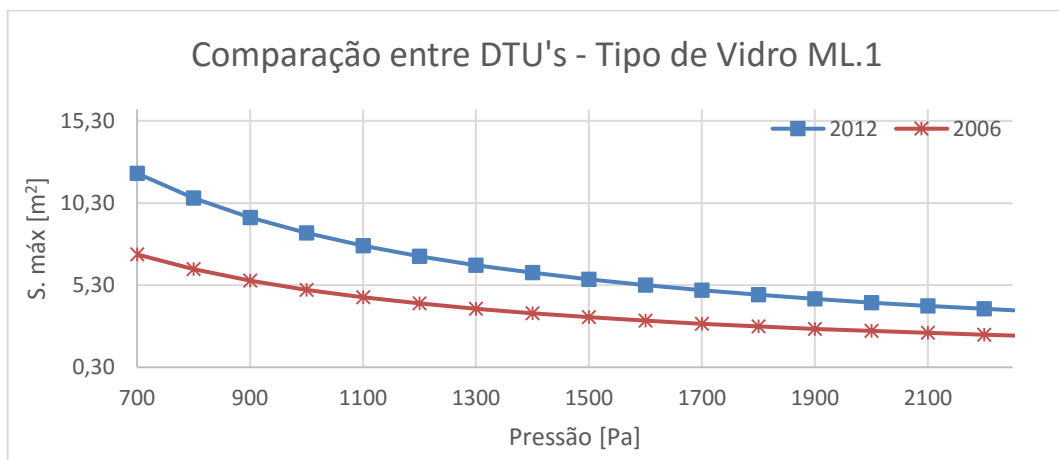


Fig.14 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro ML.1

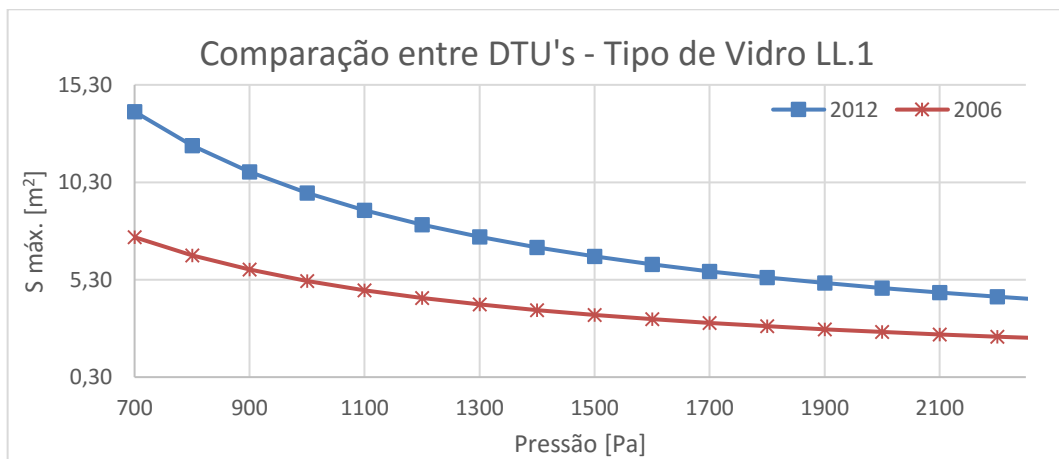


Fig.15 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro LL.1

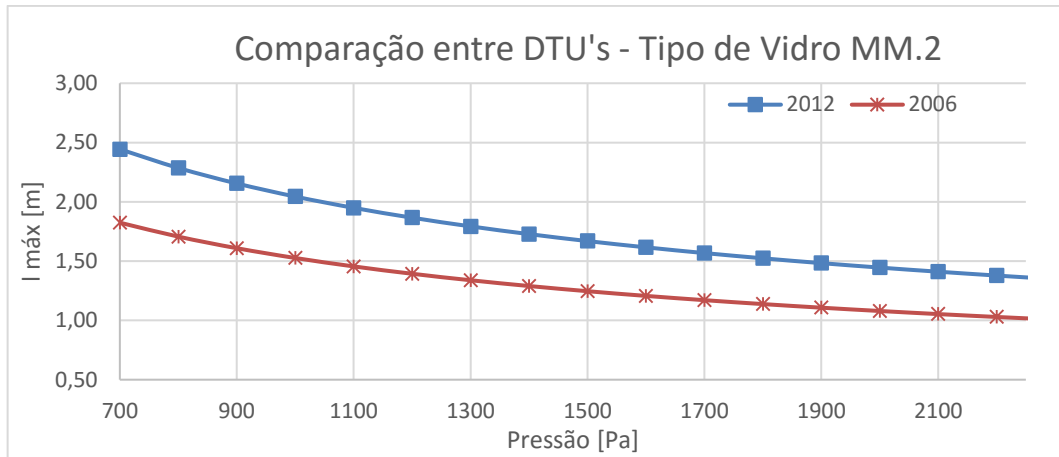


Fig.16 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro MM.2

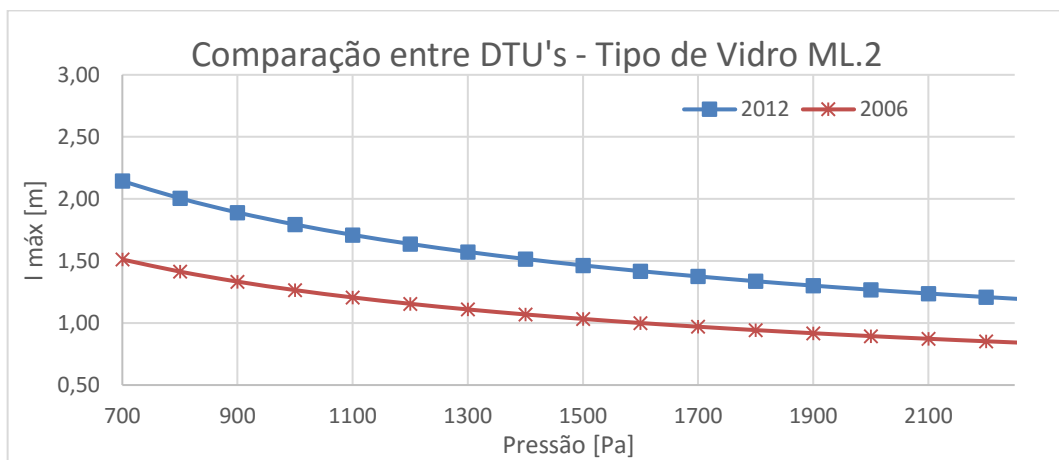


Fig.17 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro ML.2

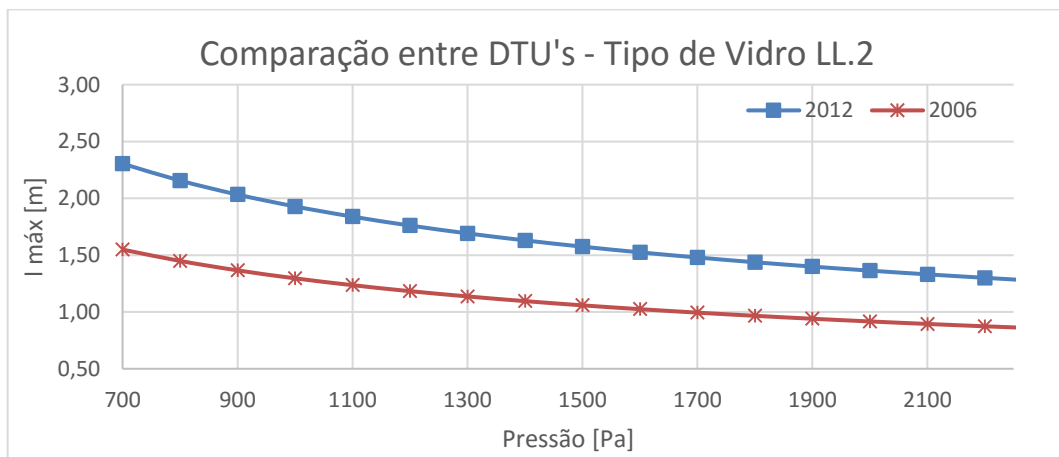


Fig.18 – Ábaco de Análise Comparativa para o Tipo de Vidro LL.2

4.1.5.5. Conclusões

É notório após a observação dos ábacos expostos que a curva azul referente à metodologia atual, aparece sempre “acima” da curva laranja referente à metodologia mais antiga. Quer isto dizer que para as mesmas condições de pressão de cálculo, a metodologia mais antiga define menores dimensões de envidraçado, l , ou menores áreas de envidraçado, S , do que a metodologia atual.

Assim, para o mesmo tipo de vidro, com o mesmo tipo de relação entre maior e menor dimensão do vidro, L/l , a mesma espessura de vidro e a mesma pressão de cálculo, a metodologia mais antiga irá obrigar sempre a menores dimensões de envidraçado, de maneira a serem cumpridas as verificações de segurança.

Desta forma pode concluir-se que para todos os tipos de vidro abordados, nos domínios considerados a metodologia recente evolui no sentido de se tornar menos exigente.

4.2. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DAS AÇÕES TÉRMICAS

4.2.1. CHOQUE TÉRMICO

O dimensionamento térmico tem como objetivo a definição das características de um envidraçado para o qual a quebra por choque térmico seja evitada.

A rotura do vidro por choque térmico deve-se a tensões originadas por diferenças de temperatura e consequentes diferentes dilatações térmicas de uma zona quente e de uma zona fria do vidro. Estas diferentes dilatações induzem tensões de tração no interior da massa do vidro, que se suficientemente fortes, causam a quebra do vidro. [3].

As seguintes situações descritas representam situações que aumentam podem provocar altas diferenças de temperatura no vidro, e consequentemente, aumentar o risco de quebra por choque térmico [3]:

- Colocação de motivos de cor escura em algumas zonas do vidro;
- O envidraçado em questão apresentar uma elevada absorção energética, como é o caso do vidro recozido colorido na massa;
- Existência de sombras parciais, ou tratar-se de um envidraçado num vão reentrante;
- Presença de sistemas de aquecimento próximo do envidraçado;
- A colocação do envidraçado numa zona não ventilada interiormente.

Considera-se que para a ocorrência de quebra por choque térmico, os envidraçados verticais mais suscetíveis à ocorrência de choque térmico assumem as orientações presentes na zona sombreada da figura 19 [3].

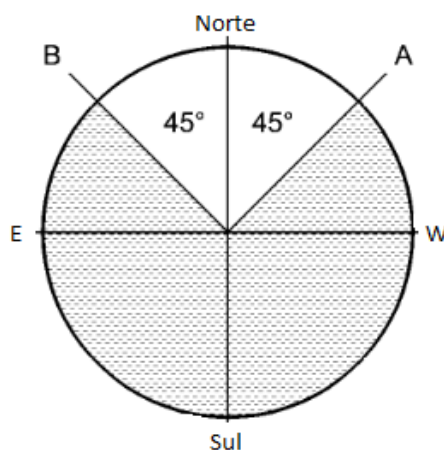


Fig.19 – Orientações de Envidraçamento mais Suscetíveis à Quebra por Choque Térmico (zona sombreada)

O domínio da metodologia encontra-se limitado a:

- Regime permanente e por consequência caixilhos de inércia térmica fraca;
- Condições de Verão e de Inverno;
- Vidros duplos planos verticais perifericamente apoiados;
- Não aplicável a janelas de correr e de guilhotina, a envidraçados com estore ou a envidraçados situados em frente a paredes opacas;
- Portugal Continental;
- Orientações Sul, Este e Oeste (vidros a Norte não necessitam de dimensionamento – figura 19)

4.2.2. MÉTODO DE CÁLCULO

4.2.2.1 Introdução

Para o dimensionamento térmico será seguida a norma francesa DTU 39 P3 [23]. Neste documento estão explícitos diferentes métodos de cálculo e mais concretamente dois diferentes regimes de método: o método em regime variável (Método Geral) e os métodos em regime permanente. Este texto seguirá uma metodologia em regime permanente. De forma mais concreta a metodologia adotada seguirá o Método Manual definido no DTU 39 P3 [23] e o ITE 52 [3] que enquadra essas indicações ao contexto climático nacional.

O Método Manual está limitado a caixilhos de inércia térmica fraca. Por simplificação e por não se considerar próxima do domínio da aplicação, admite-se neste texto a aplicação a caixilhos de inércia térmica média. Neste tipo de caixilhos, os resultados encontrados devem ser interpretados com cautela e utilizados apenas em estudos preliminares. Os caixilhos de inércia térmica forte, muito incomuns na construção portuguesa, estão fora do domínio da aplicação. [1]

4.2.2.2. Definição de Zonas do Vidro

No método utilizado são definidas três zonas do vidro (ver figura 20) [3].

- Zona 1: parte inserida na gola, constantemente á sombra;
- Zona 2: parte central exposta ao sol;
- Zona 3: parte central á sombra.

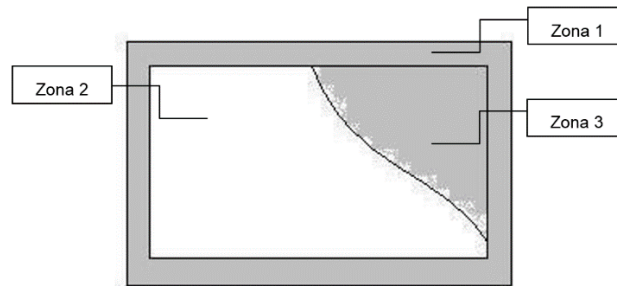


Fig.20 – Zonas do Vidro

4.2.3. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

4.2.3.1. Introdução

Serão definidos neste subcapítulo os dados climáticos a usar no dimensionamento. Esses dados são referentes à quantificação da radiação solar máxima e difusa e das temperaturas exteriores de projeto máximas e mínimas. São também quantificados valores a assumir para a temperatura interior dos edifícios.

O dimensionamento térmico apenas será feito para condições de Verão e de Inverno. Os dados climáticos expostos de seguida são aplicáveis apenas a Portugal continental.

4.2.3.2. Temperatura do ar interior, θ_{ai}

A temperatura ambiente interior dos edifícios (θ_{ai}) é considerada constante, assume o valor de 25°C no Verão e 20°C no Inverno [3].

4.2.3.3. Temperatura do ar exterior

Para Portugal continental são definidas as zonas climáticas de Inverno, I1, I2 e I3 (ver figura 21) e as de Verão, V1, V2 e V3. [3]

Neste trabalho será apenas considerada uma zona climática de Verão, correspondente a todo o território. Foi considerado que para o Verão é razoável admitir semelhança de temperaturas em todo país [1].

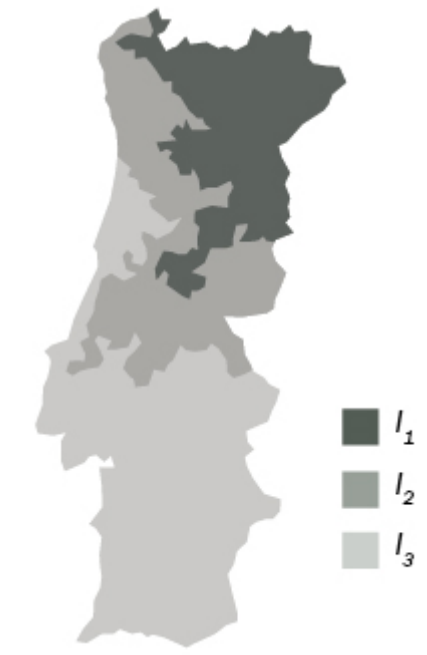


Fig.21 – Zonas Climáticas de Inverno

Sendo este um método em regime permanente, serão apenas usados valores extremos, mais explicitamente, os valores da temperatura máxima exterior ($\theta_{ae\max}$) e temperatura exterior mínima ($\theta_{ae\min}$) não só para a estação de Inverno dependendo das suas três zonas climáticas, mas também para a estação do Verão. Os valores adotados são sugeridos pelo documento nacional ITE 52 [3] e são apresentados com a respetiva amplitude térmica diária no quadro 39.

Quadro 39 – Temperatura exterior máxima e mínima no Inverno e no Verão e Amplitude Térmica Diária [3]

	I1 e I2	I3	Verão
$\theta_{ae\max}$	10	0	45
$\theta_{ae\min}$	-5	-15	25
Amplitude Diária	15	15	20

4.2.3.4. Radiação Solar

São apresentados no quadro 40 para ambas as estações de Verão e de Inverno, os valores que quantificam a radiação solar máxima incidente no envidraçado, θ_{max} (expressa em W/m^2) dependendo da sua orientação, bem como os valores a considerar para a radiação difusa, θ_{dif} (expressa em W/m^2).

Os valores da radiação solar máxima incidente, θ_{max} , expostos no quadro 40, são sugeridos pelo ITE 52 [3]. No entanto, para valores da radiação difusa foram tomados valores diferentes a esse documento. Foi seguida uma indicação do DTU 39 P3 [23], que aconselha a adoção de um valor da radiação difusa para cada estação, equivalente a 10% da radiação máxima incidente (θ_{max}) dessa mesma estação. Estes valores apenas são válidos para vidros verticais.

Os valores de radiação solar difusa são usados no cálculo da temperatura do vidro, na zona 3 (zona à sombra). Os valores de radiação solar expostos no quadro 40, dependendo da orientação do envidraçado, e são usados no cálculo da temperatura da zona 2 do vidro (zona exposta ao sol).

Quadro 40 – Radiação solar máxima incidente, θ_{max} , e difusa, θ_{dif} em W/m^2 [3] (adaptação)

Orientação do Envidraçado	Inverno	Verão
NE	100	588
E	552	729
SE	837	576
S	881	401
SW	837	576
W	552	729
NW	100	588
Radiação Difusa (não depende da orientação)	$881 \times 0,1 \approx 88$	$729 \times 0,1 \approx 73$

4.2.4. CÁLCULO DAS TEMPERATURAS DO VIDRO

4.2.4.1 Temperatura na zona 1

A temperatura na zona 1 do vidro (zona da gola), (θ_1), é calculada pela expressão 35 [23]:

$$\theta_1 = \frac{h_i \times \theta_{ai} + h_e \times \theta_{ae}}{h_i + h_e} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (35)$$

As condutâncias superficiais interior e exterior expressas em $W/(m^2 \cdot ^\circ\text{C})$, são representadas por h_i e h_e . As siglas θ_{ae} e θ_{ai} traduzem as temperaturas do ar exterior e interior, em $^\circ\text{C}$.

Os valores para as condutâncias superficiais utilizadas no cálculo das temperaturas do vidro foram extraídos do DTU 39 P3 [23]. Desta forma, os valores considerados serão diferentes daqueles considerados a nível nacional, presentes no REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação) [24].

Para o valor de h_e , foi considerada a situação de ausência de vento, mais favorável à ocorrência de quebra por choque térmico. Os valores das condutâncias exteriores são apresentados no quadro 41.

Quadro 41 – Condutâncias Superficiais (expressas em $W/(m^2 \cdot ^\circ\text{C})$)

h_i	h_e (Inverno)	h_e (Verão)
9	11	13

Para condições de Inverno, a temperatura do ar exterior, θ_{ae} , assume o valor da temperatura ambiente exterior mínima ($\theta_{ae\min}$), que depende da zona climática de Inverno. Para condições de Verão, θ_{ae} assume o valor da temperatura ambiente exterior máxima ($\theta_{ae\max}$) [23].

4.2.4.2. Temperatura na zona 2

As expressões de cálculo para o cálculo das temperaturas na zona 2 em vidro duplo, são apresentadas respetivamente para o vidro exterior, (36) e vidro interior (37) [23].

$$\theta_{2\ ext} = \frac{ht \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi) + (hi + ht) \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi)}{(hi + ht) \times (he + ht) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (36)$$

$$\theta_{2\ int} = \frac{ht \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi) + (he + ht) \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi)}{(h_i + h_t) \times (h_e + h_t) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (37)$$

O quadro 43 identifica os parâmetros envolvidos nas expressões de cálculo da temperatura da zona 2. Para cada parâmetro é especificado qual o valor que toma no cálculo da temperatura da zona 2, tanto para as condições de Verão, como de Inverno. Quando para algum parâmetro, não é possível especificar o seu valor, é feito um pequeno comentário sobre de que forma o parâmetro varia.

O coeficiente de transmissão térmica do vidro ht , calculado segundo a norma francesa, é obtido pela expressão 38. A simbologia he e hi representa as condutâncias superficiais exterior e interior respetivamente [23].

A simbologia utilizada (ht), corresponde à notação presente na norma francesa. Transpondo para o caso nacional, a simbologia ht é recíproco da simbologia U .

$$ht = \frac{1}{R_1} \quad [W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)] \quad (38)$$

Para o cálculo de ht , é preciso antecipadamente efetuar o cálculo do coeficiente R_1 (resistência térmica efetiva do vidro). Ele é feito de acordo com a estação em que esteja a ser efetuada a verificação, segundo as expressões 39 e 40. Em ambas condições, também este parâmetro (R_1) necessita do cálculo prévio de um outro coeficiente, R_0 . O valor de R_0 (resistência térmica do vão) é calculado segundo a expressão 41, sendo o coeficiente U_g o valor do coeficiente de transmissão térmica do vão, expresso em $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ [23].

Quadro 42 – Expressões para o cálculo de R_1

Resistência Térmica Efetiva do Vidro, R_1	
Inverno	$R_1 = 0,92 \times R_0 \quad [(m^2 \cdot ^{\circ}C)/W] \quad (39)$
Verão	$R_1 = 0,78 \times R_0 \quad [(m^2 \cdot ^{\circ}C)/W] \quad (40)$

$$R_0 = \frac{1}{U_g} - 0,17 \text{ [(m}^2\cdot\text{°C/W)}] \quad (41)$$

Em resumo, o cálculo das temperaturas da zona 2 pode seguir os seguintes passos:

1. Cálculo de R_0 , em função de U_g (expressão 41);
2. Cálculo de R_1 , para ambas estações (expressões 39 e 40);
3. Cálculo de ht , para ambas estações em função de R_1 respetivo (expressão 38);
4. Cálculo de temperatura de vidro exterior $\theta_{2\text{ ext}}$, para ambas as estações (expressão 36).
5. Cálculo de temperatura de vidro interior $\theta_{2\text{ int}}$, para ambas as estações (expressão 37).

Os parâmetros a serem usados no cálculo das temperaturas do vidro na zona 2 para ambas as estações (passos 4 e 5) são explicitados no quadro 43 juntamente com alguns comentários.

Quadro 43 – Parâmetros intervenientes no cálculo da Temperatura na zona 2

Parâmetro	Inverno	Verão	Comentário
Coeficiente de transmissão térmica do vidro. $ht \text{ (W/m}^2\cdot\text{°C)} [23]$	$(1 / R_1) \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow (1 / (0,92 \times R_0)).$	$(1 / R_1) \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow (1 / (0,78 \times R_0)).$	Depende primeiramente de R_0 , que por sua vez depende do U_g (vão). Cálculo de R_1 diferente para cada estação.
Condutância Superficial Interior. $hi \text{ (W/m}^2\cdot\text{°C)} [23]$	9	9	Constante. Toma sempre o mesmo valor.
Condutância Superficial Exterior. $hi \text{ (W/m}^2\cdot\text{°C)} [23]$	11	13	Constante. Toma valores diferentes para cada estação.
Temperatura do ar interior. $\theta_{ai} \text{ (°C)} [3]$	20	25	Constante. Toma valores diferentes para cada estação.
Fluxo Solar Incidente, φ , (W/m^2) . [3]	Radiação solar máxima incidente, θ_{max} , para condições de Inverno.	Radiação solar máxima incidente, θ_{max} , para condições de Verão.	Depende da orientação do envidraçado. Diferente para cada estação

Temperatura do ar Exterior. θ_{ae} (°C) [3]	$\theta_{ae}min_corrigida$. Depende da zona de Inverno. Para I1 ou I2: $(\theta_{ae}min)+5=(-5)+5=0$. Para I3: $(\theta_{ae}min)+5=(-15)+5=-10$.	$\theta_{ae}max = 45$	Para condições de Verão toma o valor constante de $\theta_{ae}max$. Valor constante, Para condições de Inverno toma o valor de $\theta_{ae}min_corrigida$.
Absorções energéticas dos vidros. A_{1e} e A_{2e} . (%)	-	-	Características do envidraçado.

De realçar que nas **zonas 2 e 3 do vidro a temperatura mínima exterior, utilizada nos cálculos para condições de Inverno deverá ser elevada de 5°C** para ter em conta um aumento da temperatura exterior por causa da radiação. Esta correção conduz à temperatura ambiente exterior mínima corrigida, $\theta_{ae}min_corrigida$ [23].

Para verificação das condições de Inverno na zona 2, θ_{ae} deverá assumir o valor da temperatura ambiente exterior mínima corrigida ($\theta_{ae}min_corrigida$) e para as de Verão o valor da temperatura ambiente exterior máxima ($\theta_{ae}max$).

Nesta zona do vidro (zona 2) é considerado o valor máximo da radiação solar incidente em regime permanente (θ_{max}) que varia conforme a orientação do envidraçado e a estação à qual são características as condições a verificar. [23].

O cálculo da temperatura da zona 2 faz-se para os dois painéis que compõem o vidro duplo e para cada estação. Assim na ocasião do dimensionamento térmico, são calculadas um total de quatro temperaturas para a zona 2.

4.2.4.3. Temperatura na zona 3

As expressões de cálculo para esta zona do vidro são as mesmas que se utilizaram para a zona 2, referidas no ponto 4.2.3.2. (expressões de 36 a 41). Pela expressão 36 calcula-se o valor de θ_{3ext} e pela expressão 37 o valor de θ_{3int} .

O quadro 44 identifica os vários parâmetros envolvidos no cálculo das temperaturas dos vidros na zona 3, e especifica quais os valores que tomam para condições de Verão ou Inverno, da mesma forma que o quadro 43 o faz para as temperaturas da zona 2. Os valores de ht , a usar no cálculo da temperatura da zona 3 nas duas condições, são os mesmos que forma usados no cálculo de temperaturas da zona 2.

O único parâmetro cujo valor se altera é o do fluxo solar incidente, φ . No cálculo da temperatura da zona 3, os valores a tomar são os valores relativos à radiação difusa, θ_{dif} (ver 4.2.3.4.).

Da mesma forma que acontece para a zona 2, o cálculo para condições de Inverno pressupõe que θ_{ae} assumo o valor da temperatura ambiente exterior mínima corrigida, $\theta_{ae}min_corrigida$. Para condições de Verão, θ_{ae} é substituído pelo valor da temperatura ambiente exterior máxima $\theta_{ae}max$ [23].

Os parâmetros a serem usados no cálculo das temperaturas do vidro na zona 3 para ambas as estações são explicitados no quadro 44 juntamente com alguns comentários.

Quadro 44 – Parâmetros intervenientes no cálculo da Temperatura na zona 3

Parâmetro	Inverno	Verão	Comentário
Coeficiente de transmissão térmica considerado. ht ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [23]	$(1 / R_1) \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow (1 / (0,92 \times R_0)).$	$(1 / R_1) \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow (1 / (0,78 \times R_0)).$	Depende primeiramente de R_0 , que por sua vez depende do U_g (envidraçado). Cálculo de R_1 diferente para cada estação.
Condutância Superficial Interior. hi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [23]	9	9	Constante. Toma sempre o mesmo valor.
Condutância Superficial Exterior. hi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [23]	11	13	Constante. Toma valores diferentes para cada estação.
Temperatura do ar interior. θ_{ai} ($^\circ C$) [3]	20	25	Constante. Toma valores diferentes para cada estação.
Fluxo Solar Incidente, φ , (W/m^2). [3]	Radiação difusa Inverno. $\theta_{dif} = 88$	Radiação difusa Verão. $\theta_{dif} = 73$	Valores constantes, diferentes para cada estação.
Temperatura do ar Exterior. θ_{ae} ($^\circ C$) [3]	$\theta_{ae} \text{ min_corrigida}$. Depende da zona climática de Inverno. <ul style="list-style-type: none"> Para I1 OU I2: $(\theta_{ae} \text{ min})+5=(-5)+5=0.$ Para I3: $(\theta_{ae} \text{ min})+5=(-15)+5=-10.$ 	$\theta_{ae} \text{ max} = 45$	Para condições de Verão toma o valor constante de $\theta_{ae} \text{ max}$. Valor constante, Para condições de Inverno toma o valor de $\theta_{ae} \text{ min corrigida}$.
Absorções energéticas dos vidros. A_{1e} e A_{2e} . (%)	-	-	Característico do envidraçado.

4.2.5. EXIGÊNCIAS E CRITÉRIOS

4.2.5.1. Introdução

O DTU 39 P3 permite executar o dimensionamento térmico analisando:

- A tensão do vidro;
- A diferença de temperatura admissível;
- A absorção máxima admissível.

A análise baseada nas tensões do vidro, como se verá mais à frente, contém os mesmos pressupostos da análise baseada nas diferenças de temperatura.

O modelo trabalhado anteriormente por *Maria Francisca Cavaleiro* [1], assenta num dimensionamento baseado na análise da diferença de temperatura admissível no vidro. Apenas este tipo de verificação será abordado neste texto.

Neste tipo de verificação, são comparados os valores de $\delta\theta$ e $\delta\theta_{adm}$. A diferença de temperatura efetiva para dadas condições do envidraçado é representado por $\delta\theta$, enquanto $\delta\theta_{adm}$ representa a diferença de temperatura máxima admissível, para a qual o envidraçado não sofre quebra por choque térmico. A condição para a qual não existe risco de quebra por choque térmico é dada pela expressão 42 [23].

$$\delta\theta \leq \delta\theta_{adm} [^{\circ}C] \quad (42)$$

4.2.5.2. Diferença de Temperatura Máxima Admissível, $\delta\theta_{adm}$

A diferença de temperatura máxima admissível entre duas zonas do mesmo vidro, $\delta\theta_{adm}$, naturalmente, irá originar uma tensão de origem térmica máxima admissível, σ_{adm} . Elas se encontram relacionadas através da expressão 43 [23].

$$\delta\theta_{adm} = \frac{\sigma_{adm}}{k_t \times E \times \alpha} [^{\circ}C] \quad (43)$$

O valor da tensão máxima admissível, σ_{adm} é expresso em *MPa*. O valor da diferença de temperatura, $\delta\theta_{adm}$, é manifestado em $^{\circ}C$. O módulo de Young, E , é expresso em *GPa*. Para o módulo de Young, é lembrado que o valor adotado referente ao vidro é de *72 GPa*. O valor do coeficiente de dilatação térmica adotado neste texto corresponde a $9 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$. O coeficiente k_t que será abordado posteriormente é adimensional [23].

A tensão térmica máxima admissível, σ_{adm} , é relacionada com a tensão de trabalho do vidro, σ_{vm} através da expressão 44 [23].

$$\sigma_{adm} = k_v \times k_a \times \sigma_{vm} [MPa] \quad (44)$$

Os coeficientes k_v e k_a que serão abordados mais adiante são ambos adimensionais. As tensões σ_{vm} e σ_{adm} são expressas em *MPa*.

Partindo das expressões 43 e 44, referentes à diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, e tensão máxima admissível, σ_{adm} , é possível obter a expressão 45 [23].

$$\delta\theta_{adm} = \frac{\sigma_{adm}}{k_t \times E \times \alpha} = \frac{k_v \times k_a \times \sigma_{vm}}{k_t \times E \times \alpha} = \frac{k_v \times \sigma_{vm}}{k_t \times 72 \times 10^9 \times 9 \times 10^{-6}} = \frac{k_v \times \sigma_{vm}}{k_t \times 6,48 \times 10^5} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (45)$$

A nomenclatura e as unidades de cada parâmetro são as mesmas das equações 43 e 44.

4.2.5.3. Parâmetros utilizados no cálculo da diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$

Os parâmetros utilizados no cálculo da diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, são a tensão de trabalho do vidro, σ_{vm} , e os coeficientes k_t , k_v e k_a .

Os valores para cada tipo de vidro e sua respectiva tensão de trabalho do vidro, σ_{vm} são apresentados no quadro 45 [23].

Quadro 45 – Tensão de Trabalho de vidro, σ_{vm} [23]

Tipo de Vidro	σ_{vm} [MPa]
Recozido	20
Aramado	16
Termo-Endurecido	35
Temperado termicamente	50
Esmaltado temperado	35
Impresso recozido	18
Impresso temperado	40
Impresso esmaltado temperado	30
Impresso aramado	16

O coeficiente k_t é influenciado pelo tipo de inércia térmica e posição do caixilho na fachada (vão reentrante ou á face do edifício). O domínio da metodologia apenas contempla os tipos de inércia térmica fraca e média, pelo que o tipo de inércia térmica forte não é abordado. Os valores que k_t pode assumir são apresentados no quadro 46.

Quadro 46 – Coeficiente k_t [23]

	Inércia Térmica Fraca	Inércia Térmica Média
Vão reentrante	0,90	1,00
Vão á face do edifício	0,80	0,95

Em caso de dúvida em relação à posição do caixilho na fachada é recomendado optar-se por o vão reentrante, por ser a opção mais desfavorável.

Os tipos de vidro mais utilizados em edifícios são os vidros monolíticos e os vidros laminados, não sendo dada grande relevância neste trabalho aos vidros aramados. Para o modo de acabamento das arestas dos vidros faz-se a distinção entre bordos em bruto e bordos polidos, uma vez que os bordos polidos conduzem a uma maior tensão admissível e melhoram a resistência do vidro.

O coeficiente adimensional k_v , depende do tipo de vidro e do modo de acabamento das arestas. Para o modo de acabamento das arestas dos vidros faz-se a distinção entre bordos em bruto e bordos polidos. Os valores de k_v possíveis de assumir são demonstrados no quadro 47 [23].

Quadro 47 – Coeficiente k_v [23]

			Bordo em bruto	Bordo Polido
Vidro Monolítico			1,00	1,20
Vidro Laminado	Fabricado com medida fixa e simétrica	Um dos vidros e \leq 3 mm	1,00	1,20
		Cada vidro e \geq 3 mm	0,75	1,00
Vidro Laminado	Fabricado com medida fixa e não simétrica		0,75	1,00
Vidro Laminado	Cortado simétrico		0,75	-
Vidro Laminado	Cortado não simétrico		0,7	-
Vidro aramado			0,8	-

O coeficiente k_a é dependente da inclinação do vidro e das suas condições do vidro. Neste texto apenas são abordados envidraçados verticais apoiados em toda sua periferia, pelo que nesta metodologia o valor de k_a assumirá sempre o valor de 1.

4.2.5.4. Diferença de Temperatura Efetiva, $\delta\theta$

Para o cálculo da diferença de temperatura efetiva no vidro, recorre-se ao cálculo das temperaturas das diferentes zonas de vidro explicitadas anteriormente em 4.2.3. A diferença de temperatura a considerar para o dimensionamento é a máxima das diferenças entre os valores de temperatura na zona 1, zona 2 e zona 3, e é chamada de diferença de temperatura máxima ($\delta\theta$) [23].

Será suficiente o cálculo apenas das diferenças de temperatura entre as zonas 2 e 1 e entre as zonas 2 e 3 pois as diferenças de temperatura entre as zonas 3 e 1, que correspondem às zonas de menor temperatura nunca serão superiores às diferenças de temperatura entre as zonas 2 e 1 e entre 2 e 3. A figura 20 relembra quais as zonas do vidro estão a ser referidas.

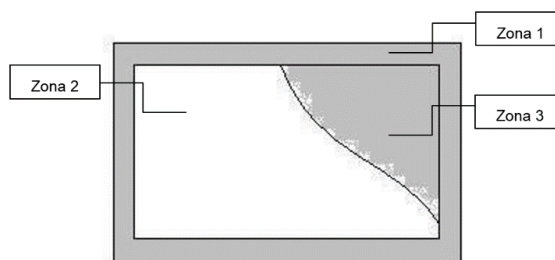


Fig.20 – Zonas do Vidro

Salienta-se também o facto de as diferenças de temperatura serem calculadas entre dois pontos do mesmo painel de vidro, pois as diferenças de temperatura entre pontos de painéis de vidros distintos (por exemplo no caso de vidros duplos) não têm qualquer significado [23].

É apresentado no quadro 48 o raciocínio relativo ao cálculo da diferença de temperatura efetiva em vidros duplos (foco do domínio). Este raciocínio deve ser feito para o Verão e para o Inverno, para que seja validada a adequabilidade do vidro durante todo o ano climático [1].

Quadro 48 – Raciocínio para Cálculos da Diferença de Temperatura em Vidro Duplo

	Vidro Exterior	Vidro Interior
Zona 1 – Gola	θ_1	θ_1
Zona 2 – Vidro ao sol	$\theta_{2\ ext}$	$\theta_{2\ int}$
Zona 3 – Vidro à sombra	$\theta_{3\ ext}$	$\theta_{3\ ext}$
Diferenças de Temperatura	$(\theta_{2\ ext} - \theta_{3\ ext}), (\theta_{2\ ext} - \theta_1)$	$(\theta_{2\ int} - \theta_{3\ int}), (\theta_{2\ int} - \theta_1)$

Das quatro diferenças de temperatura que resultam do quadro 48 sairá uma, a maior, que é chamada de $\delta\theta$. Este raciocínio deve ser feito para as condições de Inverno e para as de Verão e, por essa razão, o modelo considera dois valores de $\delta\theta$: o $\delta\theta\ INVERNO$ e o $\delta\theta\ VERÃO$.

Posteriormente, no capítulo 6, será apresentada uma aplicação prática desta mesma metodologia.

5

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será trabalhada a metodologia de dimensionamento mecânico presente em 4.1 baseada na norma francesa mais recente, o DTU 39 P4 de 2012 [20]. Este dimensionamento mecânico, mais não é do que a definição de uma espessura de vidro, resistente às solicitações causadas pela ação do vento.

Na prática, quando pretendemos dimensionar a espessura de um vão envidraçado, todos os parâmetros averiguados anteriormente podem ser traduzidos apenas à conta de três variáveis:

- Altura do envidraçado, localização e características do edifício traduzidas pela pressão de cálculo, P [Pa];
- Dimensões do Envidraçado, l e L [m];
- Tipo de Vidro.

Tendo em conta estas variáveis, considera-se, que na prática, ao iniciar o processo de dimensionamento, surgem quatro tipos de problemas (variáveis desconhecidas):

- a) Qual o tipo de vidro a utilizar? As dimensões do envidraçado e a pressão de cálculo já se encontram definidas. A espessura depende do tipo de vidro a utilizar.
- b) Qual a espessura a adotar? As dimensões do envidraçado, a pressão de cálculo e o tipo de vidro já estão definidos.
- c) Qual a pressão de cálculo máxima a que o vão envidraçado está preparado para resistir? As dimensões do envidraçado, o tipo de vidro e a espessura já estão definidas.
- d) Quais as dimensões possíveis do envidraçado, face a dada pressão de cálculo com o tipo de vidro e espessura já definidas?

Na tentativa de simplificar todos estes tipos de problemas, serão apresentados alguns ábacos de pré-dimensionamento para três tipos de vidro duplo. Estes ábacos relacionam as variáveis mencionadas anteriormente entre elas, permitindo chegar facilmente a uma solução aproximada ao problema, seja ele do tipo a), b), c) ou d).

Após o pré-dimensionamento será necessário efetuar a verificação da solução encontrada. Para esse efeito, desenvolveu-se um livro de cálculo denominado “Dimensionamento Mecânico 2016”. Este

livro de cálculo, elaborado com base no *Microsoft Excel 2016*, possui um guia de utilização bem como um exemplo de aplicação, expostos ainda neste capítulo.

É possível contornar a etapa de pré-dimensionamento, passando diretamente para a verificação segundo o livro de cálculo, através de um método de tentativa e erro.

O processo de dimensionamento mecânico exposto neste subcapítulo introdutório é sintetizado no esquema da figura 22.

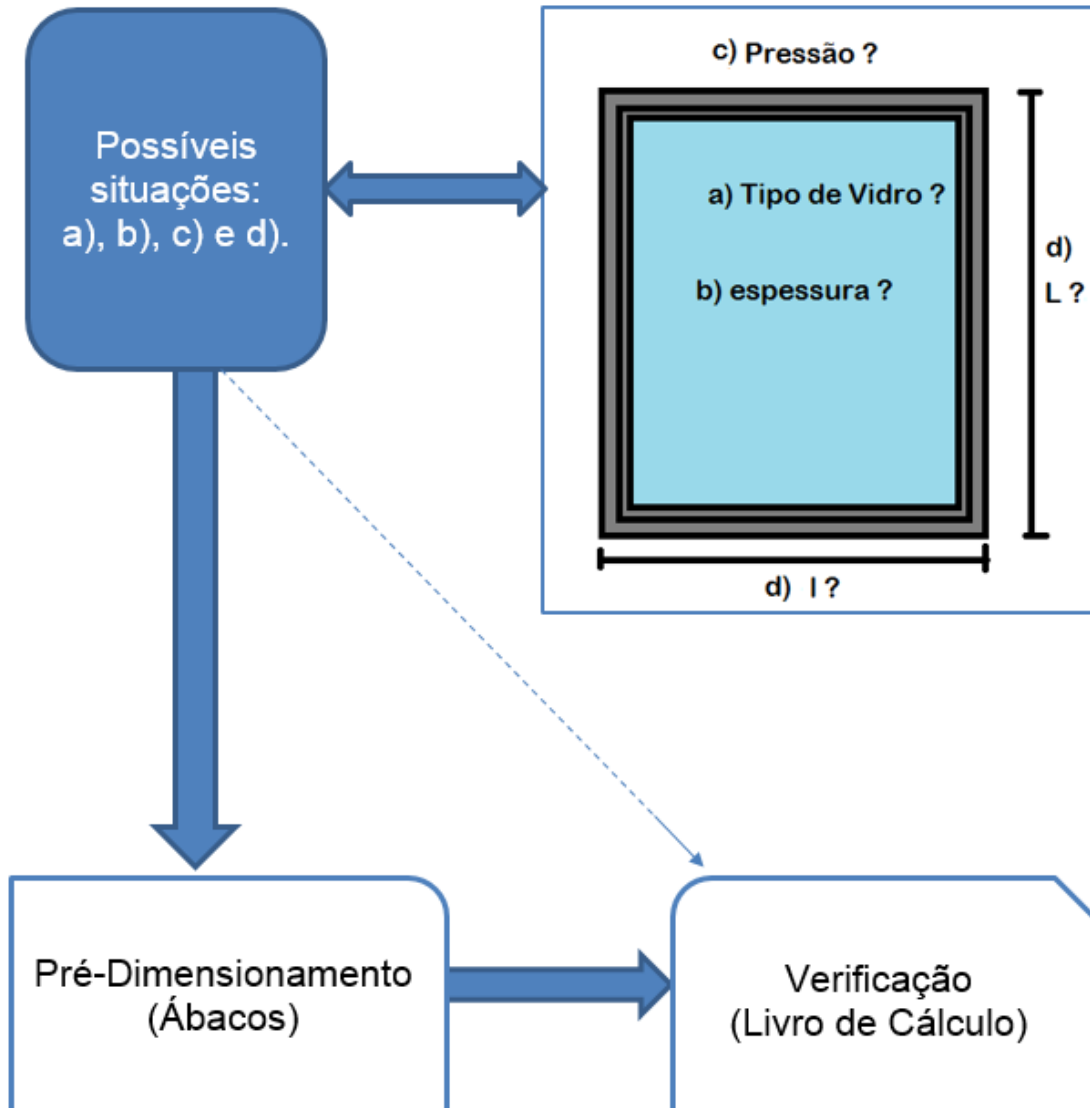


Fig.22 – Processo de Dimensionamento Mecânico

5.2 ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

5.2.1 INTRODUÇÃO

Neste subcapítulo, são apresentados ábacos de pré-dimensionamento, bem como as expressões que os fundamentam, para três tipos de vidro duplo e dois tipos de vidro simples:

- Vidro duplo constituído por dois vidros monolíticos recozidos (MM).

- Vidro duplo constituído por um vidro monolítico recozido e um vidro laminado de segurança de duas lâminas recozidas (ML).
- Vidro duplo constituído por dois vidros laminados de segurança de duas lâminas recozidas (LL).
- Vidro simples monolítico (M).
- Vidro simples laminado de segurança com duas lâminas recozidas (L).

Cada tipo de vidro considerado apresenta dois ábacos, um para cada tipo de relação de lado menor e lado maior do envidraçado, onde para cada tipo de relação de lados são relacionados diferentes parâmetros:

1. $L/l \leq 2,5$ (forma mais “quadrada”). Este tipo de ábaco relaciona para as várias configurações de espessura, uma pressão de cálculo, P , com a área de envidraçado máxima, $S_{máx}$ (m²).
2. $L/l > 2,5$ (forma mais “retangular”). Este tipo de ábaco relaciona para as várias configurações de espessura, uma pressão de cálculo, P , com a menor dimensão do envidraçado máxima, $l_{máx}$ (m).

Nesta aplicação considera-se que a menor dimensão do vidro, l , varia entre 30 centímetros e 3 metros de comprimento. Já a maior dimensão do vidro, L , terá um comprimento máximo de 5 metros. Por consequência, a área máxima de envidraçado considerada é de 15 metros quadrados.

Foram considerados valores de pressão a variar entre 700 Pa e 2200 Pa. O valor de 700 Pa representa aproximadamente o valor mínimo de pressão de cálculo que se obtém segundo o RSA [2]. O valor de 2200 Pa corresponde a aproximadamente o valor máximo de pressão para alturas de envidraçado, h' , inferiores a 30 metros. Foi considerado como valor máximo de pressão de cálculo nestes ábacos dado que edifícios com alturas superiores a 30 metros são algo raros em Portugal [1].

O eixo das ordenadas do ábaco é reservado à variável da área de envidraçado máxima, $S_{máx}$, para ábacos do tipo $L/l \leq 2,5$. No caso de ábacos do tipo $L/l > 2,5$, a variável presente neste eixo é a menor dimensão máxima, $l_{máx}$. O eixo das abscissas é reservado à pressão de cálculo, P , para ambos os tipos de ábacos.

As diferentes espessuras do envidraçado são representadas por curvas. Cada curva representa, consoante o tipo de ábaco, as relações entre a pressão e a respetiva área de envidraçado máxima, ou a pressão e a respetiva menor dimensão máxima do envidraçado, de dada espessura.

As espessuras utilizadas na elaboração dos ábacos são espessuras mínimas de fabricação como definido em 4.1.3.3, de forma a tornar o dimensionamento ainda mais exigente. Assim não foram seguidas as indicações do DTU 39 P4 de 2012 [20] que indicam a utilização de espessuras nominais.

Note-se que os ábacos apresentados de seguida foram realizados tendo em conta envidraçados constituídos por vidro recozido. Em boa verdade, eles podem não ser apenas aplicados a envidraçados deste tipo, mas também a qualquer vidro duplo que contenha apenas um vidro monolítico recozido, na qual o outro constituinte não seja estirado, impresso, impresso aramado e recozido aramado. Ou seja, para vidros que contenham um constituinte de outro tipo de vidro que não os explicitados anteriormente, a aplicabilidade dos ábacos continua a ser correta.

Isto deve-se ao fator de equivalência ε_3 , do vidro recozido ($\varepsilon_3 = 1$), ser mais baixo do que os tipos de vidro mencionados (ver quadro 33). O cálculo da espessura resistente, e_R , é influenciado pelo tipo de vidro mais frágil, ou seja, pelo vidro com um valor de ε_3 mais baixo (ver quadro 30). Os tipos de vidro mencionados possuem um valor de ε_3 mais alto, logo, na presença de um deles como constituinte do vidro, seria esse vidro a influenciar o cálculo da espessura equivalente, e_R .

Isto significa também que por hipótese, se todos os vidros presentes no vidro isolante possuírem um fator de equivalência ε_3 mais baixo do que o vidro recozido, como por exemplo, um envidraçado constituído apenas por vidro temperado ($\text{MAX}(\varepsilon_3) = 0,61$), o pré-dimensionamento do ábaco iria estar do lado da segurança, dado que o vidro recozido é mais frágil do que o vidro temperado.

5.2.2 ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VIDROS DUPLOS COM DOIS VIDROS MONOLÍTICOS (MM)

São definidos ábacos de pré-dimensionamento para vidro duplo constituídos por dois vidros monolíticos recozidos, como esquematizado na figura 23. Por simplificação este tipo de vidro será denominado vidro “MM”. Cada ábaco é acompanhado com a respetiva justificação analítica concluída por uma equação final que relaciona todos os parâmetros envolvidos.



Fig.23 – Vidro Duplo constituído por dois Vidros Monolíticos (MM)

O princípio de cálculo da metodologia assenta na verificação da condição 8, presente no quadro 49. A verificação ocorre quando a espessura resistente, e_R , é superior à espessura de cálculo e_1 , que depende da relação entre lado menor e maior do vidro duplo. Esta condição é transversal a todos os envidraçados, e é aplicada na elaboração de todos os ábacos apresentados doravante.

Quadro 49 – Condição de Verificação da Resistência Mecânica [20]

Condição de Verificação	
Nota: $c = 1$ (sem fator de redução).	$e_R \geq e_1 \times c \text{ [mm]} \leftrightarrow$ $\leftrightarrow e_R \geq e_1 \text{ [mm]} \quad (8)$

A definição da espessura equivalente e_R para este tipo de vidro duplo é apresentada no quadro 50, juntamente com os fatores corretivos adoptados, ε_1 e ε_3 , devidamente justificados.

As simbologias e_i e e_j referem-se à espessura de cada componente monolítico em milímetros.

Quadro 50 - Definição da Espessura Equivalente (MM)

Definição de e_R [mm]		
1	Expressão genérica conforme DTU39 P4 2016 [20].	$e_R = \frac{e_i + e_j}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} \text{ [mm]} \quad (14)$
2	Definição dos fatores de correção: $\varepsilon_1 = 1,6$ (Vidro Duplo), Máx (ε_3) = 1 (Vidro Recozido)	$\leftrightarrow e_R = \frac{e_i + e_j}{0,9 \times 1,6 \times 1} \text{ [mm]} \quad (46)$
3	Simplificação da expressão	$\leftrightarrow e_R = \frac{e_i + e_j}{1,44} \text{ [mm]} \quad (47)$

A espessura de cálculo, e_l , depende da relação entre maior e menor dimensão do envidraçado, L/l .

1. Para $L/l \leq 2,5$ (forma mais “quadrada”): No quadro 51 é definida a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “MM.1” (ver figura 24).

Quadro 51 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (MM.1)

$L/l \leq 2,5$		
1	Definição de e_l para $L/l \leq 2,5$.	$e_l = \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \text{ [mm]} \quad (9)$
2	Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_l$ [mm]	$\leftrightarrow e_R \geq \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad (48)$
3	Desenvolvimento através de uma implicação matemática.	$\leftrightarrow (e_R)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (49)$
4	Substituição de e_R , baseado na expressão 47	$\leftrightarrow \left(\frac{e_i + e_j}{1,44}\right)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (50)$
5	Equação em ordem a S (área do envidraçado) [m ²].	$\leftrightarrow S \leq \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_i + e_j}{1,44}\right)^2 \quad (51)$
6	Definição de $S_{máx}$ [m ²], (equação final).	$\leftrightarrow S_{máx} = \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_i + e_j}{1,44}\right)^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (52)$

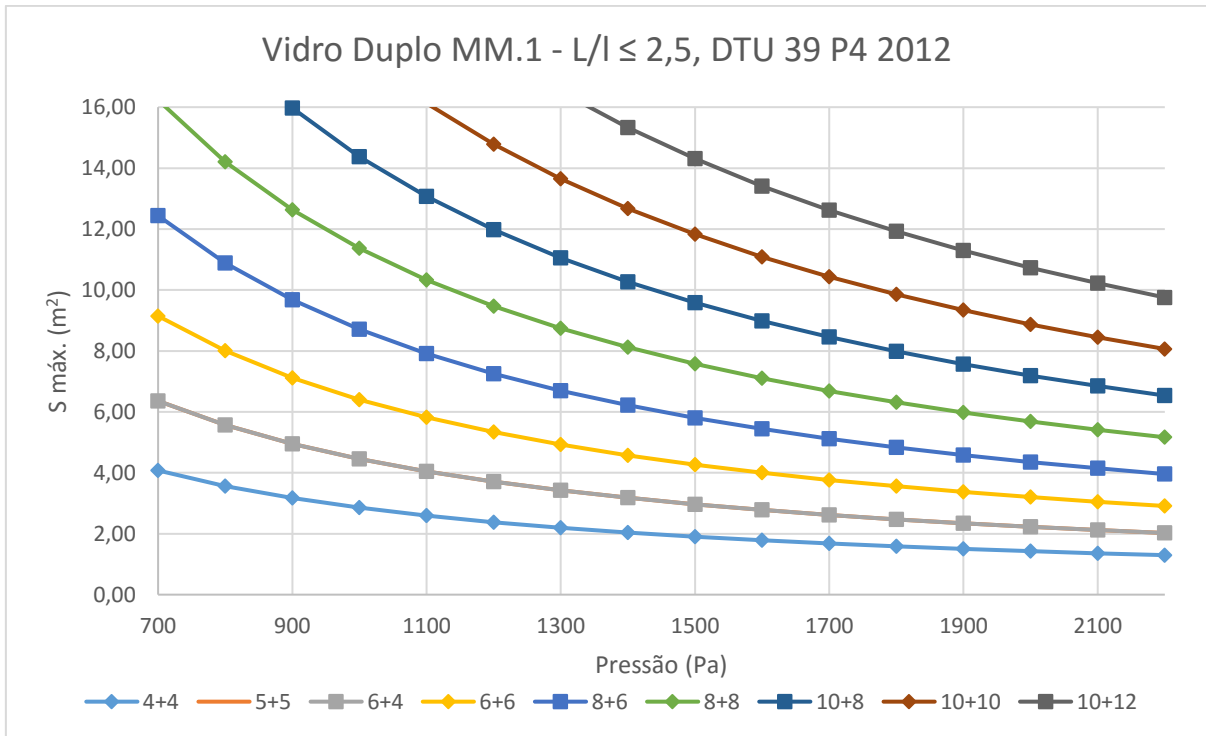


Fig.24 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo MM.1

2. Para $L/l > 2,5$ (forma mais “retangular”): No quadro 52 é definida a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “MM.2” (ver figura 25).

Quadro 52 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $l_{máx}$. (MM.2)

$L/l > 2,5$	
1 Definição de e_l para $L > 2,5$.	$e_l = \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]} \quad (10)$
2 Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_l$ [mm]	$\leftrightarrow e_R \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (53)$
3 Substituição de e_R , baseado na expressão 53	$\leftrightarrow \left(\frac{e_i + e_j}{1,44} \right) \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (54)$
4 Equação em ordem a l (menor lado do envidraçado) [m].	$\leftrightarrow l \leq \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times \frac{(e_i + e_j)}{1,44} \quad (55)$
5 Definição de l máx [m] (equação final).	$\leftrightarrow l \text{ máx} = \frac{(e_i + e_j)}{\sqrt{P}} \times 4,375 \text{ [m]} \quad (56)$

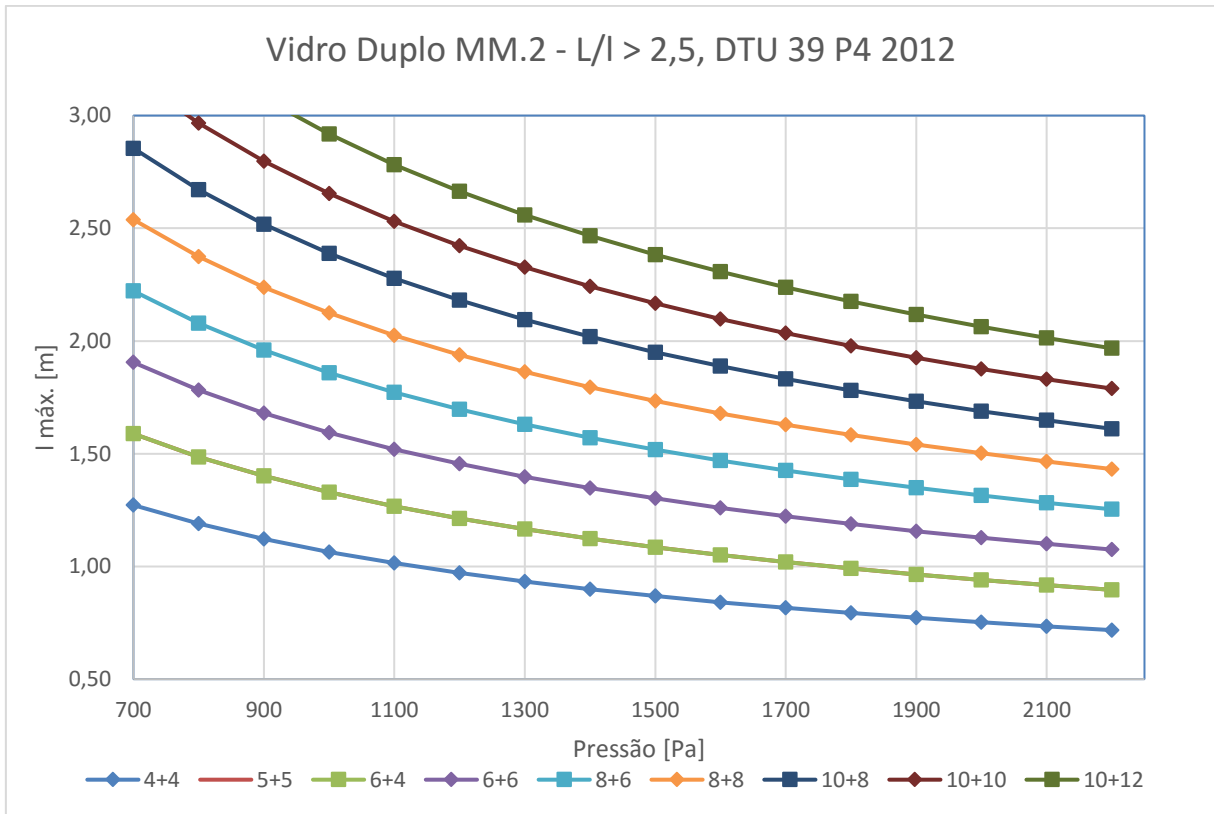


Fig.25 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo MM.2

5.2.3 ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS DUPLOS COM VIDRO MONOLÍTICO E LAMINADO (ML)

São aqui apresentados ábacos de pré-dimensionamento para vidros duplo constituídos por um vidro monolítico recozido e um outro vidro laminado de segurança, composto por duas lâminas de vidro recozidas, como esquematizado na figura 26. Por simplificação, este tipo de vidro será denominado vidro “ML”. Como no caso anterior, cada ábaco faz-se acompanhar da respetiva justificação matemática finalizada na forma de uma equação final, usada na elaboração do respetivo ábaco.



Fig.26 – Vidro Duplo constituído por um Vidro Monolítico e um outro Vidro Laminado (ML)

O princípio de cálculo do dimensionamento assenta na verificação da condição 8. A verificação ocorre quando a espessura resistente, e_R , é superior à espessura de cálculo e_I , que depende da relação entre lado menor e maior do vidro duplo.

A definição da espessura equivalente e_R para este tipo de vidro duplo é apresentada no quadro 53, juntamente com os fatores corretivos adotados, ε_1 , ε_2 e ε_3 , devidamente justificados.

A simbologia e_i refere-se à espessura do componente monolítico, já e_k e e_l referem-se à espessura de cada lâmina do componente laminado, em milímetros.

Quadro 53 - Definição da Espessura Equivalente (ML)

Definição de e_R [mm]	
1	Expressão genérica conforme DTU39 P4 2016 [20]. $e_R = \frac{e_i + \frac{e_k + e_l}{0,9 \times \varepsilon_2}}{0,9 \times \varepsilon_1 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} \quad [mm] \quad (16)$
Definição dos fatores de correção:	
2	$\varepsilon_1 = 1,6$ (Vidro Duplo), $\varepsilon_2 = 1,3$ (Vidro Laminado de Segurança de 2 lâminas), Máx (ε_3) = 1 (Vidro Recozido); $\leftrightarrow e_R = \frac{e_i + \frac{e_k + e_l}{0,9 \times 1,3}}{0,9 \times 1,6 \times 1} \quad [mm] \quad (57)$
3	Simplificação da expressão. $\leftrightarrow e_R = \frac{e_i}{1,4400} + \frac{e_k + e_l}{1,6848} \quad [mm] \quad (58)$

A espessura de cálculo, e_l , depende da relação entre maior e menor dimensão do envidraçado, L/l .

- Para $L/l \leq 2,5$ (forma mais “quadrada”): No quadro 54 define-se a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “ML.1” (ver figura 27).

Quadro 54 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (ML.1)

$L/l \leq 2,5$	
1	Definição de e_1 para $L/l \leq 2,5$. $e_1 = \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad [mm] \quad (9)$
2	Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_1$ [mm] $\leftrightarrow e_R \geq \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad (59)$
3	Desenvolvimento através de uma implicação matemática. $\leftrightarrow (e_R)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (60)$
4	Substituição de e_R , baseado na expressão 58 $\leftrightarrow \left(\left(\frac{e_i}{1,4400} + \frac{e_k + e_l}{1,6848} \right) \right)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (61)$
5	Equação em ordem a S (área do envidraçado) [m ²]. $\leftrightarrow S \leq \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_i}{1,4400} + \frac{e_k + e_l}{1,6848} \right)^2 \quad (62)$
6	Definição de $S_{máx}$ [m ²], (equação final). $\leftrightarrow S_{máx} = \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_i}{1,4400} + \frac{e_k + e_l}{1,6848} \right)^2 \quad [m^2] \quad (63)$

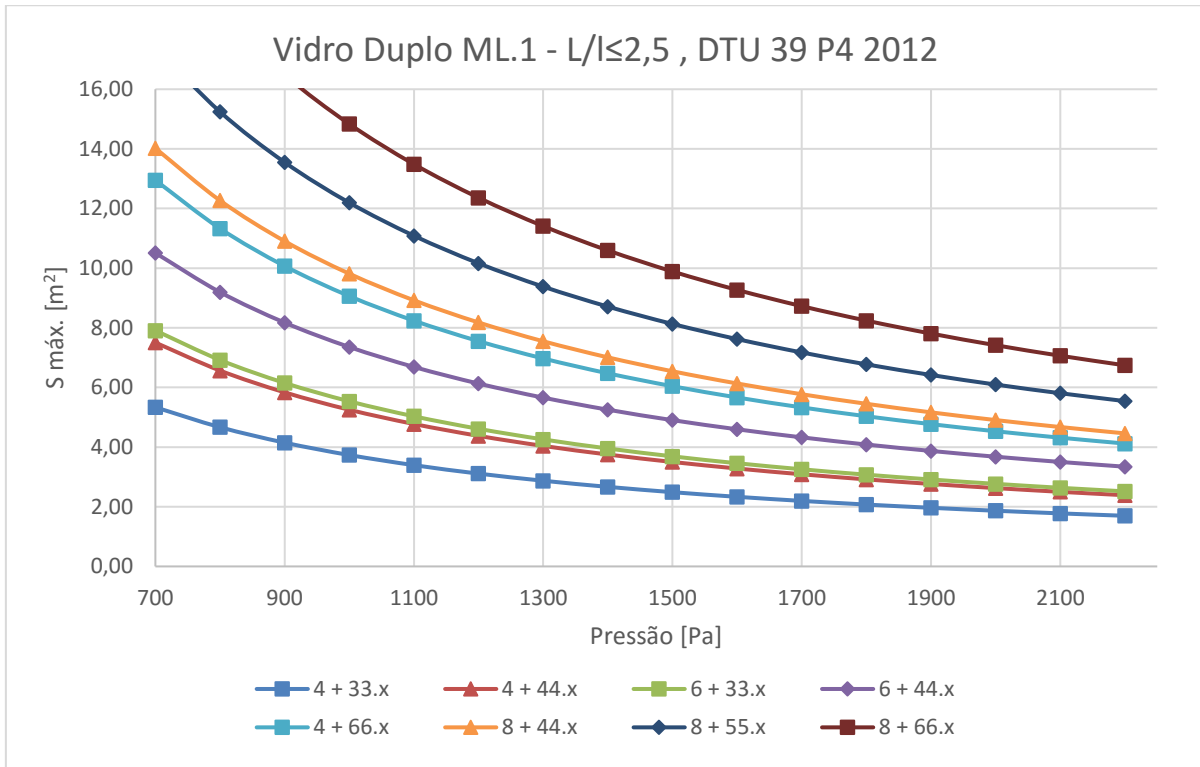


Fig.27 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo ML.1

2. Para $L/l > 2,5$ (forma mais “retangular”): No quadro 55 é definida a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “ML.2” (ver figura 28).

Quadro 55 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $l_{máx}$ (ML.2)

$L/l > 2,5$	
1 Definição de e_1 para $L > 2,5$.	$e_1 = \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]} \quad (10)$
2 Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_1$ [mm]	$\leftrightarrow e_R \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (64)$
3 Substituição de e_R , baseado na expressão 58	$\leftrightarrow \left(\frac{e_i}{1,4400} + \frac{e_k + e_l}{1,6848} \right) \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (65)$
4 Equação em ordem a l (menor lado do envidraçado) [m].	$\leftrightarrow l \leq \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times \left(\frac{e_i}{1,4400} + \frac{e_k + e_l}{1,6848} \right) \quad (66)$
5 Definição de l máx [m] (equação final).	$\leftrightarrow l_{máx} = \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times \left(\frac{e_i}{1,4400} + \frac{e_k + e_l}{1,6848} \right) \text{ [m]} \quad (67)$

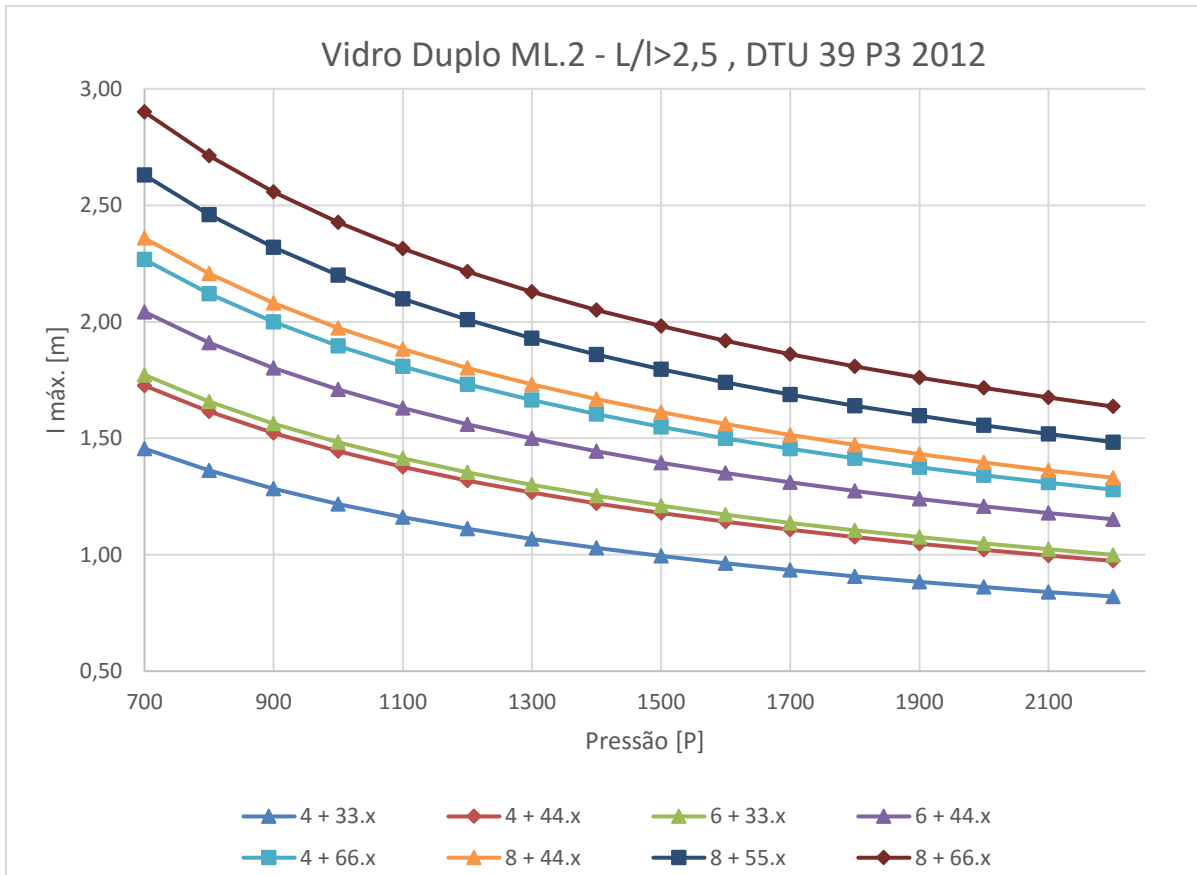


Fig.28 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo ML.2

5.2.4 ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS DUPLOS COM DOIS VIDROS LAMINADOS (LL)

São aqui apresentados ábacos de pré-dimensionamento para vidros duplo constituídos por dois vidros laminados de segurança, composto por duas lâminas de vidro recozidas, como desenhado na figura 29. Por simplificação este tipo de vidro será denominado vidro duplo “LL”. Como nos casos previamente apresentados, cada ábaco faz-se acompanhar da respetiva justificação matemática finalizada na forma de uma equação final, usada na elaboração do ábaco.



Fig.29 – Vidro Duplo constituído por dois Vidros Laminados (LL)

O vidro é verificado se a espessura resistente, e_R , for superior à sua espessura de cálculo e_I , que depende da relação entre lado menor e maior do vidro duplo. A definição da espessura equivalente e_R

para este tipo de vidro duplo é exposta no quadro 56, juntamente com os fatores corretivos adoptados, ε_1 , ε_2 e ε_3 , devidamente justificados.

As simbologias e_k e e_l referem-se à espessura aproximada de cada vidro laminado, em milímetros.

Quadro 56 - Definição da Espessura Equivalente (LL)

Definição de e_R [mm]	
1	Expressão genérica conforme DTU39 P4 2016 [20]. $e_R = \frac{\frac{e_k}{0,9 \times \varepsilon_2} + \frac{e_l}{0,9 \times \varepsilon_2}}{0,9 \times \varepsilon_1 \times MAX(\varepsilon_3)} \quad [mm] \quad (16)$
Definição dos fatores de correção:	
2	$\varepsilon_1 = 1,6$ (Vidro Duplo), $\varepsilon_2 = 1,3$ (Dois Vidros Laminados de Segurança de 2 lâminas), Máx (ε_3) = 1 (Vidro Recozido); $\leftrightarrow e_R = \frac{\frac{e_k}{0,9 \times 1,3} + \frac{e_k}{0,9 \times 1,3}}{0,9 \times 1,6 \times 1} \quad [mm] \quad (68)$
3	Simplificação da expressão. $\leftrightarrow e_R = \frac{ek + el}{1,6848} \quad [mm] \quad (69)$

A espessura de cálculo, e_l , depende da relação entre maior e menor dimensão do envidraçado, L/l .

1. Para $L/l \leq 2,5$ (forma mais “quadrada”): No quadro 57 define-se a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “LL.1” (ver figura 30).

Quadro 57 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{máx}$ (LL.1)

$L/l \leq 2,5$	
1	Definição de e_1 para $L/l \leq 2,5$. $e_1 = \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad [mm] \quad (9)$
2	Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_1$ [mm] $\leftrightarrow e_R \geq \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad (70)$
3	Desenvolvimento através de uma implicação matemática. $\leftrightarrow (e_R)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (71)$
4	Substituição de e_R , baseado na expressão 69 $\leftrightarrow \left(\frac{e_k + e_l}{1,6848}\right)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (72)$
5	Equação em ordem a S (área do envidraçado) [m ²]. $\leftrightarrow S \leq \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,6848}\right)^2 \quad (73)$
6	Definição de $S_{máx}$ [m ²], (equação final). $\leftrightarrow S_{máx} = \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,6848}\right)^2 \quad [m^2] \quad (74)$

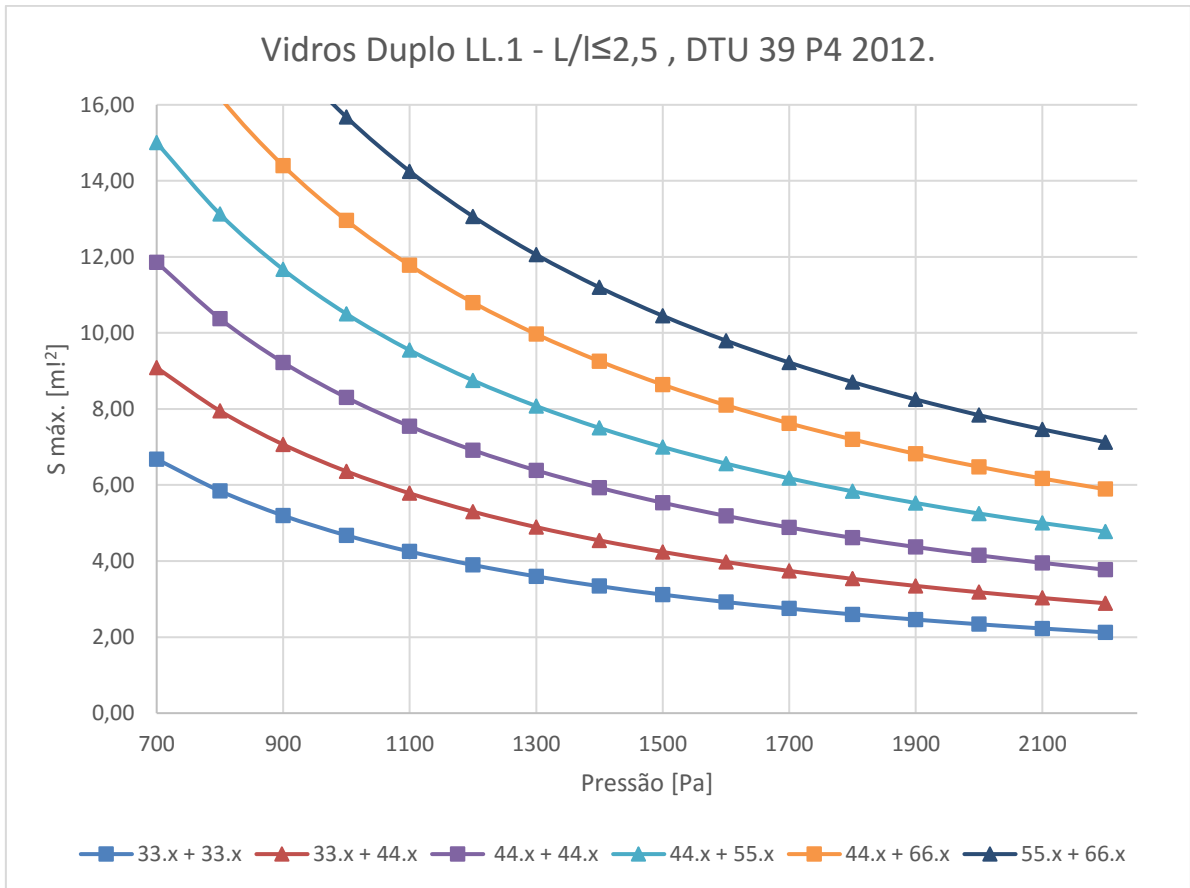


Fig.30 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo LL.1

2. Para $L/l > 2,5$ (forma mais “retangular”): No quadro 58 é definida a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “LL.2” (ver figura 31).

Quadro 58 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $l_{máx}$. (LL.2)

$L/l > 2,5$	
1 Definição de e_l para $L > 2,5$.	$e_l = \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]} \quad (10)$
2 Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_l$ [mm]	$\leftrightarrow e_R \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (75)$
3 Substituição de e_R , baseado na expressão 69	$\leftrightarrow \frac{e_k + e_l}{1,6848} \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (76)$
4 Equação em ordem a l (menor lado do envidraçado) [m].	$\leftrightarrow l \leq \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,6848} \right) \quad (77)$
5 Definição de l máx [m] (equação final).	$\leftrightarrow l \text{ máx} = \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,6848} \right) \text{ [m]} \quad (78)$

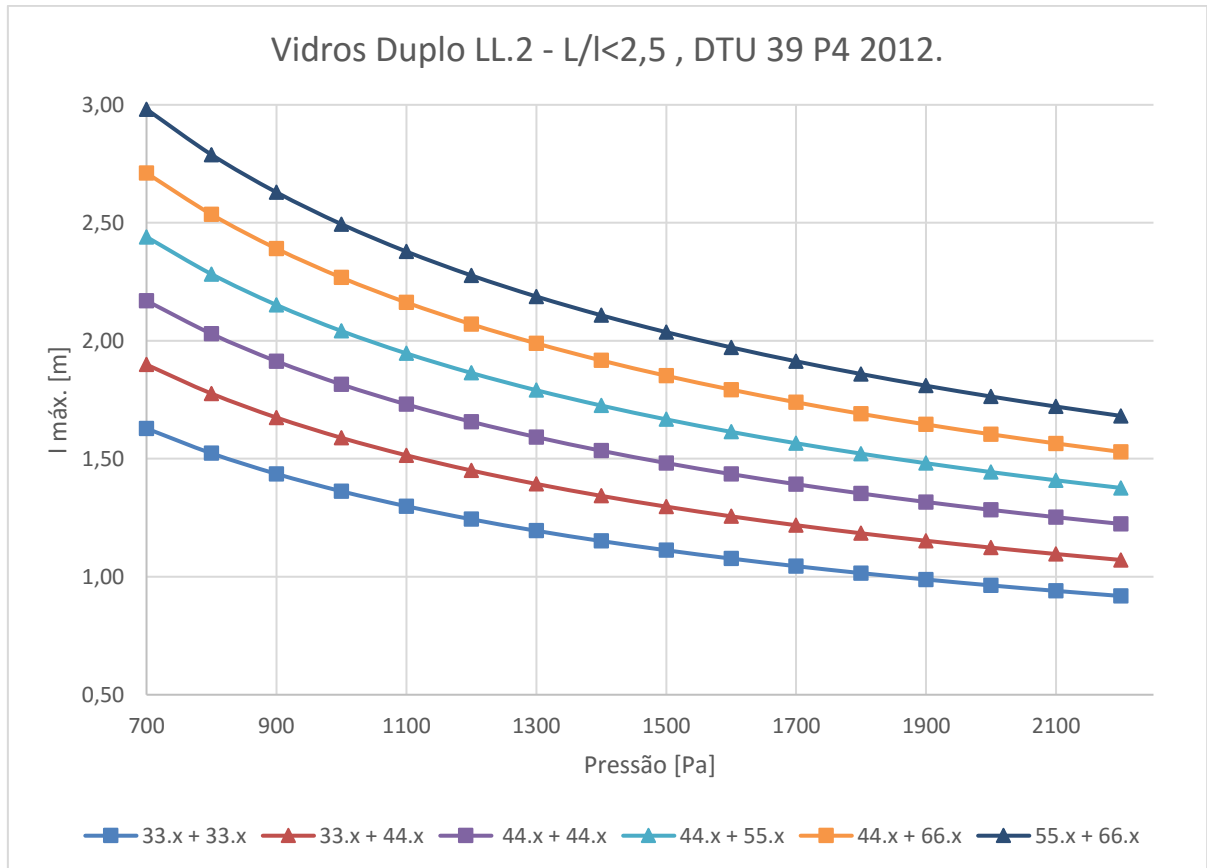


Fig.31 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo LL.2

5.2.5 ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS SIMPLES MONOLÍTICOS (M)

São aqui apresentados ábacos de pré-dimensionamento para vidros simples monolíticos recozidos, como ilustrado na figura 32. Por simplificação este tipo de vidro será denominado vidro “M”. Como no caso anterior, cada ábaco faz-se acompanhar da respetiva justificação matemática finalizada na forma de uma equação final, usada na elaboração do ábaco.



Fig.32 – Vidro Simples Monolítico (M)

O princípio de cálculo do dimensionamento assenta na verificação da condição 8. A verificação ocorre quando a espessura resistente, e_R , é superior à espessura de cálculo e_I , que depende da relação entre lado menor e maior do vidro duplo.

A definição da espessura equivalente e_R para este tipo de vidro duplo é apresentada no quadro 59, juntamente com o fatores corretivo adoptado ε_3 , devidamente justificados.

A simbologia e_i refere-se à espessura do componente monolítico em milímetros.

Quadro 59 - Definição da Espessura Equivalente (M)

Definição de e_R [mm]		
1	Expressão genérica conforme DTU39 P4 2016 [20].	$e_R = \frac{e_i}{\varepsilon_3} \text{ [mm]} \quad (12)$
2	Definição dos fatores de correção: $\varepsilon_3 = 1$ (Vidro Recozido);	$\leftrightarrow e_R = \frac{e_i}{1} = e_i \text{ [mm]} \quad (79)$

A espessura de cálculo, e_l , depende da relação entre maior e menor dimensão do envidraçado, L/l .

1. Para $L/l \leq 2,5$ (forma mais “quadrada”): No quadro 60 define-se a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “M.1” (ver figura 33).

Quadro 60 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{m\acute{a}x}$ (M.1)

$L/l \leq 2,5$		
1	Definição de e_l para $L/l \leq 2,5$.	$e_l = \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \text{ [mm]} \quad (9)$
2	Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_l$ [mm]	$\leftrightarrow e_R \geq \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad (80)$
3	Desenvolvimento através de uma implicação matemática.	$\leftrightarrow (e_R)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (81)$
4	Substituição de e_R , baseado na expressão 79	$\leftrightarrow (e_i)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (82)$
5	Equação em ordem a S (área do envidraçado) [m ²].	$\leftrightarrow S \leq \frac{100}{P} \times (e_i)^2 \quad (83)$
6	Definição de $S_{m\acute{a}x}$ [m ²], (equação final).	$\leftrightarrow S_{m\acute{a}x} = \frac{100}{P} \times (e_i)^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (84)$

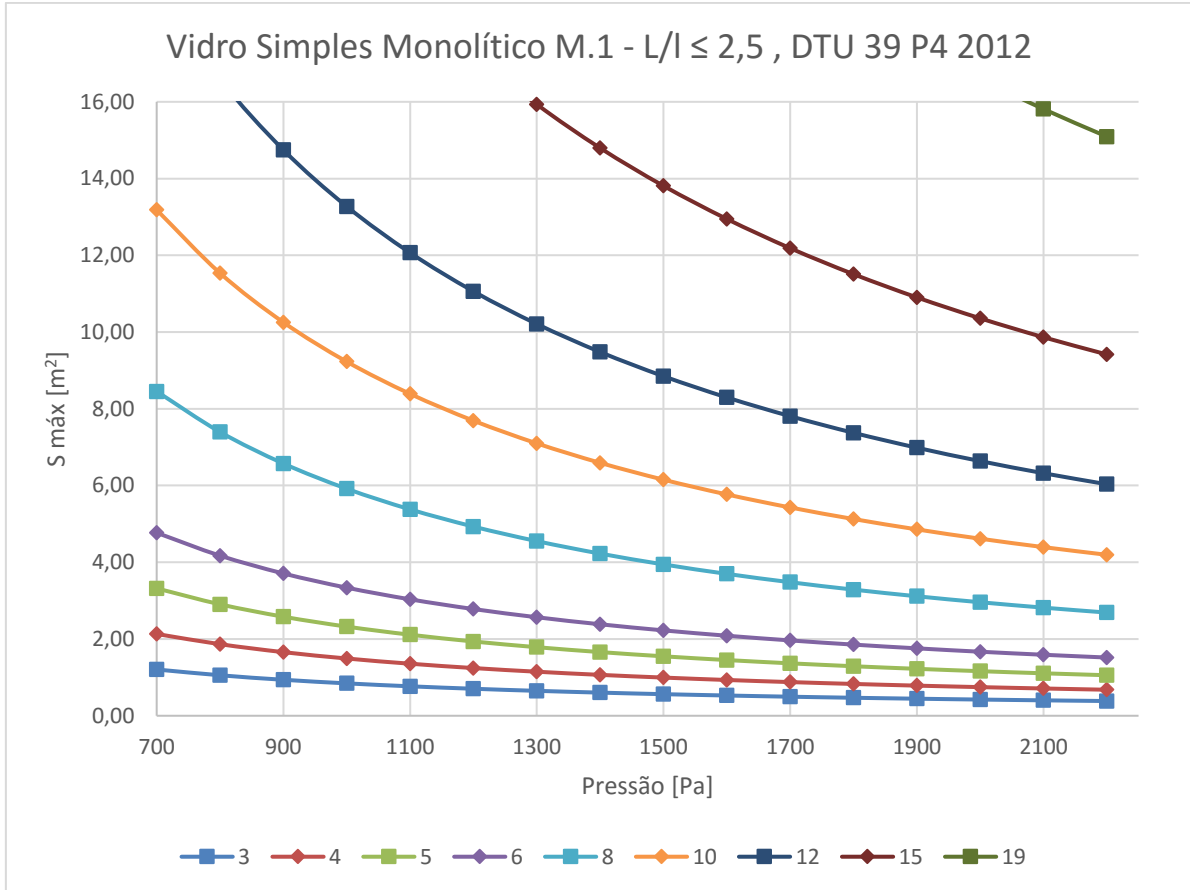


Fig.33 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo M.1

- Para $L/l > 2,5$ (forma mais “retangular”): No quadro 61 é definida a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_1 , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “M.2” (ver figura 34).

Quadro 61 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $l_{máx}$. (M.2)

$L/l > 2,5$	
1 Definição de e_1 para $L > 2,5$.	$e_1 = \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]} \quad (10)$
2 Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_1$ [mm]	$\leftrightarrow e_R \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (85)$
3 Substituição de e_R , baseado na expressão 79	$\leftrightarrow e_i \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (86)$
4 Equação em ordem a l (menor lado do envidraçado) [m].	$\leftrightarrow l \leq \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times e_i \quad (87)$
5 Definição de l máx [m] (equação final).	$\leftrightarrow l_{máx} = \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times e_i \text{ [m]} \quad (88)$

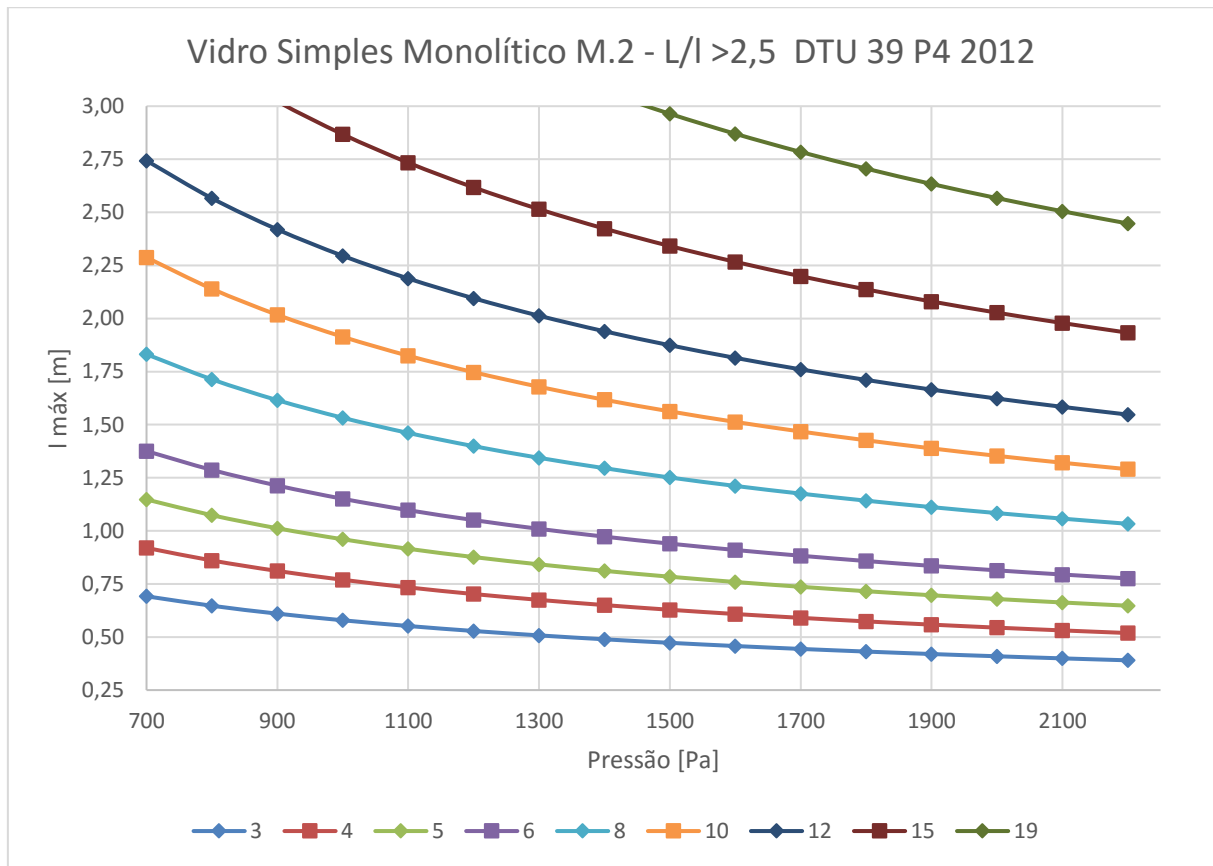


Fig.34 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo M.2

5.2.6. ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA VIDROS SIMPLES LAMINADOS (L)

São aqui apresentados ábacos de pré-dimensionamento para vidros simples laminados de segurança, compostos por duas lâminas de vidro recozidas, como desenhado na figura 35. Por simplificação, este tipo de vidro será denominado vidro duplo “L”. Como nos casos previamente apresentados, cada ábaco faz-se acompanhar da respetiva justificação matemática finalizada na forma de uma equação final, usada na elaboração do ábaco.



Fig.35 – Vidro Simples Laminado (L)

O vidro é verificado se a espessura resistente, e_R , for superior à sua espessura de cálculo e_l , que depende da relação entre lado menor e maior do vidro duplo. A definição da espessura equivalente e_R

para este tipo de vidro duplo é exposta no quadro 62, juntamente com os fatores corretivos adoptados, ε_2 e ε_3 , devidamente justificados.

As simbologias e_k e e_l referem-se à espessura aproximada de cada lâmina de vidro, em milímetros.

Quadro 62 - Definição da Espessura Equivalente (L)

Definição de e_R [mm]	
1	Expressão genérica conforme DTU39 P4 2016 [20]. $e_R = \frac{e_k + e_l}{0,9 \times \varepsilon_2 \times \text{MAX}(\varepsilon_3)} \quad [\text{mm}] \quad (16)$
Definição dos fatores de correção:	
2	$\varepsilon_2 = 1,3$ (Dois Vidros Laminados de Segurança de 2 lâminas), Máx (ε_3) = 1 (Vidro Recozido); $\leftrightarrow e_R = \frac{e_l + e_k}{0,9 \times 1,3 \times 1} \quad [\text{mm}] \quad (89)$
3	Simplificação da expressão. $\leftrightarrow e_R = \frac{ek + el}{1,17} \quad [\text{mm}] \quad (90)$

A espessura de cálculo, e_l , depende da relação entre maior e menor dimensão do envidraçado, L/l .

- Para $L/l \leq 2,5$ (forma mais “quadrada”): No quadro 63 define-se a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “L.1” (ver figura 36).

Quadro 63 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $S_{m\acute{a}x}$ (L.1)

$L/l \leq 2,5$	
1	Definição de e_l para $L/l \leq 2,5$. $e_l = \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad [\text{mm}] \quad (9)$
2	Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_l$ [mm] $\leftrightarrow e_R \geq \sqrt{\frac{P \times S}{100}} \quad (91)$
3	Desenvolvimento através de uma implicação matemática. $\leftrightarrow (e_R)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (92)$
4	Substituição de e_R , baseado na expressão 90 $\leftrightarrow \left(\frac{e_k + e_l}{1,17}\right)^2 \geq \frac{P \times S}{100} \quad (93)$
5	Equação em ordem a S (área do envidraçado) [m ²]. $\leftrightarrow S \leq \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,17}\right)^2 \quad (94)$
6	Definição de $S_{m\acute{a}x}$ [m ²], (equação final). $\leftrightarrow S_{m\acute{a}x} = \frac{100}{P} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,17}\right)^2 \quad [\text{m}^2] \quad (95)$

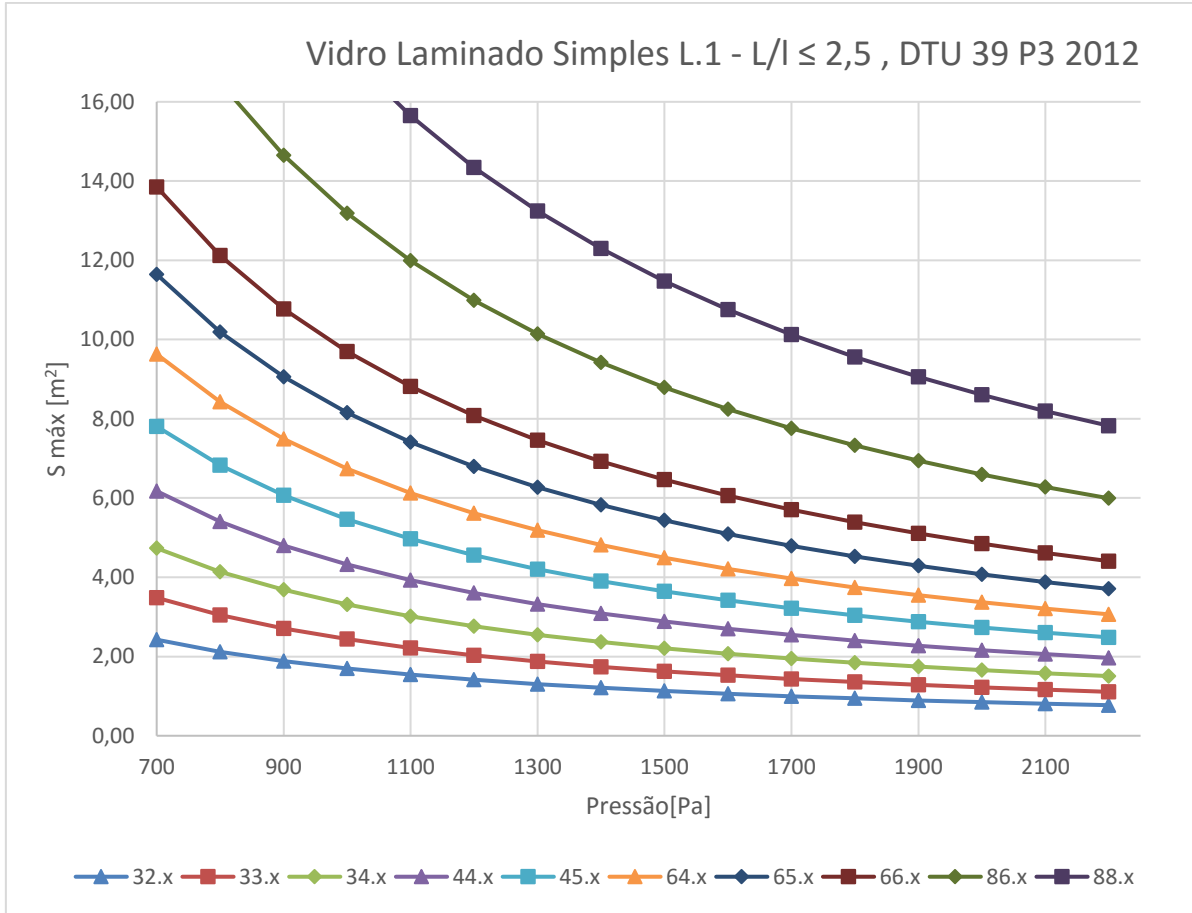


Fig.36 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo L.1

2. Para $L/l > 2,5$ (forma mais “retangular”): No quadro 64 é definida a expressão de cálculo da espessura de cálculo, e_l , bem como o raciocínio seguido para obter a equação final, utilizada na construção do ábaco de pré-dimensionamento para o tipo de vidro “L.2” (ver figura 37).

Quadro 64 – Definição da espessura de cálculo e definição da equação final em ordem a $l_{máx}$.

$L/l > 2,5$	
1 Definição de e_l para $L > 2,5$.	$e_l = \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \text{ [mm]} \quad (10)$
2 Condição de Verificação: baseada na expressão 8. $e_R \geq e_l$ [mm]	$\leftrightarrow e_R \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (96)$
3 Substituição de e_R , baseado na expressão 90	$\leftrightarrow \frac{e_k + e_l}{1,17} \geq \frac{l \times \sqrt{P}}{6,3} \quad (97)$
4 Equação em ordem a l (menor lado do envidraçado) [m].	$\leftrightarrow l \leq \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,17} \right) \quad (98)$
5 Definição de l máx [m] (equação final).	$\leftrightarrow l \text{ máx} = \frac{6,3}{\sqrt{P}} \times \left(\frac{e_k + e_l}{1,17} \right) \text{ [m]} \quad (99)$

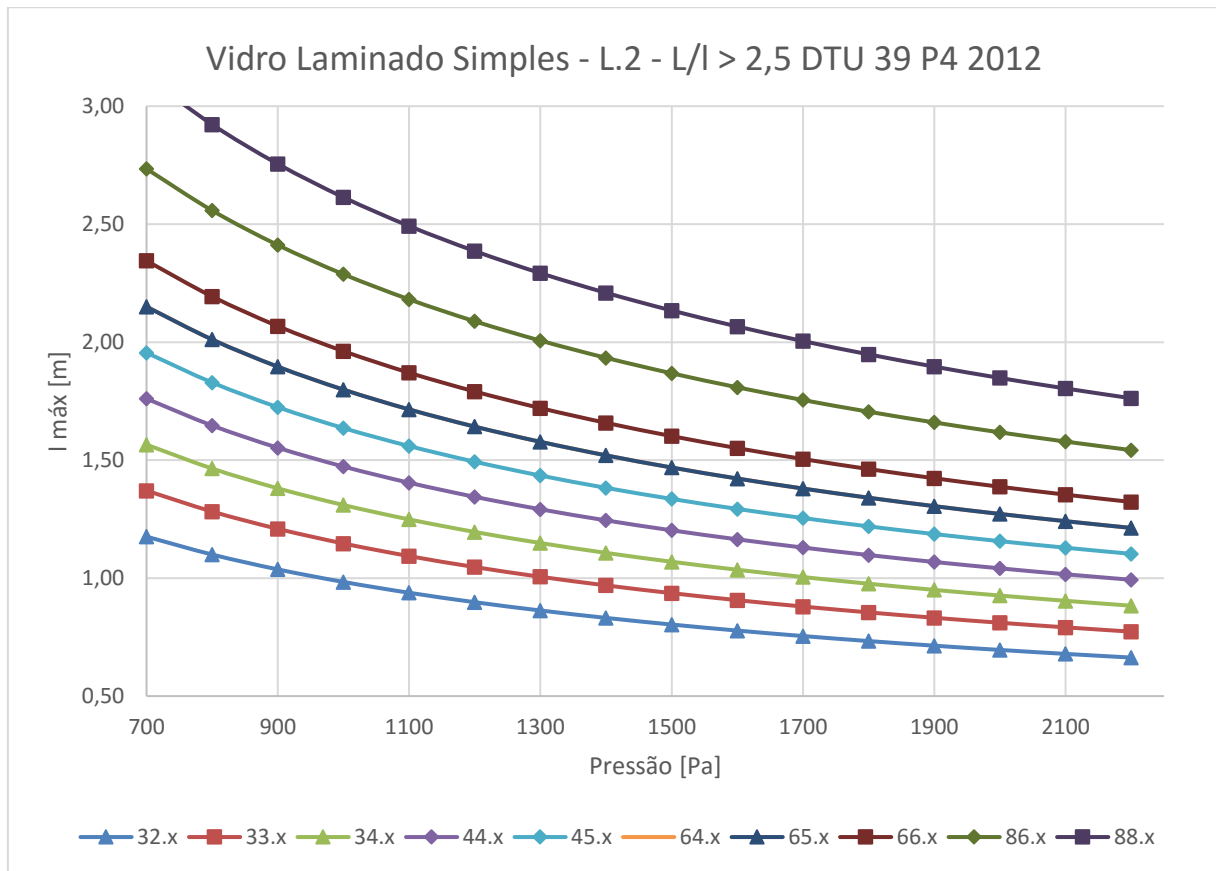


Fig.37 - Ábaco de Pré-Dimensionamento para vidros do tipo L.2

5.2.7 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DE UM ÁBACO DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

De forma a exemplificar a utilização dos ábacos expostos anteriormente, considere-se um envidraçado “N” como ilustrado na figura 38.

A relação entre a maior e a menor dimensão do envidraçado, L/l , é superior a 2,5, mas existem dúvidas acerca das dimensões do envidraçado, pretendendo-se maximizar a área do envidraçado. O envidraçado “N” é um vidro duplo constituído por dois vidros recozidos monolíticos (“MM”), cuja espessura já se encontra definida. Ambos os vidros têm 4 mm de espessura. Sabe-se que esse envidraçado possui uma pressão de cálculo de aproximadamente 1100 Pa.

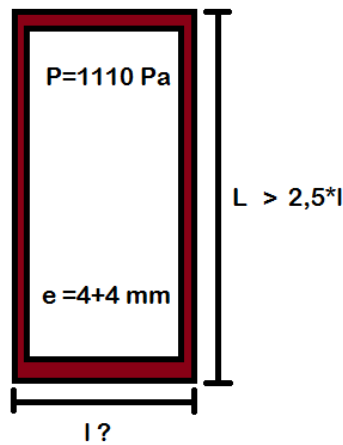


Fig.38 – Esquema do exemplo apresentado – Envidraçado “N”

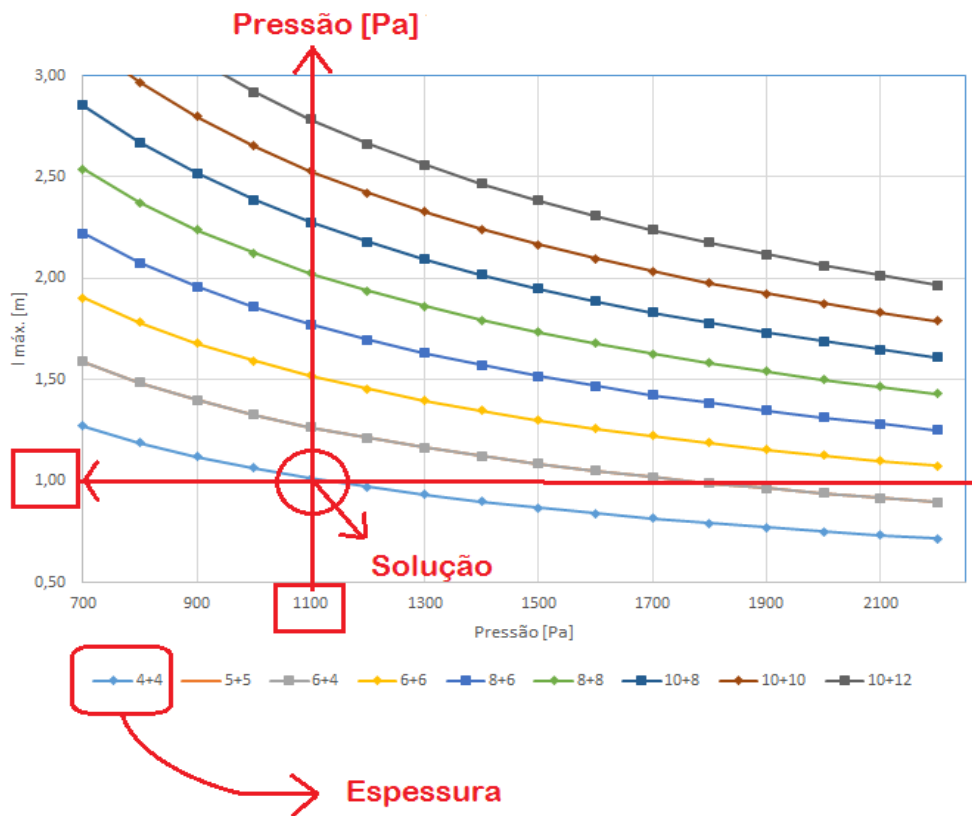


Fig.39 – Ábaco de Pré-Dimensionamento do Envidraçado “N”

O ábaco de pré-dimensionamento apresentado corresponde a um ábaco para o tipo de vidros MM.1, indicado para o pré-dimensionamento do envidraçado “N”.

De maneira a obter o valor de $l_{máx.}$, é traçado um segmento de reta perpendicular ao eixo das abscissas, a passar pela abscissa de pressão definida (1100 Pa), até intersecar a curva de espessura pretendida, “4 +4” mm e o eixo das ordenadas. Dessa intersecção resulta respetivamente um ponto denominado na figura 39 de “Solução” e uma ordenada correspondente ao valor de $l_{máx.}$ para a dada espessura e pressão de cálculo.

Observando a figura 39, conclui-se que para as condições estabelecidas, o envidraçado “N”, deverá ter como menor dimensão máxima, $l_{máx}$, aproximadamente 1 metro.

5.3 VERIFICAÇÃO MECÂNICA ATRAVÉS DE LIVRO DE CÁLCULO

5.3.1 INTRODUÇÃO

O processo de dimensionamento mecânico, conforme explicitado em 5.1, apresenta uma última etapa de verificação mecânica que é feita através de um livro de cálculo desenvolvido para esse efeito. O uso do livro de cálculo pode ser realizado ignorando a fase de pré-dimensionamento através de um método de tentativa erro.

O livro de cálculo de nome “Dimensionamento Mecânico 2016” foi elaborado com base no *Microsoft Office Excel 2016*, tendo em conta a mais recente metodologia de dimensionamento mecânico explicitada no capítulo 4. O domínio de aplicação do livro de cálculo é o mesmo do que a da metodologia abordada em 4.1.

O livro de cálculo pretende verificar se as espessuras propostas para dado envidraçado são admissíveis face às solicitações a que estará sujeito ao longo da sua vida. São feitos dois tipos de verificação neste livro de cálculo: a verificação à resistência mecânica (ação do vento) e a verificação da limitação dimensional aplicável apenas a vidros simples monolíticos.

O uso do livro de cálculo implica o preenchimento de dados de entrada posteriormente especificados em três folhas de cálculo distintas, como se ilustra na figura 40.

1. “1 - Ação do Vento”;
2. “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”;
3. “3 - Verificações”.

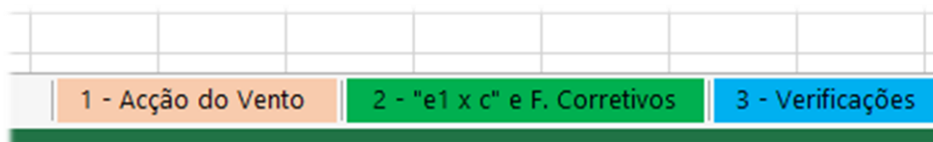


Fig.40 – Diferentes Folhas de Cálculo

É conveniente lembrar que metodologia de dimensionamento mecânico é baseada na verificação da expressão 8. Também é efetuada uma verificação das limitações dimensionais apenas aplicáveis a vidros simples monolíticos, como definido em 4.1.4.

$$e_R \geq e_1 \times c \text{ [mm]} \quad (8)$$

5.3.2 INSTRUÇÕES E INFORMAÇÕES ACERCA DOS DADOS DE ENTRADA E DE SAÍDA

5.3.2.1 Folha de Cálculo “1 – Ação do Vento”

A folha de cálculo “1-Ação do Vento” tem como finalidade o cálculo da pressão uniformemente distribuída no envidraçado a ser utilizada no posterior dimensionamento. Para a obtenção da pressão de cálculo são seguidos os passos de 1 a 5, ilustrados na figura 41 e definidos de seguida:

1. Preencher com um valor a altura acima do solo a que se encontra o envidraçado (h');
2. Preencher com um “x” apenas uma das quatro combinações possíveis de zona e rugosidade relativas ao local onde o edifício se encontra;
3. Selecionar com um “x” qual o tipo de relação geométrica em que o edifício em questão se enquadra. Sendo que h representa a altura do edifício, a e b representam respetivamente a maior e menor dimensão em planta;
4. Escolher com apenas um “x” qual o tipo de permeabilidade de fachadas o edifício apresenta;
5. Existe ainda uma hipótese de preenchimento manual do coeficiente de pressão exterior a usar, no caso de o utilizador requerer maior precisão no dimensionamento.

As informações e descrição dos dados de entrada a introduzir nesta primeira folha são seguidamente apresentados:

- **h' [m]** - Altura do envidraçado. Introduzir manualmente o valor da altura da parte superior do envidraçado acima do solo.
- **Zona do Território e Rugosidade Aerodinâmica** - Optar pela combinação de uma zona do território e um tipo de rugosidade. São consideradas as zonas A e B e os tipos de rugosidade I e II.
- **Relações Geométricas: h/b** - Escolher uma opção de acordo com o valor do quociente entre a altura do edifício, h e a menor dimensão do mesmo em planta, b . **a/b** - Escolher uma opção de acordo com o valor do quociente entre a maior e a menor dimensão em planta do edifício, a e b . Para cada uma das seis combinações possíveis entre os dois tipos de quocientes, optou-se por usar o conjunto de valores mais gravosos, tornando o dimensionamento mais exigente. Foram pensadas duas opções: usar o valor de coeficiente de pressão exterior global correspondente à face do edifício e a direção do vento mais desfavorável para cada combinação de relações, ou, o respetivo valor de coeficiente de pressão exterior local de cada combinação de relações geométricas. Foi concluído que para todas as combinações de relações geométricas, o valor de coeficiente de pressão exterior local constitui o valor mais desfavorável. Os valores usados para cada combinação de relações geométricas do edifício são apresentados no quadro 65. São apresentados quadros em anexo que sustentam esta tomada de decisão.
- **Permeabilidade das Fachadas** - Selecionar uma das opções: fachadas com permeabilidade semelhante; duas fachadas opostas com permeabilidade semelhante e duas impermeáveis com vento normal às fachadas permeáveis ou duas fachadas opostas com permeabilidade semelhante e duas impermeáveis com vento normal às fachadas impermeáveis.
- **δpe manual** – Coeficiente de Pressão Exterior manual. Introduzir manualmente um valor de δpe . Este comando é opcional. O δpe como referido em 4.1.2.3, pode ser de dois tipos: global ou local. Em certas zonas restritas desenvolvem-se ações importantes com coeficientes de pressão exterior diferentes dos das ações globais. Estas pressões localizadas devem ser tidas em conta no dimensionamento de janelas, se tal for mais desfavorável, o que nem sempre se verifica. Note-se que o valor mais desfavorável entre todas as combinações de δpe corresponde

a -1,2. É dada a oportunidade ao utilizador de poder usar qualquer δ_{pe} , em particular os valores de δ_{pe} globais, definindo a direção e a face do edifício onde o vento incide. Em resumo, esta opção pretende oferecer maior grau de precisão ao utilizador na execução do dimensionamento.

1 - Cálculo da Pressão de Cálculo - P (Pa)			
h' (m)	Preencher com "x", apenas uma combinação.		Resultados
	Rug. I	Rug. II	
Zona A			
Zona B			Velocidade - v (m/s)
Relações Geométricas Do Edifício			Pressão Dinâmica do Vento - w (Pa) #VALUE!
		Preencher com "x", apenas uma célula	5
h/b ≤ 0,5	1 < a/b ≤ 1,5		δpe Manual
	1,5 < a/b ≤ 4		
0,5 < h/b ≤ 1,5	1 < a/b ≤ 1,5		δpe
	1,5 < a/b ≤ 4		FALSE
1,5 < h/b ≤ 6	1 < a/b ≤ 1,5		δpi
	1,5 < a/b ≤ 4		FALSE
Permeabilidade de Fachadas		Preencher com "x", apenas uma célula	δpe-δpi=δp
Quatro Fachadas de Igual Permeabilidade			
Duas Fachadas Opostas de Permeabilidade e Semelhante e Duas Fachadas Impermeáveis	Vento Normal às fachadas Permeáveis		δp final
	Vento Tangente às fachadas Permeáveis		0
			P [Pa]
			#VALUE!

Fig.41 – Preenchimento das células da Folha de Cálculo “1- Ação do Vento”

Algumas informações sobre a obtenção dos dados de saída da presente folha de cálculo são apresentadas:

- **v [m/s]** - Velocidade de Rajada do Vento. O parâmetro é obtido em função da altura do envidraçado (h'), da zona do território e do tipo de rugosidade aerodinâmica.
- **w [Pa]** – Pressão Dinâmica do Vento. O parâmetro é calculado em função da velocidade.
- **δpe** – Coeficiente de Pressão Exterior. O parâmetro é obtido com base no tipo de relação geométrica do edifício definido. Os valores tomados para este coeficiente são explicitados no quadro 47.

- δp_i – Coeficiente de Pressão Interior. O seu valor é dado pela definição do tipo de permeabilidade de fachada do edifício.
- δp - Coeficiente de Pressão. O parâmetro é dado pela subtração do coeficiente de pressão exterior com o coeficiente de pressão interior ($\delta p_e - \delta p_i = \delta p$).
- δp final – Coeficiente de Pressão Final. Este parâmetro é o coeficiente de pressão final a ser usado no cálculo da pressão. O seu valor corresponde ao valor máximo que δp pode tomar usando no seu próprio cálculo δp_e ou δp_e manual.
- **P [Pa]** – Pressão de cálculo. O parâmetro é obtido em função da pressão dinâmica do vento (w) e do coeficiente de pressão final (δp final).

Quadro 65 – Relações geométricas e correspondentes valores de δp_e usados na folha de cálculo “1 – Ação do Vento”

Relações Geométricas		δp_e
h/b ≤ 0,5	1 < a/b ≤ 1,5	-0,8
	1,5 < a/b ≤ 4	-1
0,5 < h/b ≤ 1,5	1 < a/b ≤ 1,5	-1,1
	1,5 < a/b ≤ 4	-1,1
1,5 < h/b ≤ 6	1 < a/b ≤ 1,5	-1,2
	1,5 < a/b ≤ 4	-1,2

São resumidos na figura 42 quais os dados de entrada introduzidos e quais os dados de saída obtidos na folha de cálculo.

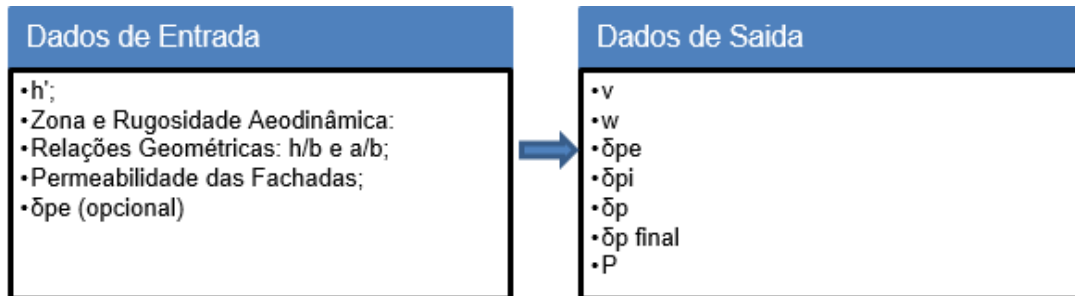


Fig.42 – Dados de entrada e saída da Folha de Cálculo “1-Ação do Vento”

5.3.2.2 Folha de Cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”

A folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos” tem como propósito o cálculo do produto $e_1 \times c$, e o preenchimento de um quadro que apurará quais os fatores corretivos a serem usados no cálculo de e_R adiante na próxima folha de cálculo. O preenchimento da folha de cálculo implica o seguimento das instruções ilustradas na figura 43, numeradas de 1 a 5:

1. Preencher com apenas um “x” uma das duas opções relativas à localização do vidro no edifício. O propósito desta instrução é apurar se o fator de redução, c , será aplicado.
2. Introduzir as dimensões do envidraçado, l e L . Sendo l a menor dimensão e L a maior dimensão.
3. Preencher com “x” para vidro isolante (ϵ_1) **apenas** se o envidraçado em questão se tratar de um vidro duplo;

4. Na possibilidade de o envidraçado em questão conter um ou dois vidros laminados (ϵ_2), preencher com um “x” a célula correspondente à sua tipologia, para cada vidro. Note-se, portanto, que se o envidraçado não apresentar qualquer tipo de vidro laminado não será necessário preencher qualquer célula. Por outro lado, no caso de apresentar somente um vidro laminado será necessário apenas preencher com um “x” a célula correspondente à sua tipologia na primeira coluna (Vidro nº 1), deixando a segunda coluna em branco (Vidro nº 2).
5. Selecionar com um ou vários “x” todas os tipos de vidro presentes no envidraçado, para todos os vidros monolíticos ou lâminas de vidro laminado de forma a obter o fator corretivo, ϵ_3 , máximo.

2.1 - Determinação Do Produto ($e_1 \times c$), para um Vidro Rectangular apoiado em toda a periferia.			
Localização do Vidro	Preencher com "x", apenas uma célula		
Vidro exterior em P/C, com parte superior a menos de 6 m de altura do chão exterior.			1
Outra Localização			
	Preencher!!		
L (Maior Dimensão Do Vidro Rectangular) (m)			2
I (Menor Dimensão Do Vidro Rectangular) (m)			
	Não Preencher!!		
L/I	#DIV/0!		
S (Área do Vidro) m ²	0,00		
P (Pa)	0,00		
e_1	#DIV/0!		
$e_1 \cdot c$	#DIV/0!		
2.2 - Factores Corretivos.		Preencher apenas com um "x", para (ϵ_1). Para (ϵ_2) preencher com apenas um "x" para cada vidro , o . Para (ϵ_3), preencher um ou vários "x" consoante o caso nos dois vidros.	
		Preencher com "x" caso se trate de um vidro duplo.	
Vidro Isolante (ϵ_1)	Dois Produtos Vidreiros (Vidro Duplo) (1 caixa de ar)	x	3
Vidro Laminado (ϵ_2)	3 Componentes de Vidro ou mais	Vidro laminado nº 1	4
	2 Componentes de Vidro	Vidro laminado nº 2	
Vidro Laminado de Segurança (ϵ_2)	4 componentes de Vidro ou mais		4
	3 Componentes de Vidro		
	2 Componentes de Vidro		4
		Vidro nº 1 e nº 2. Preencher com um ou vários "x"	
Vidros Simples Monolíticos (ϵ_3)	Vidro Impresso Armado		5
	Vidro Recozido Aramado		
	Vidro Estirado		
	Vidro Impresso		
	Vidro Recozido		
	Vidro Termo-Endurecido Esmaltado		
	Vidro Borossilicato		
	Vidro Termo-Endurecido		
	Vidro Esmaltado Temperado		
	Vidro Impresso Temperado		
Vidro Temperado			
Vidro Borossilicato Temperado			
Vidro Temperado Quimicamente			

Fig.43 – Preenchimento das células da Folha de Cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”

Algumas notas e considerações sobre os dados de entrada são apresentadas de seguida:

- **Fator de Redução, c** – É um elemento do produto $e_1 \times c$. O fator toma os seguintes valores: 1 ou 0,9. Ele só é verdadeiramente aplicado se o envidraçado se localizar em rés-do-chão e a menos de 6 m do solo exterior, desta forma o seu valor é igual a 0,9.

- **L e l [m]** – Maior dimensão e menor dimensão do envidraçado, respetivamente. Introduzir manualmente os seus valores nas células destinadas ao efeito.
- **Natureza e Tipologia do Envidraçado** – Será necessário preencher a tabela da presente folha de cálculo, identificada por 2.2 – Fatores Corretivos, de forma a apurar quais os fatores corretivos a utilizar. Primeiramente é pedido que se identifique o vidro como simples ou duplo, de forma a obter o fator corretivo, ϵ_1 . A norma francesa apresenta a opção de um vidro isolante triplo, porém, não foi levada em conta esta opção dado que se encontra fora do domínio de aplicação. Na definição do fator corretivo, ϵ_2 , é pedido que para cada vidro laminado seja definida a sua tipologia, assim, para cada vidro, apenas é indicado preencher com um “x” uma célula da respetiva coluna. No caso do fator corretivo, ϵ_3 , é indicado preencher com “x” as células respetivas a todas as naturezas presentes no envidraçado, portanto, na definição do fator corretivo, ϵ_3 , o utilizador poderá preencher com “x” mais do que uma célula da coluna respetiva.

Um pequeno número de notas e informações acerca dos dados de saída são apresentados de seguida:

- **L / l** – Quociente entre a maior e menor dimensão do vidro. Define qual a expressão a utilizar no cálculo da espessura de cálculo, e_l .
- **S [m²]** – Área do envidraçado. Resultado do produto da maior e menor dimensão do envidraçado ($S = L \times l$). A área do envidraçado, S , dependendo do valor de L/l , pode ser um elemento interveniente no cálculo da espessura de cálculo, e_l .
- **e1 [mm]** – Espessura de Cálculo. A sua expressão de cálculo depende do valor de L/l . A pressão de cálculo, a menor dimensão do envidraçado, l , ou a área do envidraçado, S , são intervenientes no seu cálculo.
- **e1 x c [mm]** - Produto entre Espessura de Cálculo e Fator de Redução. O seu valor representa a mínima espessura que a metodologia considera suficiente para o envidraçado resistir mecanicamente às solicitações ao longo da vida.
- **Fatores Corretivos ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3** . São definidos em função da tipologia e natureza do envidraçado. Serão utilizados no cálculo da espessura equivalente, e_R , efetuado na folha de cálculo “3 – Verificações”.
- **Espessura Mínima dada por limitações dimensionais em função de l e S [mm]**. A espessura mínima final é a maior das duas espessuras dadas em função de l e S . Esta espessura é utilizada na verificação das limitações dimensionais a que apenas os vidros monolíticos estão sujeitos. Esta verificação ocorre apenas na folha de cálculo “3-Verificação”. A zona da folha de cálculo destinada à definição desta espessura mínima é apresentada na figura 44. A figura mostra as células preenchidas por defeito, com todas as espessuras mínimas iguais a 3 mm.

Não preencher!!!	Limitação Dimensional, Definição da Espessura mínima
Espessura Mínima em Função de l	3
Espessura Mínima em Função de S	3
Espessura Mínima Final	3

Fig.44 – Zona Destinada à Definição de Espessuras Mínima dadas pelas Limitações Dimensionais

São sumarizados na figura 45 quais os dados de entrada introduzidos e quais os dados de saída obtidos na folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”.

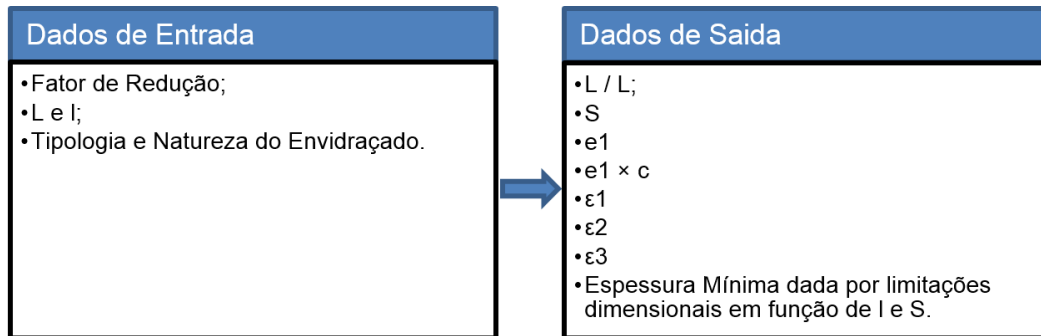


Fig.45 – Dados de entrada e saída da Folha de Cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”

5.3.2.3 Folha de Cálculo “3 - Verificações”

Na folha de cálculo denominada “3 – Verificações”, o processo de dimensionamento é concluído. Todos os parâmetros de saída obtidos anteriormente são utilizados de forma direta ou indireta nas duas verificações efetuadas: a verificação à resistência mecânica (ação do vento) e a verificação da limitação dimensional, aplicável apenas a vidros simples monolíticos.

O preenchimento da folha de cálculo “3 – Verificações” apenas requer a execução da instrução número 1, exposta inferiormente (ver figura 46):

1. Introduzir as espessuras nominais nas células destinadas ao efeito. A folha de cálculo permite o cálculo da espessura equivalente de cinco tipos de vidro. O utilizador apenas necessita de introduzir as espessuras nominais para o tipo de envidraçado pretendido.

Os dados de entrada necessários na presente folha de cálculo são:

- **e_i , e_j , e_k e e_l [mm]**– Espessuras Nominais dos Vidros. Os parâmetros e_i e e_j , são espessuras destinadas a vidros monolíticos, enquanto, e_k e e_l são espessuras destinadas a vidros laminados.

Os dados de saída obtidos nesta folha são explicitados de seguida, juntamente com algumas considerações consideradas pertinentes:

- **e_{k_corr} , e_{l_corr} , e_{k_corr} e e_{l_corr} [mm]** – Espessuras Mínimas de Fabricação de Vidros. Os parâmetros e_{i_corr} e e_{j_corr} , são espessuras destinadas a vidros monolíticos, enquanto, e_{k_corr} e e_{l_corr} são espessuras destinadas a vidros laminados. Estas espessuras são necessárias ao cálculo da espessura equivalente, e_R . O uso deste tipo de espessura, ao invés da espessura nominal, fornece maior segurança ao dimensionamento. O cálculo das espessuras mínimas de fabricação é dado em função das espessuras nominais, a sua fundamentação é dada em 4.1.3.4.
- **Limitação Dimensional - Verificado / Não Verificado.** É feita uma verificação dos limites dimensionais apenas aplicável a vidros monolíticos. A condição é verificada se a espessura nominal do vidro monolítico simples, e_i , for superior à espessura mínima final, a maior das duas espessuras dadas em função de l e S , definida na folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”. As limitações dimensionais não se encontram satisfeitas enquanto as palavras “Não Verificado” surjam. O utilizador deve aumentar a espessura nominal do vidro até que a condição seja satisfeita e a palavra “Verificado” surja.

- e_R [mm]** – Espessura Equivalente. A expressão de cálculo da espessura equivalente varia consoante o tipo de envidraçado que se pretenda dimensionar. Os tipos de envidraçado considerados são: o vidro simples monolítico, o vidro simples laminado, o vidro isolante duplo seja ele com dois componentes monolíticos, com um componente monolítico e outro laminado, ou com ambos os componentes laminados. No cálculo da espessura equivalente são intervenientes os fatores corretivos, ϵ_1 , ϵ_2 , e ϵ_3 , e as espessuras mínimas de fabricação.
- Resistência Mecânica - Verificado / Não Verificado.** O dimensionamento mecânico é concluído. São comparados os valores da espessura equivalente, e_R , e do produto $eI \times c$, de acordo com a expressão 8. O vidro está apto mecanicamente quando a palavra “Verificado” surge. Se as palavras a surgirem forem “Não Verificado”, o utilizador deve aumentar as espessuras nominais do vidro, até a palavra “Verificado” surgir. No caso dos vidros simples monolíticos, o vidro só está verdadeiramente apto quando é a sua resistência mecânica é verificada e as limitações dimensionais aplicáveis são respeitadas.

3 - Verificações											
Tipo de Vidro	Vidro nº 1		Vidro nº2		Limit. Dimensional, Espessura min. [mm]	Fatores Corretivos			Verificação da Resistência Mecânica		
Vidro Monolítico Simples	ei [mm]	ei_corr [mm]			Não Verificado	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$eI \cdot c$	e_R	#VALUE!
Vidro Laminado Simples	ek [mm]	ek_corr [mm]			Não Aplicável	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$eI \cdot c$	e_R	#VALUE!
Vidro Duplo (2 x Monolítico)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ej [mm]	ej_corr [mm]	Não Aplicável	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$eI \cdot c$	e_R	#VALUE!
Vidro Duplo (Monolítico + Laminado)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ek [mm]	ek_corr [mm]	Não Aplicável	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$eI \cdot c$	e_R	#VALUE!
Vidro Duplo (2 x Laminado)	ek [mm]	ek_corr [mm]	el [mm]	el_corr [mm]	Não aplicável	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$eI \cdot c$	e_R	#VALUE!

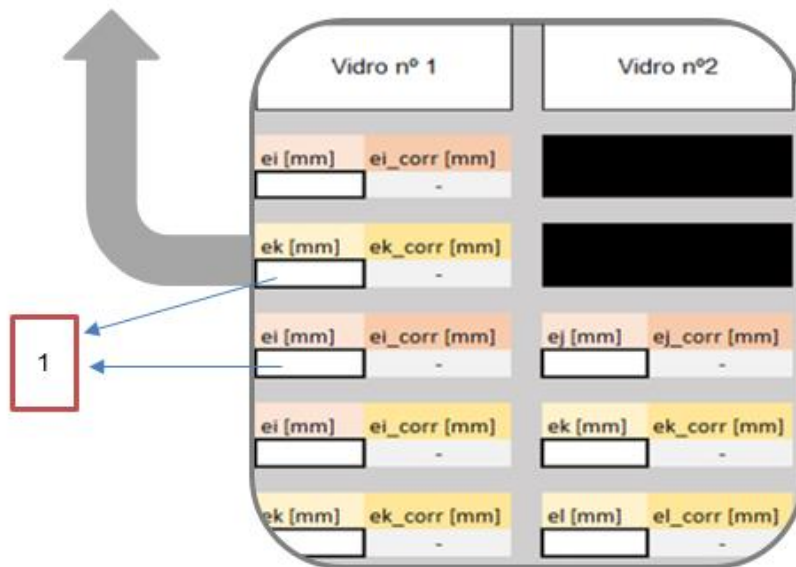


Fig.46 – Preenchimento das células da Folha de Cálculo “3 - Verificações”

São definidos na figura 47 quais os dados de entrada introduzidos e quais os dados de saída obtidos na folha de cálculo “3 - Verificações”.

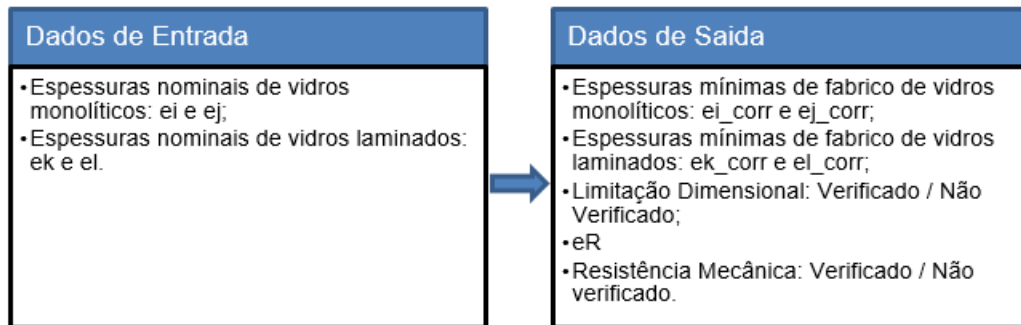


Fig.47 – Dados de entrada e saída da Folha de Cálculo “3 - Verificações”

5.3.3 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO

5.3.3.1 Introdução

Neste subcapítulo serão apresentados dois exemplos de utilização do livro de cálculo “Dimensionamento Mecânico 2016” para dois envidraçados, que aguardam verificação mecânica. O primeiro envidraçado é denominado de envidraçado “P” (ver figura 48). O segundo envidraçado trata-se do envidraçado “N”, anteriormente sujeito a pré-dimensionamento.

5.3.3.1 Envidraçado “P”

As informações referentes ao envidraçado “P”, nomeadamente, o tipo de edifício e sua localização, são puramente hipotéticos, e encontram-se expostas no quadro 66. O envidraçado “P” não foi sujeito a pré-dimensionamento. Escolheu-se fazer esta verificação mecânica de maneira a exemplificar o uso, e melhor entender as funcionalidades do livro de cálculo “Dimensionamento Mecânico 2016”.

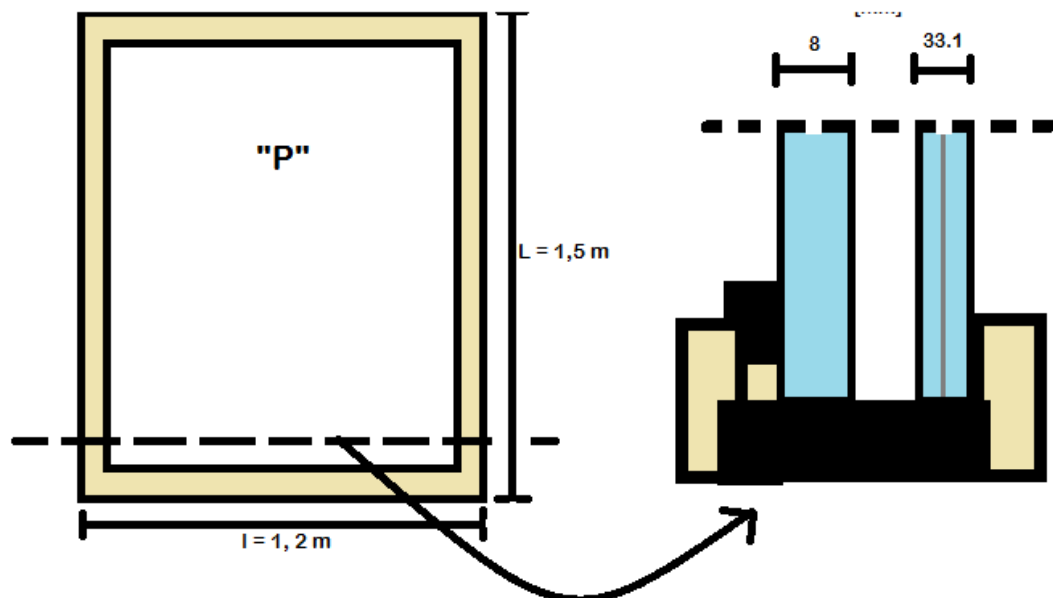


Fig.48 – Esquema em planta e corte do envidraçado “P”

Quadro 66 – Informações referentes ao envidraçado “P” e edifício a aplicar no exemplo de utilização

Envidraçado “P”	
Tipo de Envidraçado	Vidro Duplo (Monolítico mais Laminado de Segurança).
	1º Vidro (exterior): Vidro recozido 8 mm
	2º Vidro (interior): Vidro laminado 33.1 mm. Composto por duas lâminas, uma de natureza recozida e outra temperada. A espessura do vidro laminado é de aproximadamente 6 mm, desprezando a espessura do PVB ($33.1 = 3+3+1 \times \text{PVB}$).
	Dimensões do Envidraçado: $1,5 \times 1,2$. ($L=1,5$ m; $l=1,2$ m).
Edifício	Localização: Zona B e Rugosidade Aerodinâmica Tipo I. Cidade de Braga: a mais de 5 Km do mar, numa zona onde edifícios de médio e grande porte predominam.
	Altura do Envidraçado: $h' = 40$ m; Fator de Redução: Outra Localização.
	Relações Geométricas: $0,5 < h/b \leq 1,5$; $1 < a/b \leq 1,5$;
	Permeabilidade das Fachadas: duas fachadas opostas de permeabilidade semelhante e duas fachadas impermeáveis com vento normal às fachadas permeáveis.

A figura 49 mostra a folha de cálculo “1 – Ação do Vento” já devidamente preenchida com os dados de entrada e os dados de saída calculados. Para este feito, é inserido o valor referente à altura do envidraçado, e são selecionadas as opções condizentes com o exemplo no que diz respeito à zona do território, à rugosidade, às relações geométricas do edifício e ao tipo de permeabilidade. Note-se que neste exemplo optou-se por não se usar a funcionalidade de δp manual.

No final do preenchimento da primeira folha de cálculo, procede-se ao preenchimento da segunda folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”. No início do preenchimento é assinalada a opção “Outra Localização”, de forma concordante com o exemplo de utilização, para definir o não uso do fator de redução, c . Seguidamente são introduzidas as dimensões do envidraçado. De seguida é preenchida a tabela referente à tipologia do envidraçado e à natureza dos vidros envolvidos. É ilustrado na figura 50 e na figura 51 o correto preenchimento da folha para o exemplo de utilização descrito.

A figura 52 é exposta, apenas a título demonstrativo, de maneira ao utilizador ter perceção desta funcionalidade, na eventualidade de desejar proceder ao dimensionamento de um vidro monolítico simples, dado que estas limitações dimensionais apenas se aplicam a esse tipo de vidros. Na figura 52 então é mostrada uma espessura final, que dadas as dimensões do envidraçado e suas características obedece às limitações dimensionais.

1 - Cálculo da Pressão de Cálculo - P (Pa)			
h' (m)	Preencher com "x", apenas uma combinação.		Resultados
40	Rug. I	Rug. II	
Zona A			Velocidade - v (m/s) 44,6
Zona B	x		Pressão Dinâmica do Vento - w (Pa) 1218,8
Relações Geométricas Do Edifício		Preencher com "x", apenas uma célula	
h/b ≤ 0,5	1 < a/b ≤ 1,5		δpe Manual
	1,5 < a/b ≤ 4		
0,5 < h/b ≤ 1,5	1 < a/b ≤ 1,5	x	δpe -1,1
	1,5 < a/b ≤ 4		δpi 0,2
1,5 < h/b ≤ 6	1 < a/b ≤ 1,5		δpe-δpi=δp -1,3
	1,5 < a/b ≤ 4		
Permeabilidade de Fachadas		Preencher com "x", apenas uma célula	
Quatro Fachadas de Igual Permeabilidade			
Duas Fachadas Opostas de Permeabilidade e Semelhante e Duas Fachadas Impermeáveis	Vento Normal às fachadas Permeáveis	x	δp final 1,3
	Vento Tangente às fachadas Permeáveis		P [Pa] 1584

Fig.49 – Introdução de dados de entrada na folha de cálculo “Ação do vento” e obtenção dos dados de saída

2.1 - Determinação Do Produto (e1 x c), para um Vidro Rectangular apoiado em toda a periferia.	
Localização do Vidro	Preencher com "x", apenas uma célula
Vidro exterior em R/C, com parte superior a menos de 6 m de altura do chão exterior.	
Outra Localização	x
	Preencher!!
L (Maior Dimensão Do Vidro Rectangular) (m)	1,50
l (Menor Dimensão Do Vidro Rectangular) (m)	1,20
	Não Preencher!!
L/l	1,25
S (Área do Vidro) m ²	1,80
P (Pa)	1584,49
e1	5,34
e1 * c	5,34

Fig.50 – Preenchimento da folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos” e obtenção de alguns dados de saída. Parte 1.

2.2 - Factores Corretivos.		Preencher apenas com um "x", para (ε1). Para (ε2) preencher com apenas um "x" para cada vidro, o . Para (ε3), preencher um ou vários "x" consoante o caso nos dois vidros.	
		Preencher com "x" caso se trate de um vidro duplo.	
Vidro Isolante (ε1)	Dois Produtos Vidreiros (Vidro Duplo) (1 caixa de ar)	x	
		Vidro laminado nº 1	Vidro laminado nº 2
Vidro Laminado (ε2)	3 Componentes de Vidro ou mais		
	2 Componentes de Vidro		
Vidro Laminado de Segurança (ε2)	4 componentes de Vidro ou mais		
	3 Componentes de Vidro		
	2 Componentes de Vidro		x
		Vidro nº 1 e nº 2. Preencher com um ou vários "x"	
Vidros Simples Monolíticos (ε3)	Vidro Impresso Aramado		
	Vidro Recozido Aramado		
	Vidro Estirado		
	Vidro Impresso		
	Vidro Recozido		x
	Vidro Termo-Endurecido Esmaltado		
	Vidro Borossilicato		
	Vidro Termo-Endurecido		
	Vidro Esmaltado Temperado		
	Vidro Impresso Temperado		
	Vidro Temperado		x
	Vidro Borossilicato Temperado		
Vidro Temperado Quimicamente			

Fig.51 – Preenchimento da tabela referente à Tipologia do Envidraçado e Natureza dos seus Componentes da folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”. Parte 2.

Não preencher!!!	Limitação Dimensional, Definição da Espessura mínima
Espessura Mínima em Função de l	5
Espessura Mínima em Função de S	3
Espessura Mínima Final	5

Fig.52 – Espessuras Mínimas que respeitam as Limitações Dimensionais.

Finalizado o preenchimento da segunda folha de cálculo procede-se ao preenchimento da última folha de cálculo “3 – Verificações”. Na folha de cálculo são exibidos cinco tipos de envidraçado, para efetuar o preenchimento da folha, o utilizador deve apenas introduzir o valor das espessuras nas células associadas ao tipo de envidraçado em estudo. O tipo de envidraçado tratado neste exemplo de utilização é um vidro duplo constituído por um vidro laminado e um vidro monolítico. A figura 53 demonstra o correto preenchimento da folha de cálculo para o envidraçado em questão.

3 - Verificações											
Tipo de Vidro	Vidro nº 1		Vidro nº2		Limit. Dimensional, Espessura min. [mm]	Fatores Corretivos			Verificação da Resistência Mecânica		
Vidro Monolítico Simples	ei [mm]	ei_corr [mm]			Não Verificado	ε1	ε2	ε3	e1 * c	e R	#VALOR!
		-						1	5,3	#VALOR!	#VALOR!
Vidro Laminado Simples	ek [mm]	ek_corr [mm]			Não Aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	e R	#VALOR!
		-					1,3	1	5,3	#VALOR!	#VALOR!
Vidro Duplo (2 x Monolítico)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ej [mm]	ej_corr [mm]	Não Aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	e R	#VALOR!
		-		-		1,6		1	5,3	#VALOR!	#VALOR!
Vidro Duplo (Monolítico + Laminado)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ek [mm]	ek_corr [mm]	Não Aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	e R	Verificado
	8,0	7,7	6,0	5,8		1,6	1,3	1	5,3	8,8	
Vidro Duplo (2 x Laminado)	ek [mm]	ek_corr [mm]	ei [mm]	ei_corr [mm]	Não aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	e R	#VALOR!
		-		-		1,6	0,65	1			#VALOR!

Vidro Duplo (Monolítico + Laminado)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ek [mm]	ek_corr [mm]
	8,0	7,7	6,0	5,8

ε1	ε2	ε3	e1 * c	e R	Verificado
1,6	1,3	1	5,3	8,8	

Fig.53 – Preenchimento da folha “3 – Verificações” para o exemplo de utilização

Como pode ser comprovado pela figura 53, o envidraçado é considerado mecanicamente apto segundo a metodologia abordada.

5.3.3.2 Envidraçado “N”

O envidraçado “N”, ilustrado na figura 54, foi pré-dimensionado anteriormente utilizando ábacos de pré-dimensionamento. Para este envidraçado, pretendia-se conhecer quais as dimensões máximas do envidraçado, estando já definido que a relação entre o lado maior e menor, L/l , seriam superiores a 2,5.

O tipo de vidro, a espessura e a pressão foram previamente definidas, tendo o pré-dimensionamento apontado para que o valor máximo da menor dimensão do vidro, l , fosse de aproximadamente 1 metro.

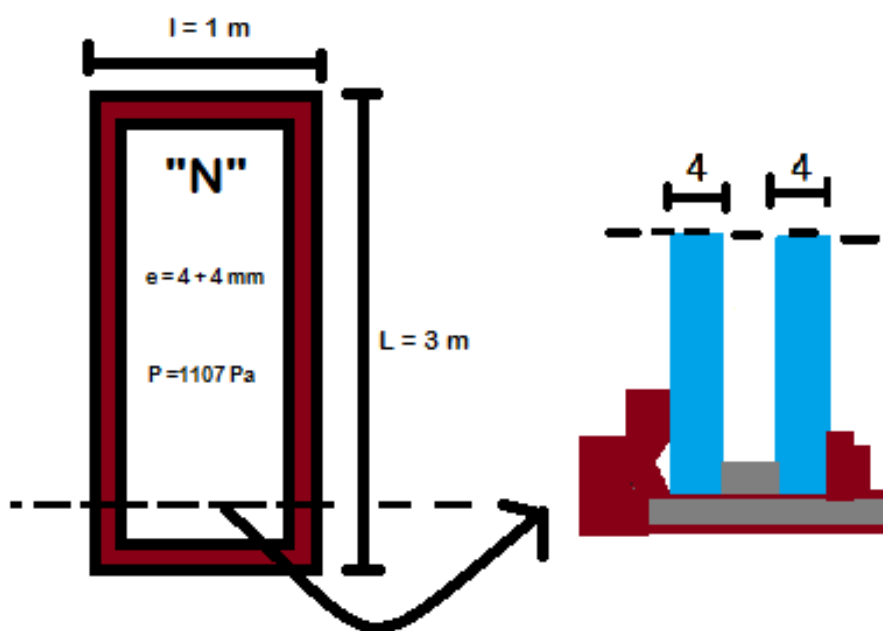


Fig.54 – Esquema do Envidraçado "N" em corte e em planta

As informações relativas ao envidraçado "N" são sumarizadas no quadro 67.

Quadro 67 – Informações Relativas ao Envidraçado "N"

Envidraçado "N"	
Tipo de Envidraçado	Vidro Duplo (Monolítico + Monolítico).
	1º Vidro (exterior): Vidro recozido 4 mm
	2º Vidro (interior): Vidro recozido 4 mm
	Dimensões do Envidraçado: 3×1 . ($L=3$ m; $l=1$ m). Nota: pretendia-se maximizar a área de envidraçado, no entanto foi considerado que uma maior dimensão de vidro igual a 3m, seria suficiente.
Edifício (P=1107 Pa)	Localização: Zona A e Rugosidade Aerodinâmica Tipo I. Cidade de Lisboa: a 2 Km do mar, numa zona onde edifícios de médio e grande porte predominam.
	Altura do Envidraçado: $h' = 25$ m; Fator de Redução: Outra Localização.
	Relações Geométricas: $0,5 < h/b \leq 1,5$; $1 < a/b \leq 1,5$;
	Permeabilidade das Fachadas: duas fachadas opostas de permeabilidade semelhante e duas fachadas impermeáveis com vento normal às fachadas permeáveis.
	Comprova-se no cálculo da figura 55 uma pressão muito próxima de 1100 Pa, utilizada por ocasião do pré-dimensionamento

1 - Cálculo da Pressão de Cálculo - P (Pa)			
h' (m)	Preencher com "x", apenas uma combinação.		Resultados
25	Rug. I	Rug. II	
Zona A	x		Velocidade - v (m/s) 37,3
Zona B			Pressão Dinâmica do Vento - w (Pa) 851,2
Relações Geométricas Do Edifício		Preencher com "x", apenas uma célula	
h/b ≤ 0,5	1 < a/b ≤ 1,5		δpe Manual
	1,5 < a/b ≤ 4		
0,5 < h/b ≤ 1,5	1 < a/b ≤ 1,5	x	δpe -1,1
	1,5 < a/b ≤ 4		δpi 0,2
1,5 < h/b ≤ 6	1 < a/b ≤ 1,5		δpe-δpi-δp -1,3
	1,5 < a/b ≤ 4		
Permeabilidade de Fachadas		Preencher com "x", apenas uma célula	
Quatro Fachadas de Igual Permeabilidade			
Duas Fachadas Opostas de Permeabilidade e Semelhante e Duas Fachadas Impermeáveis	Vento Normal às fachadas Permeáveis	x	δp final 1,3
	Vento Tangente às fachadas Permeáveis		P [Pa] 1107

Fig.55 – Pressão de cálculo do Envidraçado “N” – Folha de cálculo “1 – Ação do Vento”

A espessura de cálculo, e_1 , é calculada na figura 56, após o preenchimento das células referentes às dimensões do vidro, e seleção da condição de não uso de fator de redução (Outra Localização).

2.1 - Determinação Do Produto ($e_1 \times c$), para um Vidro Rectangular apoiado em toda a periferia.	
Localização do Vidro	Preencher com "x", apenas uma célula
Vidro exterior em R/C, com parte superior a menos de 6 m de altura do chão exterior.	
Outra Localização	x
	Preencher!!
L (Maior Dimensão Do Vidro Rectangular) (m)	3,00
l (Menor Dimensão Do Vidro Rectangular) (m)	1,00
	Não Preencher!!
L/l	3,00
S (Área do Vidro) m ²	3,00
P (Pa)	1106,62
e1	5,28
e1 * c	5,28

Fig.56 – Cálculo de e_1 para envidraçado “N” – “Folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”

Os fatores de equivalência a usar no cálculo da espessura equivalente, e_R , são apurados através do preenchimento da tabela ilustrada na figura 57. São selecionadas as opções de vidro isolante e vidro recozido para os fatores ϵ_1 e ϵ_3 , respetivamente.

2.2 - Factores Corretivos.		Preencher apenas com um "x", para (ϵ_1). Para (ϵ_2) preencher com apenas um "x" para cada vidro, o . Para (ϵ_3), preencher um ou vários "x" consoante o caso nos dois vidros.	
		Preencher com "x" caso se trate de um vidro duplo.	
Vidro Isolante (ϵ_1)	Dois Produtos Vidreiros (Vidro Duplo) (1 caixa de ar)	x	
		Vidro laminado nº 1	Vidro laminado nº 2
Vidro Laminado (ϵ_2)	3 Componentes de Vidro ou mais		
	2 Componentes de Vidro		
Vidro Laminado de Segurança (ϵ_2)	4 componentes de Vidro ou mais		
	3 Componentes de Vidro		
	2 Componentes de Vidro		
		Vidro nº 1 e nº 2. Preencher com um ou vários "x"	
Vidros Simples Monolíticos (ϵ_3)	Vidro Impresso Aramado		
	Vidro Recozido Aramado		
	Vidro Estirado		
	Vidro Impresso		
	Vidro Recozido	x	
	Vidro Termo-Endurecido Esmaltado		
	Vidro Borossilicato		
	Vidro Termo-Endurecido		
	Vidro Esmaltado Temperado		
	Vidro Impresso Temperado		
Vidro Temperado			
Vidro Borossilicato Temperado			
Vidro Temperado Quimicamente			

Fig.57 – Apuramento de Fatores de Equivalência para o envidraçado N – “Folha de cálculo “2 - ‘e1 x c’ e F. Corretivos”

Finalmente, são inseridas na última folha de cálculo as espessuras nominais, nas células respetivas à tipologia de vidro apropriada (vidro duplo constituído por dois vidros monolíticos), como se apresenta na figura 58.

3 - Verificações											
Tipo de Vidro	Vidro nº 1		Vidro nº2		Limit. Dimensional, Espessura min. [mm]	Fatores Corretivos			Verificação da Resistência Mecânica		
Vidro Monolítico Simples	ei [mm]	ei_corr [mm]			Não Verificado	ε1	ε2	ε3	e1 * c	eR	#VALOR!
		-						1	5,3	#VALOR!	#VALOR!
Vidro Laminado Simples	ek [mm]	ek_corr [mm]			Não Aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	eR	#VALOR!
		-					0	1	5,3	#VALOR!	#VALOR!
Vidro Duplo (2 x Monolítico)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ej [mm]	ej_corr [mm]	Não Aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	eR	Verificado
	4,0	3,9	4,0	3,9		1,6		1	5,3	5,4	
Vidro Duplo (Monolítico + Laminado)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ek [mm]	ek_corr [mm]	Não Aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	eR	#VALOR!
						1,6	0	1			#VALOR!
Vidro Duplo (2 x Laminado) (LL)	ek [mm]	ek_corr [mm]	ei [mm]	ei_corr [mm]	Não aplicável	ε1	ε2	ε3	e1 * c	eR	#VALOR!
						1,6	0	1			#VALOR!

Vidro Duplo (2 x Monolítico)	ei [mm]	ei_corr [mm]	ej [mm]	ej_corr [mm]
	4,0	3,9	4,0	3,9

ε1	ε2	ε3	e1 * c	eR	Verificado
1,6		1	5,3	5,4	

Fig.58 – Verificação Mecânica do Envidraçado “N” – Folha de Cálculo “3 -Verificações”

Como podemos comprovar pela observação da figura 58, o envidraçado “N” encontra-se bem dimensionado do ponto de vista da resistência mecânica.

De notar que a espessura equivalente, e_R , é pouco superior à espessura de cálculo, e_1 . Isto deve-se à maximização da área do envidraçado pedida, que sendo satisfeita levaria qualquer solução ao limite entre ser ou não validada. Conclui-se assim para este caso a concordância da grandeza valores entre os ábacos de pré-dimensionamento e o livro de cálculo apresentados.

O quadro 68 sintetiza os resultados decorrentes da análise dos envidraçados “N” e “P”.

Quadro 68 – Resumo dos resultados obtidos para os envidraçados “P” e “N”

Envidraçado	Tipo de Vidro	Pressão [Pa]	Espessura [mm]	Dimensões [m] x [m]	$e_1 \times c$ [mm]	e_R [mm]	Resultado
P	ML	1584	8(12)33.1	1,5 x 1,2	5,3	8,8	Verificado
N	MM	1107	4(12)4	3 x 1	5,3	5,4	Verificado

6

**DIMENSIONAMENTO AO CHOQUE
TÉRMICO, APLICAÇÃO PRÁTICA****6.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA**

Neste capítulo são dados dois exemplos de vidros duplos que quebram devido a tensões de origem térmica. Para os dois envidraçados será aplicada a metodologia de dimensionamento ao choque térmico abordada em 4.2, com o intuito de verificar a incapacidade do vidro na resistência às tensões de origem térmica.

Para cada envidraçado serão explicitadas todas as suas características necessárias ao processo de dimensionamento. O processo de cálculo que leva à verificação da aptidão do vidro contra a quebra causada por choque térmico, será dividido em três passos. Estes serão numerados de seguida e esquematizados nas figuras 59, 60 e 61:

1. Cálculo da diferença de temperatura máxima admissível (ver figura 59);
2. Cálculo de ht , tendo em vista o cálculo das temperaturas das zonas do vidro (ver figura 60);
3. Apuramento da maior diferença de temperatura e verificação ao choque térmico (ver figura 61);

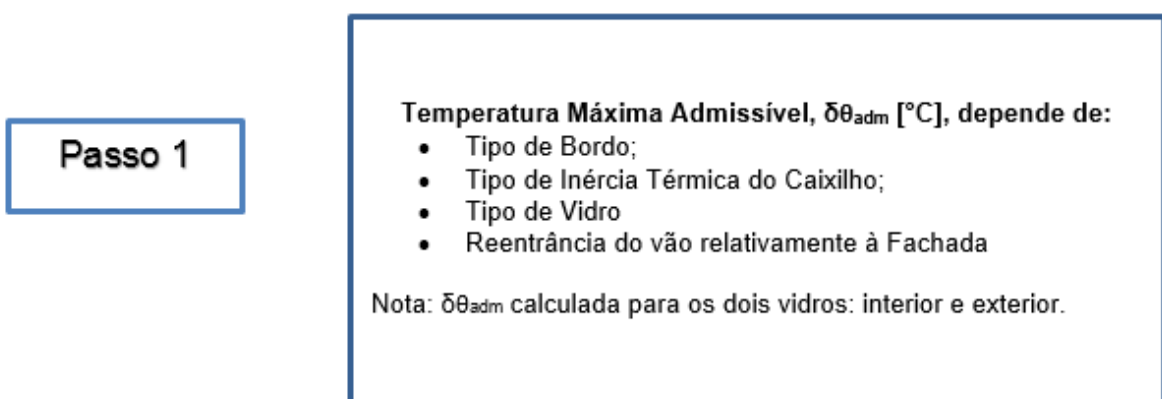


Fig.59 – Passo 1 do Processo de Cálculo utilizado no Capítulo 6

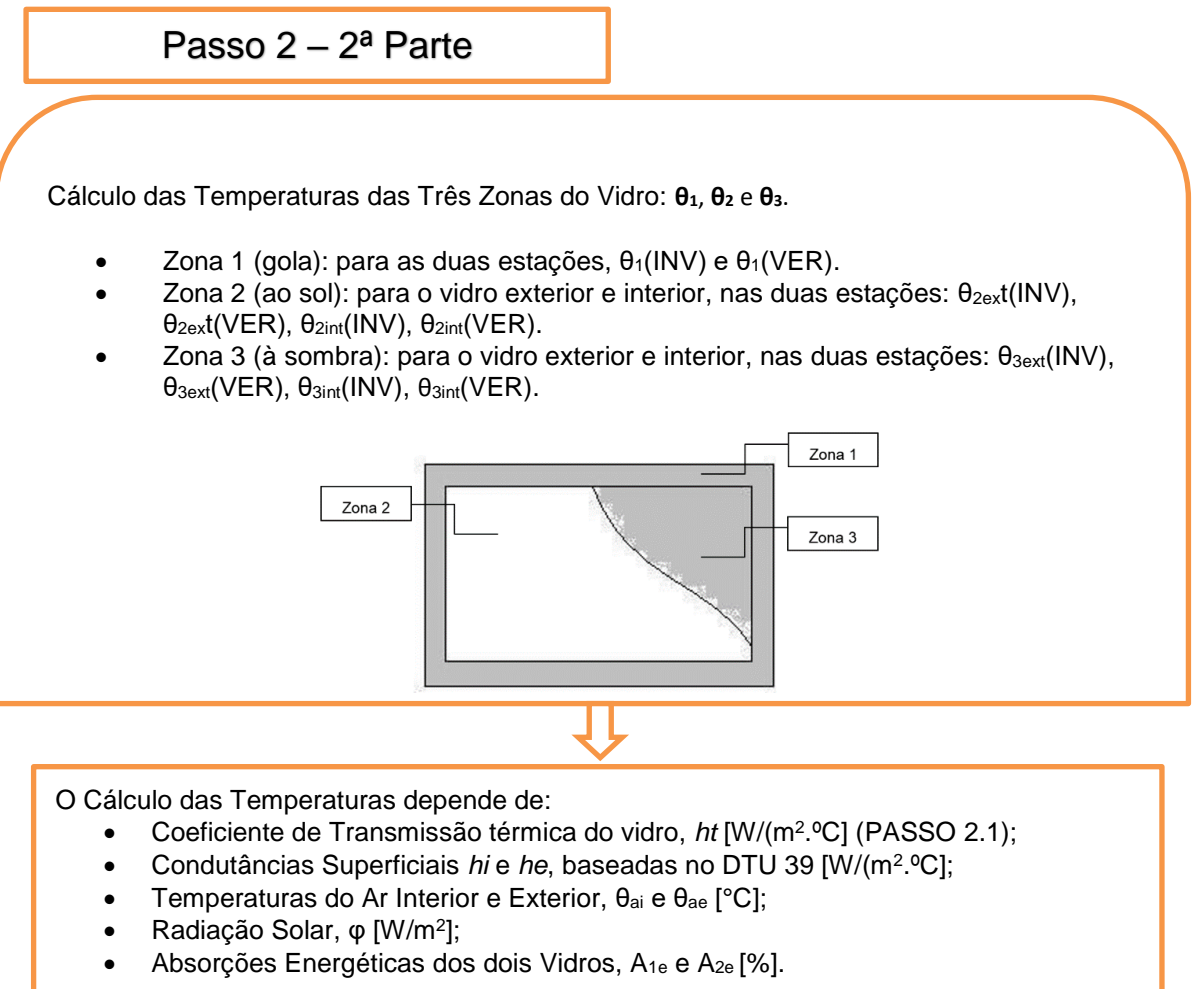
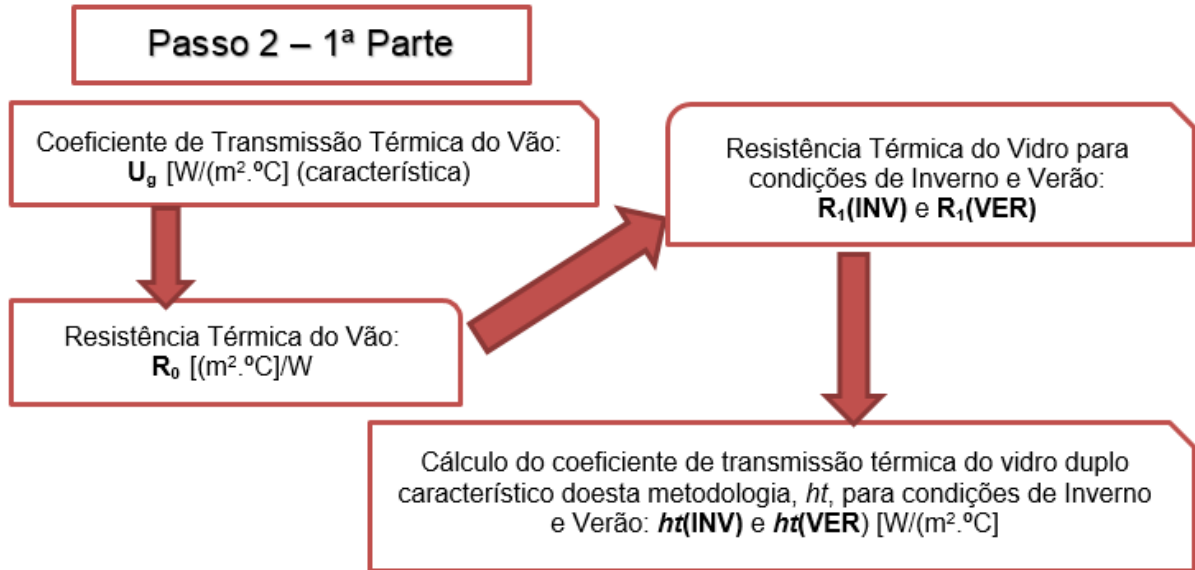


Fig.60 - Passo 2 do Processo de Cálculo utilizado no Capítulo 6

Passo 3

- Cálculo de Diferenças de Temperatura entre as zonas 2 e 1 e entre a zonas 3 e 2 para os dois vidros e as duas estações, $(\theta_2-\theta_1)$ e $(\theta_2-\theta_3)$.
- Para cada vidro e cada estação é seleccionada a maior diferença de temperatura, $\delta\theta$.
- É comparado para cada vidro a sua maior diferença de temperatura, $\delta\theta$, com a diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, calculada no Passo 1.
- A validação ocorre se a maior diferença de temperatura, $\delta\theta$, for **menor ou igual** à diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$.

Fig.61 – Passo 3 do Processo de Cálculo utilizado no Capítulo 6

6.2. ENVIDRAÇADO A

6.2.1. INTRODUÇÃO

O envidraçado “A”, é um vidro duplo composto por um vidro recozido incolor exterior e um vidro laminado interior. Está localizado num edifício com vãos reentrantes, situado no Porto. O envidraçado está orientado em alguns casos a Este e noutros a Oeste.

Este envidraçado sofreu rotura devido a choque térmico, como se observa na figura 62. O objetivo é verificar pela metodologia apresentada, se de fato, o envidraçado corria o risco de quebrar devido ao choque térmico.

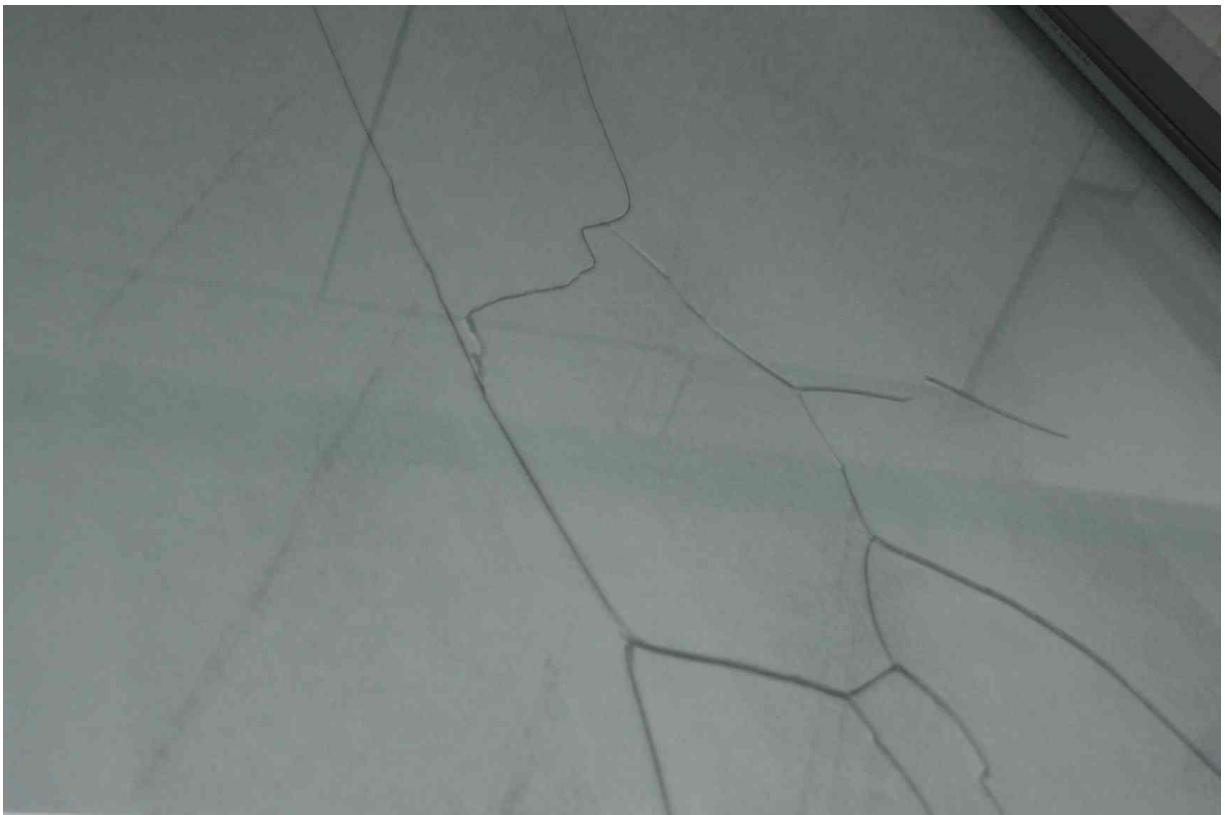


Fig.62 – Envidraçado “A” após quebra causada por choque térmico

Uma particularidade deste envidraçado é o facto de o vidro interior apresentar a face voltada para o espaço de ar pintada com uma cor escura (ver figura 63). Desta forma, neste dimensionamento foi adotado para este vidro um coeficiente de absorção energética de cerca de 60 % para o vidro interior ($A_{2e} \approx 0,6$).

Mais informações relativas ao envidraçado A são oferecidas de seguida:

- Vidro Interior: laminado recozido 44.1 mm (aproximadamente 8mm de espessura), bordo em bruto, cortado de forma simétrica, absorção energética (A_{e2}) = 0,6.
- Vidro Exterior: recozido incolor (8 mm de espessura), bordo em bruto, absorção energética (A_{e1}) = 0,12.
- Outras Informações: vão reentrante relativamente à fachada, caixilho de Vidro Exterior Colado (VEC) que apresenta inércia térmica de classe fraca, zona climática de Inverno: I2 (Porto), coeficiente de transmissão térmica do vão (U_g) = 2,8 W/(m².°C).

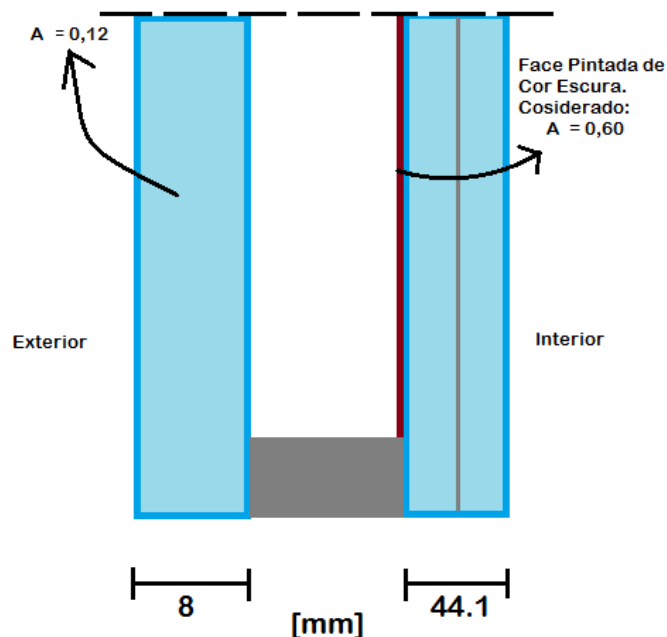


Fig.63 – Esquema em Corte do Envidraçado “A”

6.2.2. TEMPERATURA MÁXIMA ADMISSÍVEL DO ENVIDRAÇADO

Segundo a metodologia apresentada em 4.2, primeiramente iremos calcular para este tipo de envidraçado qual a diferença de temperatura admissível, $\delta\theta_{adm}$ à qual não ocorre quebra devido a choque térmico, segundo a expressão 45:

$$\delta\theta_{adm} = \frac{k_v \times \sigma_{vm}}{k_t \times 6,48 \times 10^5} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (45)$$

O coeficiente k_v depende do tipo de acabamento do bordo do vidro. Para o vidro exterior monolítico o vidro apresenta um coeficiente de k_v igual a 1, devido ao bordo não ser polido. O vidro interior laminado apresenta um bordo bruto cortado de forma simétrica, e assim o coeficiente k_v igual a 0,75.

O coeficiente σ_{vm} depende do tipo de vidro (recozido, temperado, termo-endurecido, etc.) que os vidros apresentam. Este envidraçado é apenas constituído por vidros recozidos quer no vidro monolítico quer no vidro laminado, assim o coeficiente σ_{vm} apresenta o valor de 20 MPa.

O valor de k_t considerado é de 0,9. Este valor corresponde a uma situação de vão reentrante relativamente à fachada na presença de uma caixilharia com inércia térmica fraca.

Procedendo ao cálculo da temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, conclui-se que os vidros apresentam os mesmos coeficientes, excetuando o coeficiente k_v . Desta forma os dois vidros apresentarão dois valores diferentes de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$. Substituindo na expressão 45 os parâmetros pelos valores considerados, são apresentadas as expressões que levam ao cálculo da temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, para os dois vidros.

- Vidro Exterior:

$$\delta\theta_{adm} = \frac{1 \times 20 \times 10^6}{0,9 \times 6,48 \times 10^5} = 34,29 \text{ °C} \quad (100)$$

- Vidro Interior:

$$\delta\theta_{adm} = \frac{0,75 \times 20 \times 10^6}{0,9 \times 6,48 \times 10^5} = 25,72 \text{ °C} \quad (101)$$

Para o vidro exterior monolítico, dada a sua natureza e características, a sua diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, é de sensivelmente 34,3°C, enquanto que para o vidro interior laminado, a temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, é de sensivelmente 25,7°C.

6.2.3. TEMPERATURAS DAS ZONAS DE VIDRO

6.2.3.1. Introdução

Serão calculadas as temperaturas para cada zona de vidro, como definido em 4.2.2. O cálculo será feito tanto para condições de Inverno como de Verão. As temperaturas calculadas para a zona 1 (zona da gola) são iguais para o mesmo vidro. O mesmo não acontece para as zonas 2 e 3 onde para cada vidro as temperaturas são calculadas de maneira diferente.

No final serão calculadas as diferenças de temperatura entre as zonas 2 e 3 e entre as zonas 2 e 1, já que o cálculo da diferença de temperatura entre as zonas 1 e 3 resultaria numa diferença de temperatura, em todas as condições, efetivamente menor do que as outras duas.

Este processo resultará no cálculo de oito diferenças de temperaturas distintas, resultado de diferença de temperaturas de duas zonas, de dois tipos de condições (Verão e Inverno) e de dois vidros (interior e exterior).

6.2.3.2. Cálculo do parâmetro ht

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica considerado para o cálculo das temperaturas das zonas 2 e 3, ht , depende primeiramente do coeficiente de transmissão térmica do vidro, U_g cujo valor é de 2,8 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

O coeficiente ht terá diferentes valores dependendo da estação para a qual a verificação ocorre. Desta forma são expostos os passos do cálculo de 1 a 9, de forma sequencial, no quadro 69, até atingirmos os valores de ht a usar em condições de Verão e Inverno:

Quadro 69 – Cálculo de ht do envidraçado “A”

1 – Coeficiente de Transmissão Térmica do Vão, U_g.	$U_g = 2,8 [W/m^2 \cdot ^\circ C]$	
2 – Expressão de Cálculo da Resistência Térmica do Vão, R_0.	$R_0 = \frac{1}{U_g} - 0,17 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$	(41)
3 – Cálculo de R_0.	$R_0 = \frac{1}{2,8} - 0,17 = 0,1871 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$	(102)
4 – Expressão de Cálculo da Resistência Térmica do Vidro para condições de Inverno, $R_1(INV)$.	$R_1(INV) = 0,92 \times R_0 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$	(39)
5 - Cálculo de $R_1(INV)$.	$R_1(INV) = 0,92 \times 0,1871 = 0,1721 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$	(103)
6 - Expressão de Cálculo da Resistência Térmica do Vidro para condições de Verão, $R_1(VER)$.	$R_1(VER) = 0,78 \times R_0 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$	(40)
6 – Cálculo de $R_1(VER)$.	$R_1(VER) = 0,92 \times 2,8 = 0,1460 [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$	(104)
7 - Expressão de Cálculo do Coeficiente de Transmissão Térmica do Vidro h_t.	$h_t = \frac{1}{R_1} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	(38)
8 – Cálculo de h_t para Condições de Inverno.	$h_t(INV) = \frac{1}{0,1721} = 5,81 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$	(105)
9 – Cálculo de h_t para Condições de Verão.	$h_t(VER) = \frac{1}{0,1460} = 6,85 [W/m^2 \cdot ^\circ C]$	(106)

Os restantes parâmetros e os valores considerados para esta aplicação são definidos no quadro 70.

Quadro 70 – Parâmetros a usar no cálculo das temperaturas nas diferentes zonas do Envidraçado “A”

Parâmetro	Inverno	Verão
Coeficiente de transmissão térmica considerado. ht ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	ht (INV) = 5,81	ht (VER) = 6,85
Condutância Superficial Interior. [22] hi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	hi = 9	hi = 9
Condutância Superficial Exterior. [22] he ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	he (INV) = 11	he (VER) = 13
Temperatura do ar interior. θ_{ai} ($^\circ C$) [6]	θ_{ai} (INV) = 20	θ_{ai} (VER) = 25
Fluxo Solar Incidente, φ , (W/m^2). [6] [22] Nota: Vidro orientado a Este ou Oeste	θ_{max} (INV) = 552; (usar na zona 2) θ_{dif} (INV) = 88, (Usar na zona 3)	θ_{max} (VER) = 729; (usar na zona 2) θ_{dif} (VER) = 73; (usar na zona 3)
Temperatura do ar Exterior. θ_{ae} ($^\circ C$) [22] Nota: Zona de Inverno: I2	$\theta_{ae min}$ (INV) = -5 (Usar para zona 1); $\theta_{ae min_corrigida} = (\theta_{ae min}) + 5$ = 0 (Usar para zona 2 e 3).	$\theta_{ae max} = 45$
Absorções energéticas do vidro exterior e interior, respetivamente. A_{1e} e A_{2e} . (%)	$A_{1e} = 0,12$ e $A_{2e} = 0,6$	$A_{1e} = 0,12$ e $A_{2e} = 0,6$

6.2.3.3. Cálculo da temperatura da Zona 1 (zona da gola)

Os parâmetros envolvidos no cálculo da temperatura dos vidros na zona 1 (ver figura 64), são as condutâncias superficiais, hi e he , e as temperaturas do ar interior e exterior, θ_{ai} e θ_{ae} . Estes parâmetros adquirem diferentes valores diferentes para condições de Verão e Inverno, como já foi definido no quadro 70.

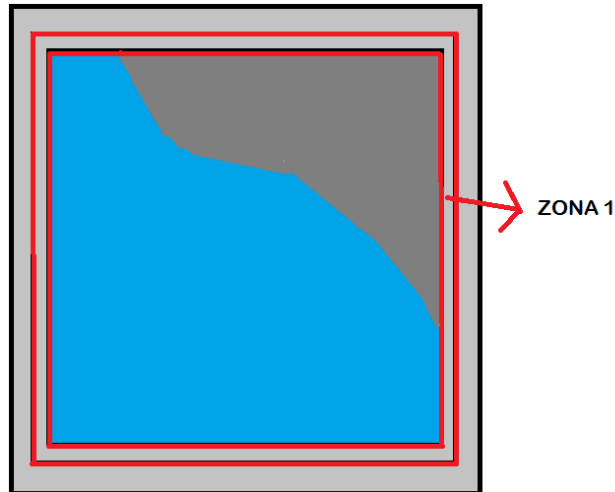


Fig.64 – Zona 1 do Vidro (Zona da Gola)

O cálculo da temperatura para a zona 1 é feito seguindo a expressão 35.

$$\theta_1 = \frac{h_i \times \theta_{ai} + h_e \times \theta_{ae}}{h_i + h_e} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (35)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 35 pelos valores presentes no quadro 70, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 2, para esta estação:

$$\theta_1(\text{INV}) = \frac{9 \times 20 + 11 \times (-5)}{9 + 11} = 6,25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (107)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 35 pelos valores respectivos do quadro 70, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 2, para esta estação:

$$\theta_1(\text{VER}) = \frac{9 \times 25 + 11 \times (45)}{9 + 11} = 36,82 \text{ }^\circ\text{C} \quad (108)$$

O valor da temperatura na zona 1 para condições de Inverno para ambos os vidros interior e exterior é de 6,25 °C. Da mesma forma, para condições de Verão o valor da temperatura é de 36,82 °C.

6.2.3.4. Cálculo da temperatura da Zona 2 (zona ao sol)

O cálculo da temperatura da zona 2, ilustrada na figura 65, processa-se de forma diferente para o vidro exterior e interior.

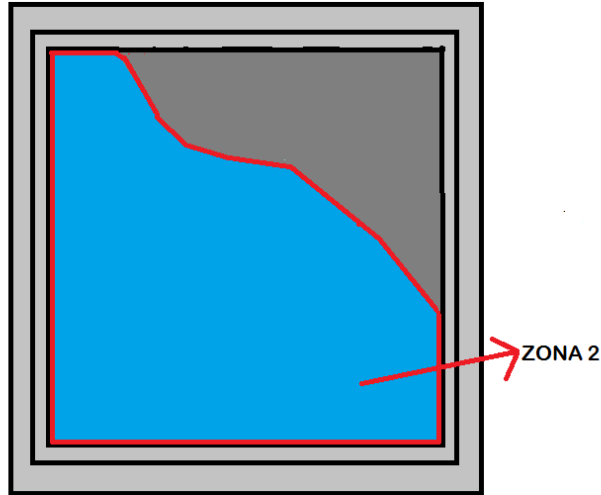


Fig.65 – Zona 2 (Zona ao Sol)

De seguida são apresentadas as expressões e cálculo que nos conduz aos valores da temperatura na zona 2 de ambos os vidros. São calculadas as temperaturas para condições de Verão e Inverno para ambos os vidros.

1. Vidro Exterior:

$$\theta_{2\ ext} = \frac{ht \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi) + (hi + ht) \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi)}{(hi + ht) \times (he + ht) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (36)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 36 pelos valores explícitos no quadro 70, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{2\ ext}(INV) = \frac{5,81 \times (9 \times 20 + 0,6 \times 552) + (9 + 5,81) \times (11 \times (0) + 0,12 \times 552)}{(9 + 5,81) \times (11 + 5,81) - (5,81)^2} = 18,36^{\circ}C \quad (109)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 36 pelos valores presentes no quadro 70, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{2\ ext}(VER) = \frac{6,85 \times (9 \times 25 + 0,6 \times 729) + (9 + 6,85) \times (13 \times 45 + 0,12 \times 729)}{(9 + 6,85) \times (13 + 6,85) - (6,85)^2} = 56,77^{\circ}C \quad (110)$$

2. Vidro Interior:

$$\theta_{2\ int} = \frac{ht \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi) + (he + ht) \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi)}{(h_i + h_t) \times (h_e + h_t) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (37)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 37 pelos valores presentes no quadro 70, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{2\text{int}}(INV) = \frac{5,81 \times (11 \times 0 + 0,12 \times 552) + (11 + 5,81) \times (9 \times 20 + 0,6 \times 552)}{(9 + 5,81) \times (11 + 5,81) - (5,81)^2} = 41,72^{\circ}\text{C} \quad (111)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 37 pelos valores presentes no quadro 70, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{2\text{int}}(VER) = \frac{6,85 \times (13 \times 45 + 0,12 \times 729) + (13 + 6,85) \times (9 \times 25 + 0,6 \times 729)}{(9 + 6,85) \times (13 + 6,85) - (6,85)^2} = 66,32^{\circ}\text{C} \quad (112)$$

No quadro 71 são sintetizadas as temperaturas da zona 2, para os vidros interior e exterior, nas duas condições climáticas consideradas.

Quadro 71 – Temperaturas da Zona 2 do Envidraçado “A”

	Exterior	Interior
Inverno	18,36°C	41,72°C
Verão	56,77°C	66,32°C

6.2.3.5. Cálculo da temperatura da Zona 3 (zona à sombra)

O cálculo da temperatura na zona 3 (zona do vidro à sombra – ver figura 66) processa-se de forma diferente para o vidro exterior e interior. O seu cálculo é muito semelhante ao cálculo da temperatura na zona 2. A única alteração que ocorre é a tomada dos valores de radiação solar difusa, θ_{dif} , para o parâmetro de fluxo solar incidente, ϕ , em vez dos valores de radiação solar máxima, θ_{max} .

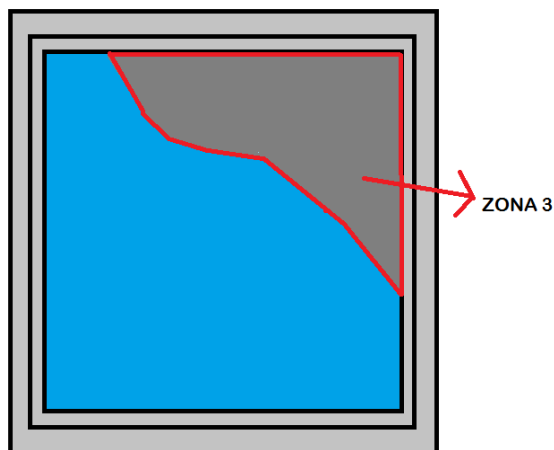


Fig.66 – Zona 3 (Zona à Sombra)

De seguida são apresentadas as expressões e os cálculos que nos conduzem aos valores de temperatura na zona 3 de ambos os vidros, para condições de Verão e Inverno para ambos os vidros.

1. Vidro Exterior:

$$\theta_{3\ ext} = \frac{ht \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi) + (hi + ht) \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi)}{(hi + ht) \times (he + ht) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (113)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 113 pelos valores explícitos no quadro 70, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{3\ ext}(INV) = \frac{5,81 \times (9 \times 20 + 0,6 \times 88) + (9 + 5,81) \times (11 \times (0) + 0,12 \times 88)}{(9 + 5,81) \times (11 + 5,81) - (5,81)^2} = 7,01 \text{ } ^{\circ}C \quad (114)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 113 pelos valores presentes no quadro 70, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{3\ ext}(VER) = \frac{6,85 \times (9 \times 25 + 0,6 \times 73) + (9 + 6,85) \times (13 \times 25 + 0,12 \times 73)}{(9 + 6,85) \times (13 + 6,85) - (6,85)^2} = 42,03 \text{ } ^{\circ}C \quad (115)$$

2. Vidro Interior:

$$\theta_{3\ int} = \frac{ht \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi) + (he + ht) \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi)}{(hi + ht) \times (he + ht) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (116)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 116 pelos valores presentes no quadro 70, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{3\ int}(INV) = \frac{5,81 \times (11 \times (0) + 0,12 \times 88) + (11 + 5,81) \times (9 \times 20 + 0,6 \times 88)}{(9 + 5,81) \times (11 + 5,81) - (5,81)^2} = 18,47 \text{ } ^{\circ}C \quad (117)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 116 pelos valores presentes no quadro 70, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{3\ int}(VER) = \frac{6,85 \times (13 \times 45 + 0,12 \times 73) + (13 + 6,85) \times (9 \times 25 + 0,6 \times 73)}{(9 + 6,85) \times (13 + 6,85) - (6,85)^2} = 35,13 \text{ } ^{\circ}C \quad (118)$$

No quadro 72 são apresentadas as temperaturas da zona 3, para os vidros interior e exterior, nas duas condições climáticas consideradas.

Quadro 72 – Temperaturas da Zona 3 do Envidraçado “A”

	Exterior	Interior
Inverno	7,01°C	18,47°C
Verão	42,03°C	35,13°C

6.2.4. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO

São arranjadas no quadro 73 todas as temperaturas calculadas neste subcapítulo para as três diferentes zonas do vidro.

Quadro 73 – Temperaturas do Envidraçado “A” (Orientação E/W)

Estação	Zona do Vidro	Vidro Exterior	Vidro Interior
Inverno	θ_1 (Zona 1 – “gola”)	6,25°C	6,25°C
	θ_2 (Zona 2 – “ao sol”)	18,36°C	41,72°C
	θ_3 (Zona 3 – “à sombra”)	7,01°C	18,47°C
Verão	θ_1 (Zona 1 – “gola”)	36,82°C	36,82°C
	θ_2 (Zona 2 – “ao sol”)	56,77°C	66,32°C
	θ_3 (Zona 3 – “à sombra”)	42,03°C	35,13°C

Procede-se ao cálculo das diferenças de temperatura entre as zonas 1 e 2 e entre as zonas 2 e 3, como apresentado no quadro 74 (condições de Inverno) e no quadro 75 (condições de Verão).

Quadro 74 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “A”, condições de Inverno

Diferença de Temperatura	Vidro Exterior	Vidro Interior
$\theta_2 - \theta_1$ (°C)	18,36 - 6,25 = 12,11°C	41,72 - 6,25 = 35,47°C
$\theta_2 - \theta_3$ (°C)	18,36 - 7,01 = 11,35°C	41,72 - 18,47 = 23,25°C
$\delta\theta$ (°C)	12,11°C	35,47°C
$\delta\theta_{adm}$ (°C)	34,29°C	25,72°C
Comentário Final	Verificado.	Não verificado.

Quadro 75 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “A”, condições de Verão

Diferença de Temperatura	Vidro Exterior	Vidro Interior
$\theta_2 - \theta_1$ (°C)	56,77 – 36,82 = 19,95°C	66,32 – 36,82 = 29,25°C
$\theta_2 - \theta_3$ (°C)	56,77 – 42,03 = 14,03°C	66,32 – 35,13 = 31,29°C
$\delta\theta$ (°C)	19,95°C	31,29°C
$\delta\theta_{adm}$ (°C)	34,29°C	25,72°C
Comentário Final	Verificado.	Não verificado.

Após o cálculo das diferenças de temperatura ($\theta_2 - \theta_1$ e $\theta_2 - \theta_3$), destas duas é selecionada a maior diferença de temperatura, definida como $\delta\theta$, para cada vidro em cada estação. Esta diferença de temperatura ($\delta\theta$) representa então segundo a metodologia, a maior diferença de temperatura que o vidro sofre em dada estação.

Posteriormente a maior diferença de temperatura, $\delta\theta$, é comparada com a diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, segundo a condição 42.

$$\delta\theta \leq \delta\theta_{adm} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (42)$$

Desta forma, se o valor da maior diferença de temperatura, $\delta\theta$, for menor ou igual à diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, o vidro em questão não apresenta risco de quebra por choque térmico, segundo o modelo seguido.

Se tal condição não se verificar para dado vidro, ele irá apresentar risco de quebra por choque térmico.

Para ambas as estações, o envidraçado “A” apresenta risco de quebra por choque térmico no vidro interior. Note-se, o vidro que apresenta maior absorção energética.

6.3. ENVIDRAÇADO B

6.3.1. INTRODUÇÃO

O envidraçado “B”, é um vidro duplo composto por dois vidros laminados, compostos apenas e só por lâminas de vidro de natureza recozida (ver figura 67).

Ele está localizado num edifício com vãos reentrantes, orientado a Sudeste, situado em Braga.

Mais informações relativas ao envidraçado “B” são oferecidas de seguida:

- Vidro Interior: laminado recozido 44.2 mm (aproximadamente 8mm de espessura), bordo em bruto, cortado de forma simétrica, absorção energética (A_{e2}) = 0,06.
- Vidro Exterior: laminado recozido 64.2 mm (aproximadamente 10 mm de espessura), bordo em bruto, cortado de forma simétrica, absorção energética (A_{e1}) = 0,32.

- Outras Informações: vão reentrante relativamente à fachada, caixilho tipo VEC de inércia térmica de classe fraca, zona climática de Inverno: I2 (Braga), coeficiente de transmissão térmica do vidro ($U_g = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$).

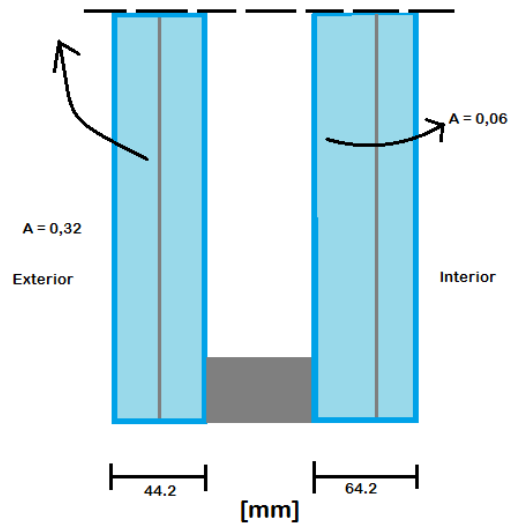


Fig.67 – Esquema em corte do Envidraçado "B"

Tal como sucedeu com o envidraçado "A", o envidraçado "B" também sofreu quebra devido ao choque térmico (ver figura 68). Utilizando a metodologia apresentada neste trabalho, será feita a verificação da resistência térmica do vidro, com o intuito de comprovar se o modelo utilizado aponta para a inaptidão do vidro a resistir às tensões de origem térmica do vidro atuantes.

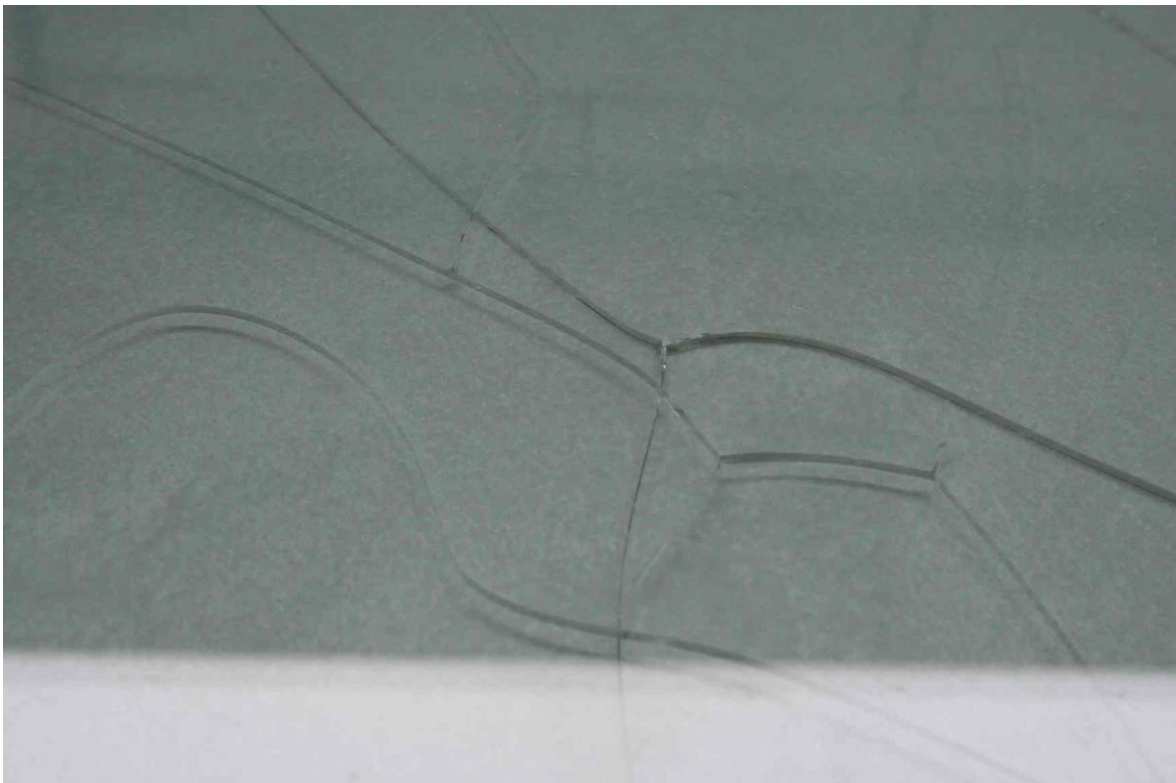


Fig.68 – Envidraçado "B" após quebra causada por choque térmico

6.3.2. TEMPERATURA MÁXIMA ADMISSÍVEL DO ENVIDRAÇADO

Segundo a metodologia apresentada em 4.2, primeiramente iremos calcular a diferença de temperatura admissível, $\delta\theta_{adm}$, à qual não ocorre quebra devido ao choque térmico, segundo a expressão 45:

$$\delta\theta_{adm} = \frac{k_v \times \sigma_{vm}}{k_t \times 6,48 \times 10^5} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (45)$$

O coeficiente k_v depende do tipo de acabamento do bordo do vidro. Ambos os vidros apresentam o mesmo tipo de bordo bruto (não polido), e são cortados de forma simétrica. Assim o coeficiente k_v é igual a 0,75.

O coeficiente σ_{vm} depende do tipo de vidro (recozido, temperado, termo-endurecido, etc.) presente. Este envidraçado é apenas constituído por vidros recozidos em ambos os vidros, assim o coeficiente σ_{vm} apresenta o valor de 20 MPa.

O valor de k_t considerado é de 0,9. O valor corresponde a uma situação de vão reentrante relativamente à fachada na presença de uma caixilharia com inércia térmica fraca.

Procedendo ao cálculo da temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, conclui-se que os vidros apresentam os mesmos coeficientes. Desta forma os dois painéis apresentarão os mesmos valores de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$. Substituindo na expressão 45 com os valores considerados, é apresentado o cálculo da temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, para os dois vidros.

$$\delta\theta_{adm} = \frac{0,75 \times 20 \times 10^6}{0,9 \times 6,48 \times 10^5} = 25,72 \text{ }^\circ\text{C} \quad (119)$$

Para ambos os vidros, dadas as suas características, as suas diferenças de temperatura máximas admissíveis, $\delta\theta_{adm}$, são de sensivelmente 25,7°C.

6.3.3. TEMPERATURAS DAS ZONAS DE VIDRO

6.3.3.1. Introdução

O processo de cálculo das temperaturas das três zonas do vidro é exatamente igual ao que foi mostrado em 6.1.3. para o envidraçado “A”, seguindo a metodologia definida em 4.2.

Naturalmente, muitos dos parâmetros necessários ao cálculo irão apresentar valores diferentes devido, nomeadamente, à alteração da orientação do envidraçado e das suas características, como as absorções energéticas dos vidros (A_{1e} e A_{2e}) e a correspondente coeficiente de transmissão térmica (U_g).

6.3.3.2. Cálculo do parâmetro ht

Relembra-se que o cálculo do coeficiente de transmissão térmica considerado para o cálculo das temperaturas das zonas 2 e 3, ht , depende primeiramente do coeficiente de transmissão térmica do vidro (U_g).

O coeficiente ht terá diferentes valores dependendo da estação para a qual a verificação ocorre. Desta forma são expostos os passos de cálculo sequenciais de 1 a 9, no quadro 56, até atingirmos os valores de ht a usar tanto em condições de Verão como de Inverno:

Quadro 76 – Cálculo de ht para o envidraçado “B”

1 – Coeficiente de Transmissão Térmica do Vão, U_g;	$U_g = 1,4 \text{ [W/m}^2\text{.}^\circ\text{C]}$	
2 – Expressão de Cálculo da Resistência Térmica do Vão, R_0;	$R_0 = \frac{1}{U_g} - 0,17 \text{ [(m}^2\text{.}^\circ\text{C)/W]}$	(41)
3 – Cálculo de R_0;	$R_0 = \frac{1}{1,4} - 0,17 = 0,5443 \text{ (m}^2\text{.}^\circ\text{C)/W}$	(120)
4 – Expressão de Cálculo da Resistência Térmica do Vidro para condições de Inverno, $R_1(\text{INV})$;	$R_1(\text{INV}) = 0,92 \times R_0 \text{ [(m}^2\text{.}^\circ\text{C)/W]}$	(39)
5 - Cálculo de $R_1(\text{INV})$;	$R_1(\text{INV}) = 0,92 \times 0,5443 = 0,5007 \text{ [(m}^2\text{.}^\circ\text{C)/W]}$	(121)
6 - Expressão de Cálculo da Resistência Térmica do Vidro para condições de Verão, $R_1(\text{VER})$;	$R_1(\text{VER}) = 0,78 \times R_0 \text{ [(m}^2\text{.}^\circ\text{C)/W]}$	(40)
6 – Cálculo de $R_1(\text{VER})$;	$R_1(\text{VER}) = 0,92 \times 2,8 = 0,4245 \text{ [(m}^2\text{.}^\circ\text{C)/W]}$	(122)
7 - Expressão de Cálculo Do Coeficiente de Transmissão Térmica do Vidro h_t;	$h_t = \frac{1}{R_1} \text{ [W/(m}^2\text{.}^\circ\text{C)]}$	(38)
8 – Cálculo de h_t para Condições de Inverno;	$h_t(\text{INV}) = \frac{1}{0,5007} = 2,00 \text{ [W/m}^2\text{.}^\circ\text{C]}$	(123)
9 – Cálculo de h_t para Condições de Verão;	$h_t(\text{VER}) = \frac{1}{0,4245} = 2,36 \text{ [W/(m}^2\text{.}^\circ\text{C)]}$	(124)

Os restantes parâmetros e os valores considerados para esta aplicação são definidos no quadro 77.

Quadro 77 – Parâmetros a usar no cálculo das temperaturas nas diferentes zonas do Envidraçado “B”

Parâmetro	Inverno	Verão
Coeficiente de transmissão térmica considerado. ht ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [22].	ht (INV) = 2,00	ht (VER) = 2,36
Condutância Superficial Interior. hi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [22].	hi = 9	hi = 9
Condutância Superficial Exterior. he ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [22].	he (INV) = 11	he (VER) = 13
Temperatura do ar interior. θ_{ai} ($^\circ C$) [6].	θ_{ai} (INV) = 20	θ_{ai} (VER) = 25
Fluxo Solar Incidente, φ , (W/m^2). [6]. Nota: Vidro orientado a Sudeste	θ_{max} (INV) = 837; (usar na zona 2) θ_{dif} (INV) = 88, (Usar na zona 3)	θ_{max} (VER) = 576; (usar na zona 2) θ_{dif} (VER) = 73; (usar na zona 3)
Temperatura do ar Exterior. θ_{ae} ($^\circ C$). [6]. Nota: Zona de Inverno I2	$\theta_{ae min}$ (INV) = -5 (Usar para zona 1); $\theta_{ae min_corrigida} = (\theta_{ae min}) + 5$ = 0 (Usar para zona 2 e 3).	$\theta_{ae max} = 45$
Absorções energéticas do vidro exterior e interior, respetivamente. A_{1e} e A_{2e} . (%)	$A_{1e} = 0,32$ e $A_{2e} = 0,06$	$A_{1e} = 0,32$ e $A_{2e} = 0,06$

6.3.3.3. Cálculo da temperatura da Zona 1 (zona da gola)

Os parâmetros envolvidos no cálculo da temperatura dos vidros na zona 1 (ver figura 64), são as condutâncias superficiais, hi e he , e as temperaturas do ar interior e exterior, θ_{ai} e θ_{ae} . Estes parâmetros adquirem diferentes valores diferentes para condições de Verão e Inverno, como já foi definido no quadro 77.

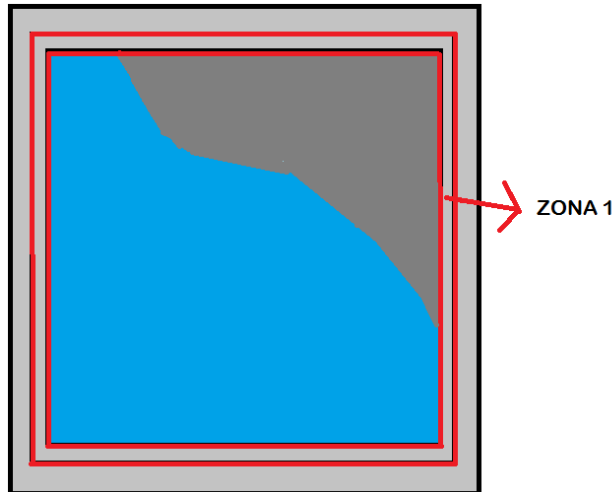


Fig.64 – Zona 1 do Vidro (Zona da Gola)

O cálculo da temperatura para a zona 1 é feito seguindo a expressão 35.

$$\theta_1 = \frac{h_i \times \theta_{ai} + h_e \times \theta_{ae}}{h_i + h_e} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (35)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 35 pelos valores presentes no quadro 77, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 2, para esta estação:

$$\theta_1(\text{INV}) = \frac{9 \times 20 + 11 \times (-5)}{9 + 11} = 6,25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (125)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 35 pelos valores no quadro 77, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 2, para esta estação:

$$\theta_1(\text{VER}) = \frac{9 \times 25 + 11 \times (45)}{9 + 11} = 36,82 \text{ }^\circ\text{C} \quad (126)$$

O valor da temperatura na zona 1 para condições de Inverno para ambos os vidros interior e exterior é de 6,25°C. Da mesma forma, para condições de Verão o valor da temperatura é de 36,82°C.

Um aspeto importante relativo às temperaturas da zona 1, é o facto do envidraçado “B”, apresentar para ambas as condições de Verão e Inverno, temperaturas efetivamente iguais às do envidraçado “A” (ver 6.2.3.3).

Isto deve-se ao facto de para esta metodologia, apenas a zona climática de Inverno influenciar os valores da temperatura da zona 1 ao nível da temperatura do ar exterior ($\theta_{ae\min}$). Dado que os restantes parâmetros são constantes para todos os envidraçados que pertençam ao domínio de aplicação da

metodologia, (condutâncias superficiais interior e exterior, temperatura do ar interior e temperatura do ar exterior em condição de Verão dada por $\theta_{ae,max}$).

Significa isto que segundo o modelo, os envidraçados que partilhem a mesma zona climática de Inverno apresentarão sempre as mesmas temperaturas para a zona 1 (zona da gola). Senão partilharem a mesma zona climática de Inverno, terão em comum ainda assim a temperatura da zona 1 para condições de Verão (ou seja, $\theta_i(VER)$ será constante).

6.3.3.4. Cálculo da temperatura da Zona 2 (zona ao sol)

O cálculo da temperatura da zona 2, ilustrada na figura 65, processa-se de forma diferente para o vidro exterior e interior.

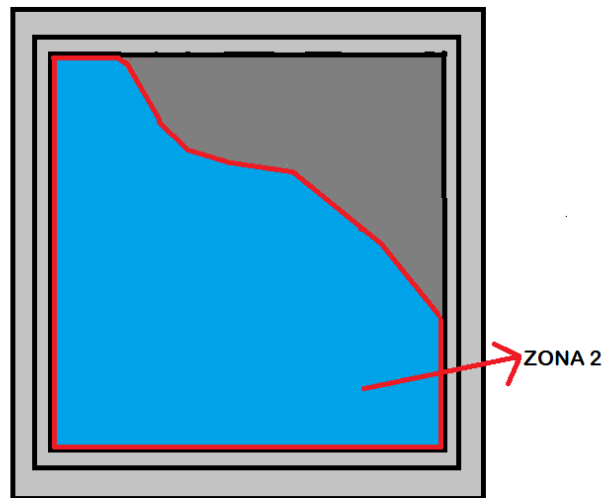


Fig.65 – Zona 2 (Zona ao Sol)

De seguida são apresentadas as expressões e cálculos que nos conduz aos valores da temperatura da zona 2 de ambos os vidros. São calculadas as temperaturas para condições de Verão e Inverno para ambos os vidros:

1. Vidro Exterior:

$$\theta_{2\ ext} = \frac{ht \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi) + (hi + ht) \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi)}{(hi + ht) \times (he + ht) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (36)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 36 pelos valores explícitos no quadro 77, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{2\ ext}(INV) = \frac{2,00 \times (9 \times 20 + 0,06 \times 837) + (9 + 2,0) \times (11 \times (0) + 0,32 \times 837)}{(9 + 2,00) \times (11 + 2,00) - (4,00)^2} = 24,51^{\circ}C \quad (127)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 36 pelos valores presentes no quadro 77, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{2\ ext}(VER) = \frac{2,36 \times (9 \times 25 + 0,06 \times 576) + (11,36) \times (13 \times 45 + 0,32 \times 576)}{(9 + 2,36) \times (13 + 2,36) - (2,36)^2} = 55,36^{\circ}C \quad (128)$$

2. Vidro Interior:

$$\theta_{2\ int} = \frac{ht \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi) + (he + ht) \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi)}{(h_i + h_t) \times (h_e + h_t) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (37)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 37 pelos valores presentes no quadro 77, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{2\ int}(INV) = \frac{2,00 \times (11 \times 0 + 0,32 \times 837) + (11 + 2,00) \times (9 \times 20 + 0,06 \times 837)}{(9 + 2,00) \times (11 + 2,00) - (2,00)^2} = 25,38^{\circ}C \quad (129)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 37 pelos valores presentes no quadro 77, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 2 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{2\ int}(VER) = \frac{2,36 \times (13 \times 45 + 0,32 \times 576) + (13 + 2,36) \times (9 \times 25 + 0,06 \times 576)}{(11,36) \times (13 + 2,36) - (2,36)^2} = 34,35^{\circ}C \quad (130)$$

No quadro 78 são apresentadas as temperaturas da zona 2, para os vidros interior e exterior, nas duas condições climáticas consideradas.

Quadro 78 – Temperaturas da Zona 2 do Envidraçado “B”

	Exterior	Interior
Inverno	24,51°C	55,36°C
Verão	25,38°C	34,35°C

6.3.3.5. Cálculo da temperatura da Zona 3 (zona à sombra)

O cálculo da temperatura na zona 3 (zona do vidro à sombra – ver figura 66) processa-se de forma diferente para o vidro exterior e interior. O seu cálculo é muito semelhante ao cálculo da temperatura na zona 2. A única alteração que ocorre é a tomada dos valores de radiação solar difusa, θ_{dif} , para o parâmetro de fluxo solar incidente, φ , em vez dos valores de radiação solar máxima, θ_{max} .

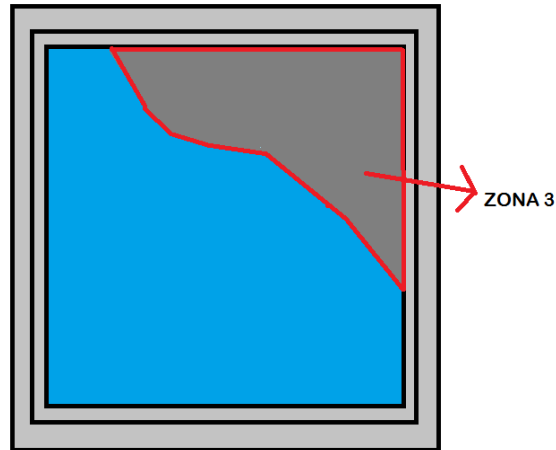


Fig.66 – Zona 3 (Zona à Sombra)

De seguida são apresentadas as expressões e os cálculos que nos conduzem aos valores de temperatura na zona 3 de ambos os vidros, para condições de Verão e Inverno para ambos os vidros.

3. Vidro Exterior:

$$\theta_{3\ ext} = \frac{ht \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi) + (hi + ht) \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi)}{(hi + ht) \times (he + ht) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (113)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 113 pelos valores explícitos no quadro 77, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{3\ ext}(INV) = \frac{2,00 \times (9 \times 20 + 0,06 \times 88) + (9 + 2,00) \times (11 \times (0) + 0,32 \times 88)}{(9 + 2,00) \times (11 + 2,00) - (2,00)^2} = 4,89 \text{ } ^{\circ}C \quad (131)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 113 pelos valores presentes no quadro 77, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro exterior, para esta estação:

$$\theta_{3\ ext}(VER) = \frac{2,36 \times (9 \times 25 + 0,06 \times 73) + (9 + 2,36) \times (13 \times 45 + 0,32 \times 73)}{(9 + 2,36) \times (13 + 2,36) - (2,36)^2} = 44,12 \text{ } ^{\circ}C \quad (132)$$

4. Vidro Interior:

$$\theta_{3\ int} = \frac{ht \times (he \times \theta_{ae} + A_{1e} \times \varphi) + (he + ht) \times (hi \times \theta_{ai} + A_{2e} \times \varphi)}{(h_i + h_t) \times (h_e + h_t) - ht^2} \quad [^{\circ}C] \quad (116)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 116 pelos valores presentes no quadro 77, para condições de Inverno, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{3\text{ int}}(INV) = \frac{2,00 \times (11 \times 0 + 0,32 \times 88) + (11 + 2,00) \times (9 \times 20 + 0,06 \times 88)}{(9 + 2,00) \times (11 + 2,00) - (2,00)^2} = 17,73^{\circ}\text{C} \quad (133)$$

Substituindo, os parâmetros da expressão 116 pelos valores presentes no quadro 77, para condições de Verão, chegamos ao valor da temperatura na zona 3 do vidro interior, para esta estação:

$$\theta_{3\text{ int}}(VER) = \frac{2,36 \times (13 \times 45 + 0,32 \times 73) + (15,36) \times (9 \times 25 + 0,06 \times 73)}{(9 + 2,36) \times (13 + 2,36) - (2,36)^2} = 29,36^{\circ}\text{C} \quad (134)$$

No quadro 59 são apresentadas as temperaturas da zona 3, para os vidros interior e exterior, nas duas condições climáticas consideradas.

Quadro 79 – Temperaturas da Zona 3 do Envidraçado “B”

	Exterior	Interior
Inverno	4,89°C	17,73°C
Verão	44,12°C	29,36°C

6.3.4 COMPILAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO

São arranjadas no quadro 80 todas as temperaturas calculadas neste subcapítulo para as três diferentes zonas do vidro.

Quadro 80 – Temperaturas do Envidraçado “B” (Orientação SE)

Estação	Zona do Vidro	Vidro Exterior	Vidro Interior
Inverno	θ_1 (Zona 1 – “gola”)	6,25°C	6,25°C
	θ_2 (Zona 2 – “ao sol”)	24,51°C	25,38°C
	θ_3 (Zona 3 – “à sombra”)	4,89°C	17,73°C
Verão	θ_1 (Zona 1 – “gola”)	36,82°C	36,82°C
	θ_2 (Zona 2 – “ao sol”)	55,36°C	34,35°C
	θ_3 (Zona 3 – “à sombra”)	44,12°C	29,36°C

Procede-se ao cálculo das diferenças de temperatura entre as zonas 1 e 2 e entre as zonas 2 e 3, como apresentado no quadro 81 (condições de Inverno) e no quadro 82 (condições de Verão).

Quadro 81 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “B”, condições de Inverno

Diferença de Temperatura	Vidro Exterior	Vidro Interior
$\theta_2 - \theta_1$ (°C)	24,51 - 6,25 = 18,26°C	25,38 - 6,25 = 19,13°C
$\theta_2 - \theta_3$ (°C)	24,51 - 4,89 = 19,62°C	25,38 - 17,73 = 7,65°C
$\delta\theta$ (°C)	19,62°C	19,13°C
$\delta\theta_{adm}$ (°C)	25,72°C	25,72°C
Comentário Final	Verificado.	Verificado.

Quadro 82 – Diferenças de Temperatura, $\delta\theta$, do Envidraçado “B”, condições de Verão

Diferença de Temperatura	Vidro Exterior	Vidro Interior
$\theta_2 - \theta_1$ (°C)	55,35 - 36,82 = 18,53°C	36,82 - 34,35 = 2,47°C
$\theta_2 - \theta_3$ (°C)	55,35 - 44,12 = 11,23°C	34,35 - 29,36 = 4,99°C
$\delta\theta$ (°C)	18,53°C	4,99°C
$\delta\theta_{adm}$ (°C)	25,72°C	25,72°C
Comentário Final	Verificado.	Verificado.

Como já explicado previamente, após o cálculo das diferenças de temperatura ($\theta_2 - \theta_1$ e $\theta_2 - \theta_3$) para cada vidro em cada estação, é selecionada a maior diferença de temperatura, $\delta\theta$. Esta diferença de temperatura $\delta\theta$, representa segundo a metodologia, a maior diferença de temperatura que o vidro sofre nesta estação.

Posteriormente a maior diferença de temperatura, $\delta\theta$, é comparada com a diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, segundo a condição 42.

$$\delta\theta \leq \delta\theta_{adm} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (42)$$

Os vidros constituintes do envidraçado “B” nunca assumem valores de diferença de temperatura superiores aos admissíveis. Assim, segundo o modelo aplicado, o envidraçado “B” não apresenta risco de quebra por choque térmico para as condições consideradas (ver quadro 81 e 82).

6.4. REFLEXÕES FINAIS

Relativamente ao envidraçado “B” foi dito inicialmente que sofrera quebra devido ao choque térmico. As conclusões retiradas pelo processo de cálculo, seguindo a metodologia apresentada, apontam para uma situação diferente de não ocorrência de quebra do vidro por choque térmico. Porque razão isto acontece?

A razão pela qual o processo de cálculo leva a uma conclusão errada tem que ver com o modelo aplicado e a sua inadequabilidade perante a situação real do envidraçado.

O modelo apresentado, baseado no DTU 39 P3 de 2012 [23], é direcionado para a aplicação a vidros duplos sem proteção solar. Esta condição não é verificada na realidade, dado que o envidraçado “B” apresenta uma proteção solar interior. Desta forma, o modelo simplificado aplicado neste capítulo, parte de pressupostos errados e a sua adaptabilidade é imperfeita.

A proteção solar é de lona em cor azul escura, regulável. Esta encontra-se muito próxima do vidro, e quando ativada, o espaço entre a proteção e o vidro interior terá muito pouca circulação de ar. A proteção solar de absorção energética elevada, conjugada com a ventilação reduzida na zona cria uma situação de sobreaquecimento que afeta o vidro interior, Δt (ver figura 69).

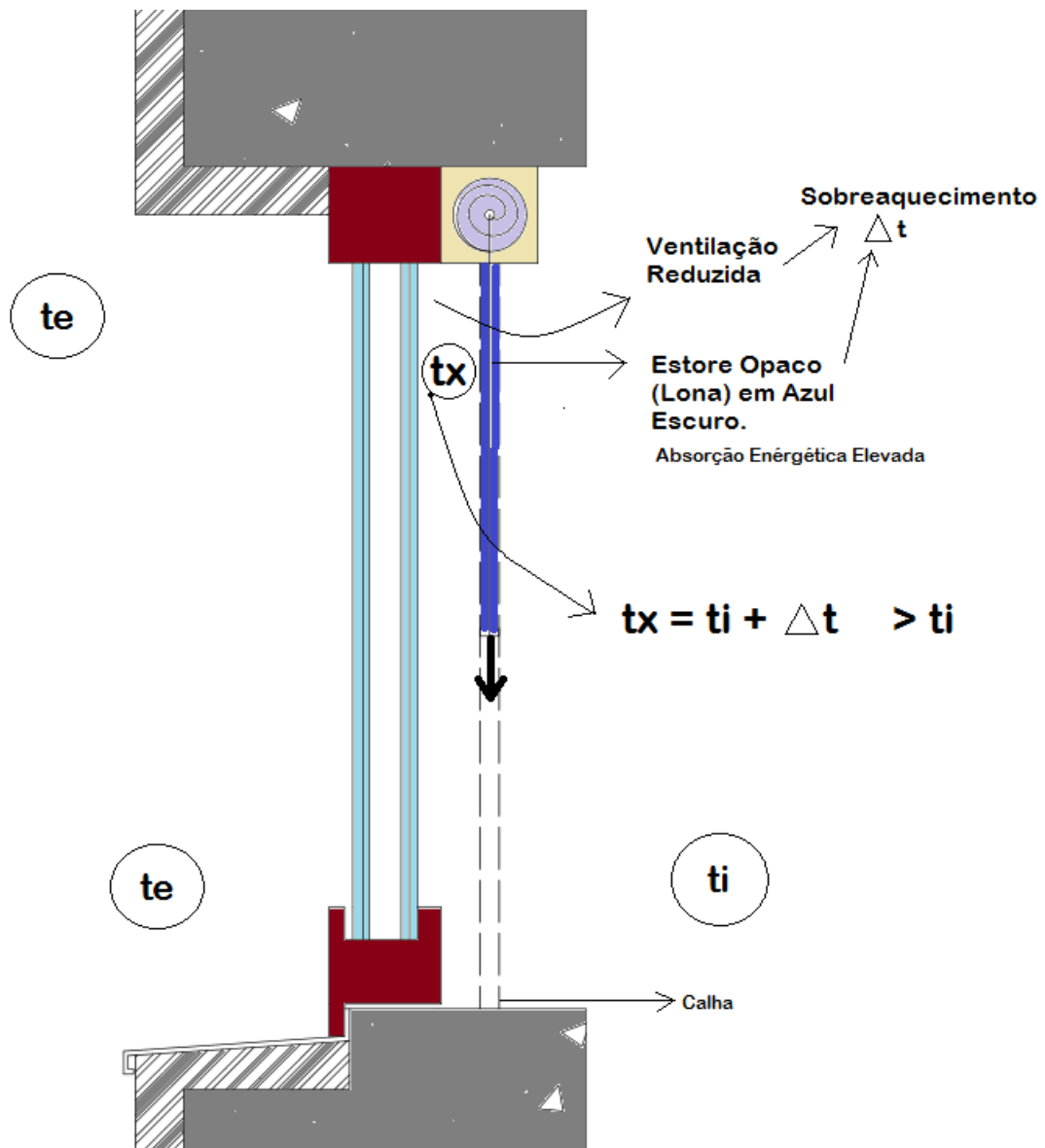


Fig.69 – Vista em Corte do Envidraçado “B” e Influência da Proteção Solar

No entanto, decidiu-se utilizar o modelo aplicado até aqui, analisando de que forma o sobreaquecimento causado pela proteção interior, pode ser traduzido num aumento da absorção energética do vidro interior, A_{2e} , do envidraçado “B”.

Sabe-se que o valor do coeficiente de absorção energética do vidro interior original, A_{2e} , era de 0,06.

De maneira a obter o coeficiente de absorção mínimo, que provoca a quebra do vidro devido ao choque térmico, é utilizado o livro de cálculo “Choque Térmico” da autoria de *Maria Francisca Lima Carneiro Cavaleiro* [1], através de um método de tentativa e erro. Para cada valor do coeficiente de absorção, A_{2e} , escolhido, será apresentado um quadro com as respetivas diferenças de temperatura, $(\theta_2-\theta_1$ e $\theta_2-\theta_3)$, que serão comparadas com a diferença de temperatura máxima admissível, $\delta\theta_{adm}$, de forma a perceber se para esse coeficiente, o vidro corre efetivamente risco de quebra por choque térmico.

1. Para $A_{2e} = 0,10$, apresenta-se o quadro 83 de forma a verificar se este aumento do coeficiente de absorção energética do vidro interior, A_{2e} , é suficiente para colocar o envidraçado “B” em risco de quebra por choque térmico.

Quadro 83 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,10$

	Inverno		Verão	
	Vidro Interior	Vidro Exterior	Vidro Interior	Vidro Exterior
$\theta_2-\theta_1$ [°C]	22,27	18,74	0,38	18,87
$\theta_2-\theta_3$ [°C]	10,45	20,04	6,82	11,53
$\delta\theta$ [°C]	22,27	20,04	6,82	18,87
$\delta\theta_{adm}$ [°C]	25,72	25,72	25,72	25,72
Conclusão	Verificado	Verificado	Verificado	Verificado

Este aumento de 4 centésimas no coeficiente A_{2e} não é suficiente para que o envidraçado enfrente risco de quebra por choque térmico. Seguidamente iremos aumentar o valor de A_{2e} , na tentativa de que para esse valor, o vidro não seja verificado pela metodologia.

2. Para $A_{2e} = 0,20$, apresenta-se o quadro 84 de forma a verificar se este aumento do coeficiente de absorção energética do vidro interior, A_{2e} , é suficiente para colocar o envidraçado “B” em risco de quebra por choque térmico.

Quadro 84 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,20$

	Inverno		Verão	
	Vidro Interior	Vidro Exterior	Vidro Interior	Vidro Exterior
$\theta_2-\theta_1$ [°C]	4,86	19,94	30,10	19,68
$\theta_2-\theta_3$ [°C]	11,40	21,12	17,46	12,23
$\delta\theta$ [°C]	11,40	21,12	30,10	19,68
$\delta\theta_{adm}$ [°C]	25,72	25,72	25,72	25,72
Conclusão	Verificado	Verificado	Não verificado	Verificado

Este aumento de 16 centésimas no coeficiente A_{2e} é suficiente para que o envidraçado enfrente risco de quebra por choque térmico. De seguida faremos o mesmo processo, utilizando um menor valor para o coeficiente de absorção, A_{2e} , de forma a apurar se com um valor inferior ao presente, a não verificação do envidraçado “B” se mantém.

3. Para $A_{2e} = 0,14$, apresenta-se o quadro 85 de forma a verificar se esta diminuição do coeficiente de absorção energética do vidro interior, A_{2e} , ainda permite colocar o envidraçado “B” em risco de quebra por choque térmico.

Quadro 85 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,14$

	Inverno		Verão	
	Vidro Interior	Vidro Exterior	Vidro Interior	Vidro Exterior
$\theta_2 - \theta_1$ [°C]	24,40	19,22	1,72	19,19
$\theta_2 - \theta_3$ [°C]	13,25	20,47	8,65	11,81
$\delta\theta$ [°C]	24,40	20,47	8,65	19,19
$\delta\theta_{adm}$ [°C]	25,72	25,72	25,72	25,72
Conclusão	Verificado	Verificado	Verificado	Verificado

Com esta diminuição do valor do coeficiente de absorção em relação ao valor considerado previamente, entramos novamente numa condição de verificação do envidraçado face a tensões de origem térmica. O valor de coeficiente de absorção, A_{2e} , terá que ser aumentado na tentativa de colocar o envidraçado, segundo a metodologia apresentada, em risco de quebra por choque térmico.

1. Para $A_{2e} = 0,15$, apresenta-se o quadro 86 de forma a verificar se este aumento do coeficiente de absorção energética do vidro interior, A_{2e} , é suficiente para colocar o envidraçado “B” em risco de quebra por choque térmico.

Quadro 86 – Verificação ao choque térmico do Envidraçado “B” para $A_{2e} = 0,15$

	Inverno		Verão	
	Vidro Interior	Vidro Exterior	Vidro Interior	Vidro Exterior
$\theta_2 - \theta_1$ [°C]	26,18	19,34	2,24	19,27
$\theta_2 - \theta_3$ [°C]	13,95	20,58	9,11	11,88
$\delta\theta$ [°C]	26,18	20,58	9,11	19,27
$\delta\theta_{adm}$ [°C]	25,72	25,72	25,72	25,72
Conclusão	Não verificado	Verificado	Verificado	Verificado

O valor do coeficiente de absorção energética do vidro interior, A_{2e} , igual a 0,15, é suficiente alto para que o envidraçado enfrente risco de quebra por choque térmico. Dado que para o valor imediatamente inferior ($A_{2e} = 0,14$), o envidraçado não corre risco de quebra, conclui-se assim que 0,15 é o valor mínimo da absorção energética do vidro interior, A_{2e} , para o qual, segundo a metodologia aplicada existe risco de quebra por choque térmico.

Bastou assim um aumento de nove centésimas em relação ao valor do coeficiente original para levar o vidro a possuir risco de choque térmico. Este aumento não muito significativo pode ser facilmente reproduzido pelos efeitos decorrentes da presença da proteção solar referida.

Uma outra nota importante é o facto do envidraçado “B”, já com o efeito do sobreaquecimento traduzido pelo aumento da absorção energética do vidro interior, A_{2e} , e o envidraçado “A” apresentarem piores condições para a verificação térmica para condições de Inverno (tanto que nas situações descritas, em Inverno, quebraram).

Ao contrário do que se poderia esperar, a quebra por choque térmico pode até ser mais provável em condições de Inverno. Uma situação característica desta estação são as baixas temperaturas do ar exterior e consequentemente do vidro. Este, quando bruscamente aquecido pela radiação solar incidente de pouca inclinação, própria de um sol mais baixo de Inverno, constitui uma situação muito gravosa de risco de quebra por choque térmico.

7

CONCLUSÃO

7.1 DIFICULDADES SENTIDAS AO LONGO DO TRABALHO

Foi sentida dificuldade na formulação dos ábacos de pré-dimensionamento e gráficos de análise comparativa no âmbito das metodologias de dimensionamento mecânico, e na tomada de opção sobre os seus formatos finais.

Na elaboração da folha de cálculo foi sentida dificuldade na formulação de algumas expressões, bem como no desenvolvimento de uma folha de cálculo de fácil uso, intuitiva e com algum sentido estético.

7.2 CONCLUSÕES GERAIS

Neste estudo desenvolveram-se dois modelos quantitativos de dimensionamento de vidros em fachadas, um de dimensionamento térmico e outro de dimensionamento mecânico. Os modelos foram expostos em paralelo no capítulo 4 e os seus desenvolvimentos foram expostos em separado nos capítulos 5 e 6. Cabe ao leitor/utilizador definir as características do envidraçado que pretende dimensionar e verificar se estas se encontram dentro de apenas um ou de ambos os domínios de aplicação.

Após a análise de parâmetros apresentados feita para várias soluções de envidraçado, conclui-se que uma boa solução do ponto de vista da redução de trocas de calor conjugada com boa transmissão luminosa, é um vidro duplo constituído por vidros recozidos onde se inclui uma capa baixa-emissiva na face do vidro exterior voltada para a câmara de ar.

No seguimento da análise comparativa entre a metodologia de dimensionamento mecânico contemporânea e a precedente, conclui-se que a metodologia contemporânea evolui no sentido de se tornar menos exigente, para os tipos de vidros abordados, no domínio da relação entre maior e menor dimensão do vidro, L/l , definido.

O processo de dimensionamento mecânico depende da pressão, das dimensões do vidro, do tipo de vidro e da respetiva espessura. Foram criados ábacos, no qual se relacionam todas estas variáveis no sentido de permitir ao leitor/utilizador a execução de um pré-dimensionamento mecânico. Para efeitos de verificação da resistência mecânica foi criado de raiz um livro de cálculo que tem por base a metodologia abordada.

No âmbito da metodologia de dimensionamento térmico, no final da aplicação prática aos casos de estudo definidos e com base nos resultados obtidos, conclui-se que o modelo simplificado é adequado para os tipos de vidro sem proteção solar, mas não o é quando existem proteções solares pelo interior.

Para o exemplo concreto, com proteção solar, o modelo presente verifica a segurança em relação ao risco de quebra por choque térmico. Todavia, na realidade, verifica-se que efetivamente o vidro quebrou.

A presença da proteção solar interior induz um sobreaquecimento do vidro interior, para o qual o modelo não apresenta sensibilidade. Assim, foi adaptada ao modelo a tradução do sobreaquecimento provocado pela proteção solar interior, num incremento da absorção energética do vidro interior, A_{2e} . Foi verificado que um pequeno incremento no valor desse coeficiente (cerca de 9 centésimas) é o suficiente para colocar o vidro em risco de quebra por choque térmico, seguindo a metodologia presente. Esta situação interpretada em conjunto com a análise efetuada para o envidraçado “A”, indicadora de risco de rotura para o vidro interior (com alta absorção), é suficiente para concluir que a absorção energética é um parâmetro muitíssimo influente no dimensionamento ao choque térmico, sendo importante limitá-la a valores baixos (< 30%).

Ao contrário do que se poderia pensar, o risco de quebra por choque térmico foi mais agravado para os dois envidraçados em condições de Inverno. Uma situação característica desta estação, muito gravosa para o risco de choque térmico, são as baixas temperaturas sentidas durante a noite conjugadas com um aumento brusco de temperatura do vidro ao amanhecer, fruto da radiação solar de fraca inclinação, próprios da estação.

Os resultados obtidos nesta dissertação resultam dos modelos constituídos e estão sujeitos às limitações mencionadas ao longo do texto.

7.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

São muitos os desenvolvimentos futuros que poderão ser continuados nesta temática. O contexto normativo está em constante evolução, e novas indicações deverão surgir, obrigando a atualizações das metodologias.

Na eventualidade da metodologia de dimensionamento mecânico não ser atualizada, a análise comparativa entre metodologias poderá ser alargada a envidraçados de outro tipo e a um domínio abrangente dos valores da relação entre lado maior e menor do vidro, L/l .

Seria também muito interessante o alargamento dos domínios de aplicação das metodologias abordadas através de modelos mais desenvolvidos. Em ambos os modelos poderão vir a ser incluídos, no domínio de aplicação, vidros não perifericamente apoiados e vidros em cobertura.

No que diz respeito aos ábacos de pré-dimensionamento, seria proveitosa a elaboração de mais ábacos de envidraçados constituídos por outros tipos de vidro.

A folha de cálculo poderá ser melhorada de maneira a ser mais intuitiva. A transposição do raciocínio do livro de cálculo para outro programa com maior possibilidade de programação seria também atrativa.

O modelo de dimensionamento térmico encontra-se algo limitado. A inclusão da hipótese de aplicação a janelas de correr ou guilhotina, tal como a vidros com proteção solar interior não está contemplada na metodologia. A adoção de um regime dinâmico possibilitaria o alargamento do domínio de aplicação. Um estudo acerca das dimensões do vidro e sua influência no risco de quebra por choque térmico, não contemplado no modelo presente, seria pertinente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cavaleiro, Maria Francisca. *Dimensionamento Térmico e Mecânico de Vidros*. Porto, 2011.
- [2] RSA – *Regulamento de Segurança e Ações para Estrutura de Edifícios e Pontes*. Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril.
- [3] Pinto, Armando. *Componentes de Edifícios – Aspetos de segurança e resistência mecânica do vidro (ITE 52)*. LNEC, Lisboa, 2008.
- [4] *Manual do Vidro*. Saint-Gobain Glass Portugal, 2000.
- [5] Pina dos Santos, Carlos A., Matias, Luís. *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios (ITE 50)*. LNEC, Lisboa, 2006.
- [6] Norma Portuguesa NP EN 410 2000. *Vidro na construção – Determinação de características luminosas e solares dos envidraçados*. Instituto Português da Qualidade, 2001.
- [7] Carvalho, Licínio C. *Envolvente dos edifícios e a iluminação natural (ITE 15)*. LNEC, Lisboa, 1987.
- [8] <http://www.pilkington.com/pilkingtoninformation/about+pilkington/company+history>. 11 de abril de 2016.
- [9] *Manual Técnico Guardian Sunguard*, Guardian Industries Corp., 2010
- [10] <https://www.pilkington.com/en/br/historia/rumo-a-industrializacao>. 16 abril de 2016.
- [11] <http://pt.saint-gobain-glass.com/product/2002/sgg-planidur>. 14 março de 2016.
- [12] <http://www.guardian.com/GuardianGlass/GlassSolutions/LaminatedSafetyandSecurityGlass>. 20 de março de 2016.
- [13] Norme Française NF DTU 39 P1-1. *Travaux de vitrerie-miroiterie - Partie 1-1: Cahier des clauses techniques*. Octobre 2006.
- [14] <http://educationcenter.ppg.com/glassttopics>. 25 de março de 2016.
- [15] Viegas, João C. *Componentes de Edifícios – Seleção de caixilharia e seu dimensionamento mecânico (ITE 51)*. LNEC, Lisboa, 2008.
- [16] Freitas, Vasco. *Caracterização do Desempenho de Sistemas de Caixilharias em Fachadas de Edifícios*. <https://paginas.fe.up.pt/~earpe/conteudos/TPPC/AvaliacaoExperimentalCaixilhos.pdf>. 15 abril de 2016.
- [17] Moura, Rita. *Fachadas em Vidro Exterior Agrafado*. Maio de 2005. https://paginas.fe.up.pt/~vpfreita/pce04003_Tecnologia_de_aplicacao_de_vidro_exterior_agrafado.pdf. 15 abril de 2016.
- [18] https://paginas.fe.up.pt/~vpfreita/mce02010_Tecnologia_de_aplicacao_de_vidros_colados.pdf. 16 abril de 2016.
- [19] <http://energy.gov/energysaver/window-types>. 13 abril de 2016.
- [20] Norme Française NF DTU 39 P4. *Travaux de vitrerie-miroiterie - Partie 4: Mémento calculs pour de dimensionnement des vitrages*. Juillet 2012.
- [21] Norme Française NF EN ISO 12543. *Verre dans la construction - Verre feuilleté et verre feuilleté de sécurité - Partie 1: définitions et description des composants*. Octobre 2005.

- [22] Norme Française NF DTU 39 P3. *Travaux de vitrerie-miroiterie - Partie 4: Mémento calculs pour de dimensionnement des vitrages*. Octobre 2006.
- [23] Norme Française NF DTU 39 P4. *Travaux de vitrerie-miroiterie - Partie 4: Mémento calculs pour de dimensionnement des vitrages*. Octobre 2006.
- [24] *REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação*. Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto.