

CARACTERIZAÇÃO DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR E SUA APLICAÇÃO

PAULO NUNO DA SILVA PINTO

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios na
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto

Abril de 2002

*Aos meus Pais
e à Sara*

AGRADECIMENTOS

Ao concluir o presente trabalho gostaria de sublinhar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que, de algum modo, contribuíram para a sua realização.

Ao Professor Vasco Peixoto de Freitas expresso aqui a minha admiração e o meu obrigado pelos conhecimentos transmitidos, por todo o apoio e empenho demonstrados, pela enorme compreensão e pelo incentivo que tão oportunamente soube dar.

Manifesto também a minha gratidão às empresas que tiveram a amabilidade de fornecer as amostras de materiais para ensaio, nomeadamente a Imperialum, a Shell, a Sicope (Solvay), a Sika, a Sotecnisol e a Termolan.

Ao Sr. Marcelino Carvalho, da Sotecnisol, deixo um agradecimento especial pela disponibilidade com que transmitiu a sua experiência nesta matéria.

De realçar também o Laboratório de Física das Construções – LFC e a Secção de Construções Civas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, pelo acolhimento prestado e pela ajuda dos seus colaboradores, em particular a Eng.^a Isabel Lopes e o Eng.^o Nuno Machado, a Professora Helena Corvacho, a Dona Balbina e a Dona Lurdes.

Finalmente, não queria perder esta oportunidade para deixar uma palavra de apreço ao Eng.^o Pedro Pinho, como reconhecimento por toda a ajuda, orientação e apoio que me tem proporcionado.

CARACTERIZAÇÃO DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR E SUA APLICAÇÃO

RESUMO

A humidade constitui uma das principais causas das patologias dos edifícios, sendo da maior importância o desenvolvimento de estudos que permitam uma maior compreensão dos fenómenos que lhe estão associados, por forma a que se possam definir regras qualitativas e quantitativas para a concepção e execução dos elementos de construção, face a este problema.

As condensações são uma das principais formas de manifestação de humidade com carácter patológico, podendo ocorrer nos paramentos interiores dos elementos construtivos (condensações superficiais) ou no seio dos próprios elementos (condensações internas). As condensações internas resultam do fenómeno de difusão do vapor de água através da envolvente dos edifícios, apresentando-se neste trabalho os principais aspectos relacionados com a simulação do fenómeno, nomeadamente a teoria de Fick e o modelo de Glaser, de fácil aplicação prática.

As barreiras pára-vapor são componentes construtivos de grande importância, na medida em que restringem a difusão de vapor de água através dos elementos de construção, nomeadamente paredes, coberturas e pavimentos. Neste estudo procuram-se definir os principais parâmetros a ter em conta na selecção e aplicação deste tipo de componentes.

No presente trabalho encontram-se também os resultados de ensaios realizados para determinar as características de permeabilidade ao vapor de água de vários materiais que podem ser utilizados como barreiras pára-vapor. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Física das Construções – LFC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP.

Finalmente, apresentam-se algumas regras de concepção dos elementos construtivos da envolvente dos edifícios face à difusão de vapor e às condensações internas, referidas em bibliografia da especialidade.

Palavras Chave:

Condensações internas, difusão de vapor, permeabilidade ao vapor, modelo de Glaser, barreiras pára-vapor, regras de concepção.

CHARACTERIZATION OF VAPOR RETARDERS AND ITS APPLICATION

ABSTRACT

Humidity is one of the main causes of buildings' pathologies, being of the largest importance the development of studies that allow a larger understanding of the associated phenomena, so that one can define qualitative and quantitative rules for the conception and execution of the building envelope, in regard to this problem.

Condensation is an important form of humidity manifestation with pathological character. It can occur in the interior surface of the building components (surface condensation) or in the interior of the own elements (internal condensation). Internal condensation results of the vapor diffusion phenomenon and in this work the main aspects to attend on its simulation are referred, namely Fick's theory of vapor diffusion and the Glaser model, of easy practical application.

Vapor retarders are building components of great importance, in the way that they restrict vapor diffusion through the building elements, like walls, roofs and floors. In this study are presented the main parameters to attend in the choice and application of this type of materials.

In the present work, we can also find the results of some tests that were made to determine the vapor permeability characteristics of several building materials that can be used as vapor retarders. These tests were taken over at the Building Physics Laboratory (LFC) of the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP).

Finally, are presented some design criteria for the buildings' envelope face to the vapor diffusion and internal condensation phenomena, which are referred in related bibliography.

Key-Words:

Internal condensation, vapor diffusion, vapor permeability, Glaser model, vapor retarders, design criteria.

CARACTÉRISATION DE BARRIÈRES DE VAPEUR ET SON APPLICATION

RÉSUMÉ

L'humidité est une des causes principales des pathologies des bâtiments et il est de la plus grande importance le développement d'études qui permettent une plus grande compréhension des phénomènes associés, afin qu'on puisse définir des règles qualitatives et quantitatives pour la conception et exécution de l'enveloppe des bâtiments, face à ce problème.

La condensation est une forme importante de manifestation de l'humidité avec caractère pathologique. Elle peut se produire dans la surface intérieure des éléments constructifs (condensation superficielle) ou à l'intérieur des propres éléments (condensation interne). La condensation interne résulte du phénomène de diffusion de vapeur et dans ce travail on présente les principaux aspects à équationner pour sa simulation, à savoir la théorie de diffusion de Fick et le modèle de Glaser, d'application pratique facile.

Les barrières de vapeur sont des composants constructifs de grande importance, dans la mesure qu'ils restreignent la diffusion de vapeur à travers des éléments qui constituent l'enveloppe du bâtiment, comme les murs, les toitures et les sols. Dans cette étude les paramètres principaux sont présentés pour assister dans le choix et application de ce type de matériaux.

Dans ce travail, on présente aussi les résultats des essais réalisées afin de déterminer les caractéristiques de perméabilité au vapeur de quelques matériaux qui peuvent être utilisées comme barrière de vapeur. Ces essais ont été réalisées au Laboratoire des Physique du Bâtiment (LFC) de la Faculté de Génie de l'Université de Porto (FEUP).

Finalement, on présente des règles pour la conception des éléments constructifs de l'enveloppe des bâtiments en vue d'éliminer les condensations internes, qui sont reportées dans la bibliographie spécialisée.

Mots Clés:

Condensation interne, diffusion de vapeur, perméabilité au vapeur, modèle de Glaser, barrières de vapeur, règles de conception.

CARACTERIZAÇÃO DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR E SUA APLICAÇÃO

ÍNDICE DO TEXTO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 INTERESSE GERAL DO TRABALHO	1
1.2 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DO TRABALHO	1
1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	3
2. CONDENSAÇÕES INTERNAS.....	4
2.1 DESCRIÇÃO GERAL DO FENÓMENO	4
2.2 DIFUSÃO DE VAPOR DE ÁGUA.....	5
2.2.1 Mecanismos de Transferência de Vapor de Água	5
2.2.2 Modelo de Difusão de Fick.....	5
2.2.3 Propriedades Termodinâmicas do Ar – Psicrometria.....	6
2.2.4 O Vapor de Água no Interior dos Edifícios.....	14
2.2.5 Características de Permeabilidade ao Vapor dos Materiais de Construção.....	18
2.3 MÉTODO DE GLASER.....	28
2.3.1 Aspectos Gerais.....	28
2.3.2 Domínio de Aplicação.....	29
2.3.3 Cálculo Analítico.....	30
2.3.4 Análise Gráfica	31
2.3.5 O Problema da Secagem.....	33
3. BARREIRAS PÁRA-VAPOR.....	35
3.1 DEFINIÇÃO	35
3.2 MATERIAIS	35
3.3 BARREIRAS “INTELIGENTES”	36
3.3.1 Caracterização.....	36
3.3.2 Membranas de Poliamida.....	37
3.3.3 Barreira “Inteligente” Desenvolvida na Dinamarca	39
3.4 CLASSIFICAÇÃO DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR EM FUNÇÃO DA SUA PERMEÂNCIA.....	39
3.5 FACTORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DAS BARREIRAS PÁRA-VAPOR	40
3.5.1 Aspectos Gerais.....	40
3.5.2 Comportamento Após Embebição e Secagem e Após Embebição Prolongada.....	41

ÍNDICE DO TEXTO (continuação)

3.5.3	Resistência à Tração.....	42
3.5.4	Resistência ao Punçoamento.....	42
3.5.5	Resistência à Fluência Plástica e a Elevadas Temperaturas.....	42
3.5.6	Resistência a Baixas Temperaturas.....	43
3.5.7	Estabilidade Dimensional.....	43
3.5.8	Comportamento ao Fogo.....	43
3.5.9	Resistência ao Desenvolvimento de Fungos.....	44
3.5.10	Resistência à Exposição a Raios Ultravioleta.....	44
3.5.11	Resistência à Degradação por Organismos e Substâncias em Contacto com o Solo.....	44
3.5.12	Resistência à Degradação por Produtos Venenosos para Solos.....	45
3.6	SELECÇÃO DAS BARREIRAS PÁRA-VAPOR.....	45
4.	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE AO VAPOR DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR.....	48
4.1	ESQUEMA DE ENSAIO.....	48
4.1.1	Princípio de Determinação.....	48
4.1.2	Configuração Geral dos Ensaios.....	48
4.1.3	Condições de Ensaio (Temperatura e Humidade Relativa).....	49
4.2	DESCRIÇÃO DA CÂMARA DE ENSAIO UTILIZADA.....	51
4.2.1	Características Gerais.....	51
4.2.2	Capacidades do Equipamento.....	53
4.2.3	Dispositivos de Controlo das Condições de Ensaio.....	54
4.3	PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS.....	58
4.3.1	Tinas de Ensaio.....	58
4.3.2	Ensaio de Películas de Revestimento.....	60
4.3.3	Preparação dos Provetes.....	61
4.3.4	Escolha e Aplicação da Substância Condicionadora.....	67
4.3.5	Selagem das Tinas.....	71
4.4	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	72
4.4.1	Esquema de Pesagem dos Provetes.....	72
4.4.2	Registo das Condições de Ensaio.....	74
4.5	DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS.....	76
4.5.1	Determinação do Fluxo de Difusão de Vapor de Água.....	76
4.5.2	Determinação da Densidade de Fluxo de Difusão de Vapor de Água.....	76
4.5.3	Determinação da Permeância e da Resistência à Difusão de Vapor de Água.....	76
4.5.4	Determinação do Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água.....	77

ÍNDICE DO TEXTO (continuação)

4.5.5	Determinação da Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente e do Factor de Resistência à Difusão de Vapor.....	77
4.6	FACTORES DE ERRO NOS RESULTADOS	78
4.6.1	Generalidades	78
4.6.2	Influência da Resistência do Ar nos Ensaios.....	78
4.6.3	Influência da Área de Selagem	80
4.7	RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS	81
4.7.1	Representação Gráfica.....	81
4.7.2	Valores Obtidos nos Ensaios Realizados	89
5.	REGRAS DE CONCEPÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS FACE AO PROBLEMA DAS CONDENSAÇÕES INTERNAS.....	101
5.1	CRITÉRIOS GERAIS DE CONCEPÇÃO	101
5.1.1	Influência do Clima.....	101
5.1.2	Importância do Posicionamento das Camadas	101
5.1.3	Elementos Construtivos com Espaços de Ar.....	104
5.1.4	Condenações Desprezáveis	105
5.2	REGRAS DE CONCEPÇÃO DE PAREDES.....	106
5.2.1	Paredes Duplas	106
5.2.2	Paredes com Isolamento Pelo Exterior.....	110
5.2.3	Paredes com Isolamento Pelo Interior.....	113
5.3	REGRAS DE CONCEPÇÃO DE COBERTURAS.....	114
5.3.1	Considerações Preliminares	114
5.3.2	Coberturas em Terraço.....	114
5.3.3	Coberturas não Planas.....	117
5.4	REGRAS DE CONCEPÇÃO DE PAVIMENTOS.....	168
5.4.1	Generalidades	168
5.4.2	Pavimentos Exteriores Elevados	168
5.4.3	Pavimentos Térreos	170
5.4.4	Pavimentos Suspensos.....	172
6.	CONCLUSÕES.....	174
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	174
6.2	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	175
6.3	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO.....	178
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179

ÍNDICE DO TEXTO (continuação)

ANEXOS

ANEXO I - TERMINOLOGIA	187
ANEXO II - CARACTERÍSTICAS DE PERMEABILIDADE AO VAPOR DE MATERIAIS E ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO.....	203

CARACTERIZAÇÃO DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR E SUA APLICAÇÃO

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Pressões atmosféricas de referência para o território dos Estados Unidos, de acordo com a ASHRAE (ver [3] e [4])	9
Quadro 2.2 – Expressões apresentadas por H. Künzel [71] para o cálculo da Pressão de Saturação (P_s , em Pascal).....	11
Quadro 2.3 – Expressões de Magnus (apresentadas pela BSI [15]) para o cálculo da Pressão de Saturação (P_s , em Pascal).....	11
Quadro 2.4 – Produção diária de humidade em habitações [15].....	14
Quadro 2.5 – Valores típicos da renovação de ar em edifícios [15]	15
Quadro 2.6 – Classificação francesa dos edifícios em função da sua higrometria [13] e [40]	17
Quadro 2.7 – Edifícios que tipicamente se enquadram nas classes de higrometria apresentadas na Figura 2.3 [43].....	18
Quadro 3.1 – Classificação de barreiras pára-vapor, em função das suas características de permeabilidade ao vapor de água ([36] e [37])	40
Quadro 3.2 – Critérios de selecção de barreiras pára-vapor do tipo membrana [6].....	46
Quadro 4.1 – Condições de ensaio definidas na prEN ISO 12572 [44].....	50
Quadro 4.2 – Dimensões dos provetes de betão celular utilizados nos ensaios	65
Quadro 4.3 – Pesagens dos provetes de películas de revestimento utilizados nos ensaios.....	66
Quadro 4.4 – Características das membranas e folhas ensaiadas	67
Quadro 4.5 – Valores da humidade relativa de substâncias condicionadoras	68
Quadro 4.6 – Peso da sílica-gel utilizada nos ensaios e respectiva variação máxima admitida, de acordo com os critérios da ASTM E 96 [11].....	69
Quadro 4.7 – Resistência à difusão de vapor de água das camadas de ar – R_f [16].....	80
Quadro 4.8 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular	91
Quadro 4.9 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com emulsão betuminosa tipo_1	92
Quadro 4.10 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com emulsão betuminosa tipo_2	93
Quadro 4.11 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com pintura betuminosa tipo_1.....	94

ÍNDICE DE QUADROS (continuação)

Quadro 4.12 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com pintura betuminosa tipo_2.....	95
Quadro 4.13 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de papel kraft com asfalto	96
Quadro 4.14 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de papel kraft com alumínio.....	97
Quadro 4.15 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de folha de alumínio.....	97
Quadro 4.16 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de folha de polietileno.....	98
Quadro 4.17 – Características de permeabilidade ao vapor das películas de revestimento ensaiadas	99
Quadro 4.18 – Características de permeabilidade ao vapor das folhas e membranas ensaiadas.....	100
Quadro 5.1 – Valores mínimos da resistência térmica (em $[m^2 \cdot ^\circ C / W]$) do conjunto formado pela camada de isolamento térmico e eventual espaço de ar adjacente, de paredes duplas, de modo a evitar a ocorrência de condensações na face interior desse isolamento.....	108
Quadro 5.2 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas em terraço tradicionais.....	116
Quadro 5.3 – Secção total mínima dos orifícios de ventilação de coberturas não planas, segundo o CSTB.....	126
Quadro 5.4 – Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A') do tecto da cobertura, previstas no DTU 40.25 [21] para coberturas com revestimento em telha plana de betão	129
Quadro 5.5 – Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A') do tecto da cobertura, segundo o CSTB [24], para coberturas com revestimento em “telha asfáltica” (shingles) situadas em região de montanha	131
Quadro 5.6 – Tipologias admitidas pelo DTU 40.35 [35] para coberturas com revestimento em placas nervuradas de aço revestido, isoladas termicamente	133
Quadro 5.7 – Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A) da cobertura em projecção horizontal, previstas no DTU 40.35 [35] para coberturas com revestimento em placas nervuradas de aço revestido e isolamento térmico aplicado sob as madres	134
Quadro 5.8 – Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A) da cobertura em projecção horizontal, previstas no DTU 40.36 [27] para coberturas com revestimento em placas nervuradas de alumínio (pré-lacado ou não), com isolamento térmico sob as madres	137

ÍNDICE DE QUADROS (continuação)

Quadro 5.9 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis	149
Quadro 5.10 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis	152
Quadro 5.11 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis	155
Quadro 5.12 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis	158
Quadro 5.13 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em “telha asfáltica” (shingles), sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis	161
Quadro 5.14 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em “telha asfáltica” (shingles), com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis	164
Quadro 5.15 – Recomendações do CSTC [36] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em placas perfiladas de fibrocimento, metal ou material sintético	166

CARACTERIZAÇÃO DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR E SUA APLICAÇÃO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Descolamento do revestimento à base de PVC do pavimento de um pavilhão gimnodesportivo.....	2
Figura 1.2 – Degradação de uma cobertura revestida com folhas de zinco	2
Figura 2.1 – Exemplo de um diagrama psicrométrico [37].....	13
Figura 2.2 – Variação, ao longo do tempo, da higrometria de uma moradia [53].....	16
Figura 2.3 – Classes de higrometria dos edifícios $\left(\Delta v = \frac{\omega}{n \cdot V}\right)$, de acordo com a prEN ISO 13788 [43]	18
Figura 2.4 – Representação esquemática da porosidade dos materiais	22
Figura 2.5 – Descrição convencional dos teores de humidade de referência de um material poroso, segundo Freitas [54].....	22
Figura 2.6 – Descrição convencional dos teores de humidade de referência de um material poroso, segundo Hens [65].....	23
Figura 2.7 – Aspecto genérico de uma curva de adsorção isotérmica	25
Figura 2.8 – Representação esquemática das curvas higroscópicas de um material.....	25
Figura 2.9 – Representação esquemática do fenómeno da capilaridade [54].....	26
Figura 2.10 – Princípio de variação do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (π) em função da humidade relativa (HR)	27
Figura 2.11 – Representação gráfica do método de GLASER	32
Figura 2.12 – Determinação da zona de ocorrência de condensações no interior de uma parede (método de GLASER)	33
Figura 2.13 – Quantificação da secagem segundo a prEN ISO 13788 [43]	34
Figura 2.14 – Situação com secagem de uma interface ($S_{d,e2}$) e condensações noutra ($S_{d,e1}$) [43].....	34
Figura 3.1 – Exemplo de barreiras pára-vapor tipo membrana	36
Figura 3.2 – Exemplo de uma barreira pára-vapor tipo película de revestimento	36
Figura 3.3 – Variação das características de permeabilidade ao vapor da membrana de poliamida em função da humidade relativa ambiente [48].....	37
Figura 3.4 – Princípio de funcionamento da membrana de poliamida [48]	38

ÍNDICE DE FIGURAS (continuação)

Figura 3.5 – Princípio de funcionamento da barreira “inteligente” desenvolvida na Dinamarca [70]	39
Figura 4.1 – Configuração das tinas de ensaio.....	49
Figura 4.2 – Esquema de ensaio [44].....	49
Figura 4.3 – Representação dos limites das condições de ensaio	50
Figura 4.4 – Aspecto geral do exterior da câmara de ensaio do LFC	51
Figura 4.5 – Aspecto geral do compartimento interior da câmara de ensaio do LFC.....	52
Figura 4.6 – Aspecto dos painéis exteriores da câmara de ensaio do LFC.....	53
Figura 4.7 – Condições de temperatura e humidade relativa permitidas pelo equipamento	54
Figura 4.8 – Pormenor do sensor psicrométrico da câmara de ensaio do LFC.....	55
Figura 4.9 – Exemplo de uma folha de registo das condições de temperatura e humidade relativa no interior do compartimento de ensaio	56
Figura 4.10 – Aspecto geral do anemómetro utilizado na medição da velocidade do ar no interior do compartimento de ensaio.....	57
Figura 4.11 – Exemplos esquemáticos de tinas de ensaio [44].....	59
Figura 4.12 – Exemplo esquemático de uma tina de ensaio para membranas e folhas [44]	60
Figura 4.13 – Aspecto geral da balança utilizada nos ensaios	74
Figura 4.14 – Pressão barométrica registada pela estação meteorológica da FEUP durante o período assinalado.....	75
Figura 4.15 – Representação esquemática do fluxo de vapor através dos provetes [61]	80
Figura 4.16 – Variação de massa dos provetes de betão celular ao longo dos ensaios.....	81
Figura 4.17 – Variação de massa dos provetes de papel kraft com asfalto ao longo dos ensaios.....	82
Figura 4.18 – Variação de massa dos provetes de papel kraft com alumínio ao longo dos ensaios ..	82
Figura 4.19 – Variação de massa dos provetes de folha de alumínio ao longo dos ensaios.....	83
Figura 4.20 – Variação de massa dos provetes de folha de polietileno ao longo dos ensaios	83
Figura 4.21 – Variação de massa dos provetes de tela betuminosa com 2,7 mm de espessura ao longo dos ensaios.....	84
Figura 4.22 – Variação de massa dos provetes de tela betuminosa com 3,1 mm de espessura ao longo dos ensaios.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS (continuação)

Figura 4.23 – Variação de massa dos provetes de tela betuminosa com alumínio ao longo dos ensaios	85
Figura 4.24 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com emulsão betuminosa do tipo_1.....	85
Figura 4.25 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 2 demãos de emulsão betuminosa do tipo_2.....	86
Figura 4.26 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 4 demãos de emulsão betuminosa do tipo_2.....	86
Figura 4.27 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 2 demãos de pintura betuminosa do tipo_1	87
Figura 4.28 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 4 demãos de pintura betuminosa do tipo_1	87
Figura 4.29 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 2 demãos de pintura betuminosa do tipo_2	88
Figura 4.30 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 4 demãos de pintura betuminosa do tipo_2	88
Figura 5.1 – Importância das propriedades higrotérmicas das camadas e do seu posicionamento, face ao problema das condensações internas	102
Figura 5.2 – Cobertura em terraço tradicional	103
Figura 5.3 – Paredes duplas sem espaço de ar [31].....	107
Figura 5.4 – Paredes duplas com espaço de ar [31]	107
Figura 5.5 – Exemplos de orifícios de drenagem/ventilação de espaços de ar de paredes duplas com reboco exterior [31].....	109
Figura 5.6 – Exemplos de orifícios de drenagem/ventilação de espaços de ar de paredes duplas com o pano exterior em tijolo à vista [31].....	110
Figura 5.7 – Princípio de ventilação de coberturas com inclinação inferior a 10°, segundo a DIN 4108 [42].....	118
Figura 5.8 – Princípio de ventilação de coberturas com inclinação igual ou superior a 10°, segundo a DIN 4108 [42].....	119
Figura 5.9 – Constituição das coberturas em desvão consideradas pela BSI [15].....	120
Figura 5.10 – Secção equivalente das aberturas de ventilação em coberturas em desvão com mais de uma vertente, segundo a BSI [15].....	120

ÍNDICE DE FIGURAS (continuação)

Figura 5.11 – Secção equivalente das aberturas de extracção de ar em coberturas em desvão com apenas uma vertente, segundo a BSI [15].....	121
Figura 5.12 – Constituição das coberturas inclinadas consideradas pela BSI [15].....	121
Figura 5.13 – Secção equivalente das aberturas de ventilação em coberturas inclinadas, segundo a BSI [15].....	122
Figura 5.14 – Ventilação de coberturas inclinadas por troços [15].....	122
Figura 5.15 – Secção de ventilação de coberturas em desvão e coberturas inclinadas, sem ecrã de estanquidade complementar [34].....	124
Figura 5.16 – Secções de ventilação de coberturas em desvão e coberturas inclinadas, com ecrã de estanquidade [34].....	124
Figura 5.17 – Aberturas de extracção de ar para ventilação de coberturas aplicadas em paredes de empena [34].....	127
Figura 5.18 – Exemplos de coberturas com revestimento em “telha asfáltica” (shingles).....	130
Figura 5.19 – Exemplos de aplicação de espumas de estanquidade ao longo do contorno de coberturas com revestimento em chapas metálicas nervuradas [35].....	135
Figura 5.20 – Princípio de realização de uma cobertura dupla com ventilação [22].....	139
Figura 5.21 – Critérios de ventilação de coberturas duplas com revestimento em folha de zinco, em edifícios de média higrometria [22].....	140
Figura 5.22 – Critérios de ventilação de coberturas duplas com revestimento em grandes elementos de folhas e bandas de aço inoxidável [29].....	141
Figura 5.23 – Classes de clima interior dos edifícios segundo o CSTC [36].....	145
Figura 5.24 – Representação esquemática de um guarda-pó [12].....	148
Figura 5.25 – Pavimentos exteriores elevados com isolamento térmico aplicado sobre a estrutura de suporte [15].....	168
Figura 5.26 – Pavimentos exteriores elevados com isolamento térmico aplicado sob a estrutura de suporte e revestimento exterior contínuo [15].....	169
Figura 5.27 – Pavimentos exteriores elevados com isolamento térmico aplicado sob a estrutura de suporte e revestimento exterior descontínuo [15].....	169
Figura 5.28 – Pavimentos exteriores elevados com acabamento em madeira e estrutura de suporte descontínua [15].....	170
Figura 5.29 – Pavimentos térreos com isolamento térmico sobre o massame [15].....	171
Figura 5.30 – Pavimentos térreos com isolamento térmico sob o massame [15].....	172

ÍNDICE DE FIGURAS (continuação)

Figura 5.31 – Pavimentos suspensos em madeira [15].....	173
Figura 5.32 – Pavimentos suspensos com estrutura de suporte em laje prefabricada de betão [15].....	173

SIMBOLOGIA

Símbolo	Designação	Unidades
A	Área	m ²
D	Coeficiente de difusão do vapor de água no ar	m ² /s
d	Espessura	m
g	Densidade de fluxo de difusão de vapor de água	kg/(m ² ·s); g/(m ² ·h)
G	Fluxo de difusão de vapor de água	kg/s; g/h
h _i , h _e	Condutância térmica superficial interior e exterior	W/(m ² ·°C); W/(m ² ·K)
HR	Humidade relativa	%
K	Coeficiente de transmissão térmica	W/(m ² ·°C); W/(m ² ·K)
m	Massa	Kg
m _{v,s}	Massa de vapor de água de saturação	Kg
n	Taxa horária de renovação de ar	h ⁻¹
P	Pressão parcial do vapor de água	Pa; mmHg
P _e	Permeância ao vapor de água	kg/(m ² ·s·Pa); g/(m ² ·h·mmHg)
P _s	Pressão de saturação	Pa; mmHg
P _t	Pressão atmosférica ou barométrica	Pa; mmHg
q	Densidade de fluxo de calor	W/m ²
R _a	Constante universal dos gases relativa ao ar seco	R _a = 287,1 J/(kg·K)
R _d	Resistência à difusão de vapor de água	m ² ·s·Pa/kg; m ² ·h·mmHg/g
R _t	Resistência térmica	m ² ·°C/W; m ² ·K/W
R _v	Constante universal dos gases relativa ao vapor de água	R _v = 461,5 J/(kg·K)
S _d	Espessura da camada de ar de difusão equivalente	m
t; T	Temperatura; T = t + 273,15 K, com t em [°C]	°C; K
t _s	Temperatura de ponto de orvalho	°C
u	Teor de humidade de um material em massa por unidade de volume	kg/m ³
U	Teor de humidade do ar	kg/kg
V	Volume	m ³
w	Teor de humidade de um material	kg/kg
W	Humidade absoluta do ar	kg/m ³
ΔP	Variação de pressão	Pa; mmHg
λ	Coeficiente de condutibilidade térmica	W/(m·°C); W/(m·K)
μ	Factor de resistência à difusão de vapor de água	-
π	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água	kg/(m·s·Pa); g/(m·h·mmHg)
π _{ar}	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar	kg/(m·s·Pa); g/(m·h·mmHg)
θ	Teor de humidade volúmico de um material	m ³ /m ³
ω	Produção de vapor no interior de um local	kg/h

1. INTRODUÇÃO

1.1 INTERESSE GERAL DO TRABALHO

A humidade constitui uma das principais causas das patologias dos edifícios, afectando aspectos tão importantes e tão diversos como a durabilidade e aspecto dos elementos construtivos, o conforto dos utentes e até a sua saúde e segurança. Pode ainda originar modificações nas características físicas, químicas e/ou biológicas dos materiais que, não tendo necessariamente um carácter patológico, afectam o seu desempenho, das quais se destacam:

- Variações dimensionais, como retracções, dilatações e deformações;
- Variações da condutibilidade térmica;
- Alterações de resistência mecânica;
- Variações fisico-químicas, como é o caso da corrosão dos aços ou das eflorescências resultantes da migração de sais;
- Alterações biológicas, como por exemplo o apodrecimento da madeira.

Por esta razão, é largamente reconhecida a importância do desenvolvimento de estudos que permitam uma melhor compreensão dos fenómenos que lhe estão associados, por forma a que se possam definir regras qualitativas e quantitativas para a concepção e execução dos elementos de construção, face a este problema.

Com este trabalho pretende-se dar um contributo nesta área, em particular nas questões relacionadas com o fenómeno das condensações internas.

1.2 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DO TRABALHO

A humidade presente nos materiais e elementos construtivos pode ter diversas origens, que se podem agrupar do seguinte modo [47]:

- A humidade de construção, resultante do processo construtivo;
- A humidade proveniente da água da chuva, quer por infiltrações através de pontos singulares, quer por absorção;
- A humidade ascensional, proveniente dos solos;
- A humidade do ar fixada por fenómenos de higroscopicidade;
- A humidade devida a causas fortuitas, como é por exemplo o caso de fugas nas canalizações;
- A humidade resultante da condensação do vapor de água existente no ar.

A importância do problema das condensações é realçada no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE [93], ao definir, no seu artigo 1.º, que um dos grandes objectivos do RCCTE é precisamente o de evitar que os elementos de construção sofram efeitos patológicos derivados de condensações.

As condensações podem ocorrer no paramento interior dos elementos construtivos (condensações superficiais) ou no seio dos próprios elementos (condensações internas ou intersticiais), tendo estas últimas a agravante de poderem não ser detectáveis de imediato.

Nas figuras seguintes apresentam-se dois exemplos de patologias associadas à ocorrência de condensações internas. O primeiro caso (Figura 1.1) corresponde ao pavimento de um pavilhão ginnodesportivo, em que o revestimento à base de PVC descolou devido à degradação da cola utilizada, em consequência da humedificação resultante da ocorrência de condensações na interface de colagem. No segundo caso (Figura 1.2) apresenta-se uma cobertura revestida com chapa de zinco, na qual se registou uma perfuração com algum significado, relacionada com a ocorrência de condensações na face de assentamento das chapas.



Figura 1.1 – Descolamento do revestimento à base de PVC do pavimento de um pavilhão ginnodesportivo

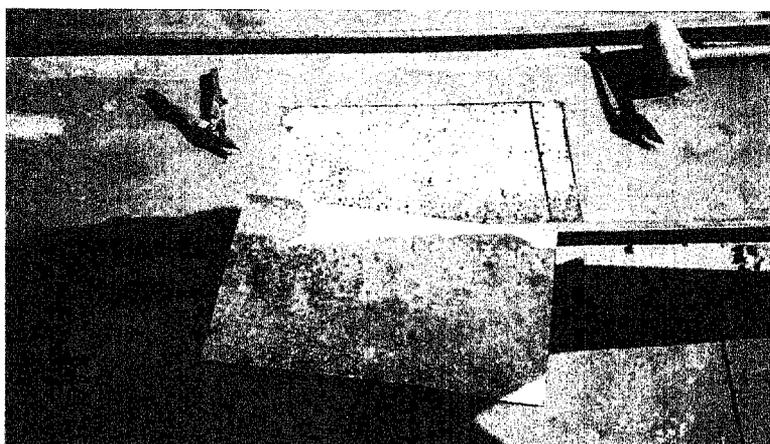


Figura 1.2 – Degradação de uma cobertura revestida com folhas de zinco

As condensações internas resultam do fenómeno de difusão do vapor de água, existente no ar, através da envolvente dos edifícios. Neste domínio, as barreiras pára-vapor surgem como componentes construtivos de grande importância, na medida em que restringem a difusão de vapor de água através dos elementos de construção, nomeadamente paredes, coberturas e pavimentos. Contudo, na sua aplicação e selecção, esta propriedade deverá ser compatibilizada com outras exigências, por forma a otimizar o desempenho do sistema.

O presente trabalho desenvolveu-se com o objectivo de tentar esclarecer os aspectos mais relevantes a ter em conta na concepção dos elementos construtivos face ao problema das condensações internas e de indicar quais os principais parâmetros a equacionar na utilização de barreiras pára-vapor e, na medida do possível, a forma de os quantificar.

1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

O trabalho que aqui se apresenta encontra-se dividido em quatro partes principais:

- Uma primeira parte (capítulo 2) em que se descrevem os aspectos mais relevantes no estudo do problema das condensações internas, nomeadamente o fenómeno de difusão de vapor através da envolvente dos edifícios e os parâmetros que o condicionam;
- Na segunda parte (capítulo 3) apresentam-se os principais aspectos a ter em conta na utilização de barreiras pára-vapor;
- Na terceira parte (capítulo 4) descrevem-se os ensaios realizados para a determinação das características de permeabilidade ao vapor de alguns materiais que se podem utilizar como barreira pára-vapor;
- A quarta e última parte (capítulo 5) em que se apresentam algumas regras de concepção de elementos construtivos, com vista ao controlo e minimização do problema das condensações internas.

Em anexo encontra-se ainda alguma informação importante para a compreensão do estudo desenvolvido, nomeadamente:

- A terminologia correntemente utilizada no domínio da higrotérmica (Anexo I), com os vários conceitos e parâmetros listados por ordem alfabética, com os correspondentes símbolos e unidades em que normalmente se expressam;
- As características de permeabilidade ao vapor de vários materiais e elementos construtivos (Anexo II), recolhidas na bibliografia da especialidade ou resultantes de ensaios realizados no Laboratório de Física das Construções – LFC da FEUP, de grande importância nas simulações do comportamento dos edifícios face à difusão de vapor de água.

2. CONDENSAÇÕES INTERNAS

2.1 DESCRIÇÃO GERAL DO FENÓMENO

O vapor de água existente no ar exerce uma determinada pressão, designada de pressão parcial de vapor de água, que pode variar desde 0 (zero) até ao valor correspondente ao ponto de saturação, que se caracteriza pela condensação de uma parte desse vapor.

Sempre que se estabelece um gradiente de pressão parcial de vapor de água entre dois pontos, este difunde do ponto de pressão mais elevada para o ponto de pressão mais baixa, tanto no ar como através dos materiais. Esta difusão ocorre com maior ou menor dificuldade, em função das características de permeabilidade ao vapor do meio em que ocorre.

A difusão de vapor através de elementos construtivos que separam ambientes com diferentes características, como é o caso dos elementos da envolvente dos edifícios, leva a uma variação da pressão parcial de vapor ao longo da espessura do elemento. Se em algum ponto a pressão instalada for igual à respectiva pressão de saturação então há ocorrência de condensações, que podem ser superficiais, caso tenham lugar na superfície do elemento, ou internas, caso ocorram no interior do elemento.

Para que ocorram condensações internas num elemento é então necessário que se estabeleça um gradiente de pressão entre os ambientes que separa.

As diferenças de temperatura e humidade entre os ambientes interior e exterior dos edifícios é, normalmente, mais elevada durante a estação fria (Inverno). Assim, será geralmente a estação fria a mais condicionante na concepção dos elementos construtivos face ao fenómeno da difusão de vapor de água, situação em que o fluxo de vapor tem o sentido do interior para o exterior.

Existem, contudo, situações especiais em que o fluxo de vapor se dá em sentido contrário (do exterior para o interior), como é por exemplo o caso das câmaras frigoríficas ou de edifícios situados em ambientes muito quentes e húmidos e com ar condicionado a controlar o ambiente interior.

Nos edifícios correntes esta situação também se poderá registar, por exemplo, quando um elemento se encontrar com um teor de humidade elevado e estiver exposto a forte radiação solar, provocando a transferência da humidade em direcção ao interior do edifício. A este fenómeno dá-se, normalmente, o nome de condensações “de Verão”.

Nos parágrafos que se seguem descrevem-se os principais aspectos a ter em conta no estudo destes fenómenos, nomeadamente a difusão de vapor de água através de elementos construtivos, os parâmetros que a condicionam, as solicitações da envolvente dos edifícios, os modelos de simulação do problema.

2.2 DIFUSÃO DE VAPOR DE ÁGUA

2.2.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE VAPOR DE ÁGUA

A transferência de humidade na fase vapor pode dar-se das seguintes formas:

- *Difusão de vapor através de uma camada de ar* - a difusão de vapor dá-se através de uma camada de ar imóvel;
- *Difusão de vapor através de materiais porosos* - é basicamente o mesmo processo que o anterior, só que neste caso a resistência ao transporte depende da estrutura do material;
- *Convecção* - o vapor de água desloca-se juntamente com o ar devido a gradientes de pressão e de temperatura.

Assim, a transferência de vapor de água através da envolvente dos edifícios poderá processar-se de diferentes formas, tais como:

- Transferência de vapor entre a face interior do elemento de construção e a ambiência interior.
- Transferência de vapor através dos elementos de construção, resultante do gradiente de pressão parcial de vapor de água entre as ambiências exterior e interior;
- Transferência de vapor entre a face exterior do elemento de construção e a atmosfera.

2.2.2 MODELO DE DIFUSÃO DE FICK

A transferência de humidade por difusão de vapor através de elementos construtivos é consequência directa das diferenças de pressão de vapor de água entre as suas faces. Trata-se de um caso específico do princípio universal segundo o qual duas misturas de gás com concentrações diferentes, quando postas em contacto, originam um transporte molecular que se mantém até que as concentrações sejam iguais.

Para um determinado elemento construtivo, este transporte depende das características de permeabilidade ao vapor de água dos seus componentes e das diferenças de pressão de vapor de água entre os ambientes que separa, que por sua vez dependem das características higrotérmicas (temperatura e humidade) dessas mesmas ambiências.

Existem vários modelos de transferência de um gás por difusão, dos quais se salienta o de Fick. Este modelo considera a ausência de forças de transporte, tais como fluxo de líquido, fluxo de gás e

gradiente de temperatura. Deste modo, considera que o vapor de água apresenta um comportamento que se aproxima de um gás ideal (ver § 2.2.3) e que a velocidade de difusão é constante através de um material homogéneo.

Se considerarmos um material poroso, de estrutura indeformável, homogéneo, não higroscópico, de faces planas e paralelas, com uma boa estanquidade ao ar, em equilíbrio térmico, sem produção interna de fluxos e submetido a um regime permanente, bem como a ausência de transferência de água na fase líquida, pode afirmar-se que o transporte de humidade se dá exclusivamente por difusão de vapor, obedecendo à lei de Fick [15]:

$$g = -\pi(T, HR) \cdot \frac{d_p}{d_x} \quad (2.1)$$

em que:

g : Densidade do fluxo de difusão de vapor de água - [kg/(m²·s)]

$\frac{d_p}{d_x}$: Gradiente de pressão de vapor de água - [Pa/m]

$\pi(T, HR)$: Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, sob acção de um gradiente de pressão de vapor de água, em função da temperatura e da humidade relativa - [kg/(m·s·Pa)]

Por simplificação, é corrente considerar-se que o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água é constante, o que significa que:

$$\frac{d_\pi}{d_T} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{d_\pi}{d_{HR}} = 0 \quad (2.3)$$

No entanto, como se refere no § 2.2.5, o valor de π não é constante, variando, sobretudo, com a humidade relativa da ambiência em que se encontre o material.

2.2.3 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO AR – PSICROMETRIA

2.2.3.1 GENERALIDADES

A Psicrometria trata das propriedades termodinâmicas do “ar húmido”, nomeadamente a Humidade Absoluta / Teor de Humidade do Ar, a Humidade Relativa e a Pressão Parcial de Vapor de Água.

O “ar húmido” não é mais do que o ar atmosférico isento dos contaminantes que normalmente contém, como fumo, pólen, gases poluentes, etc. Na sua constituição encontra-se o vapor de água e diversos gases, tais como o azoto, o oxigénio, o árgon, o dióxido de carbono, etc., que no seu conjunto formam o que se designa por “ar seco”.

De seguida apresentam-se os principais parâmetros que condicionam o comportamento termo-higrométrico do ar no interior dos edifícios, da maior importância no estudo do problema das condensações. A informação apresentada assenta fundamentalmente nas publicações da ASHRAE [3] e [4].

2.2.3.2 EQUAÇÃO DOS GASES PERFEITOS

Na generalidade dos cálculos psicrométricos efectuados em engenharia civil, o “ar húmido” é tratado como uma mistura de dois gases perfeitos – o vapor de água e o “ar seco” – obedecendo cada um (e também o seu conjunto) à lei de Gay-Lussac [76]:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.4)$$

em que:

p: Pressão parcial do gás - [Pa]

V: Volume ocupado pelo gás - [m³]

n: Número de moles de gás contido no volume V

R: Constante universal dos gases perfeitos = 8,31441 J/(mol·K) (ver [3] e [4])

T: Temperatura absoluta - [K]

Para um determinado gás com massa molecular relativa M_g , a equação anterior pode também ser escrita da seguinte forma (ver [3] e [4]):

$$p \cdot V = m \cdot \left(\frac{R}{M_g}\right) \cdot T \quad (2.5)$$

em que:

p: Pressão parcial do gás - [Pa]

V: Volume ocupado pelo gás - [m³]

m: Massa de gás contida no volume V - [kg]

R: Constante universal dos gases perfeitos = 8,31441 J/(mol·K)

M_g : Massa molecular relativa do gás - [kg/mol]

T: Temperatura absoluta - [K]

A relação R/M_g de um determinado gás fornece a sua própria constante universal. Assim, para o “ar seco” e para o vapor de água tem-se (ver [3] e [4]):

$$R_a = \frac{R}{M_a} = \frac{8,31441}{0,0289645} = 287,055 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (2.6)$$

e

$$R_v = \frac{R}{M_v} = \frac{8,31441}{0,01801528} = 461,520 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (2.7)$$

em que:

R_a : Constante universal dos gases perfeitos relativa ao “ar seco” = 287,055 J/(kg·K)

R_v : Constante universal dos gases perfeitos relativa ao vapor de água = 461,520 J/(kg·K)

R: Constante universal dos gases perfeitos = 8,31441 J/(mol·K)

M_a : Massa molecular do “ar seco” = 0,028 9645 kg/mol

M_v : Massa molecular do vapor de água = 0,018 015 28 kg/mol

Para além de obedecer à equação dos gases perfeitos, o “ar húmido” obedece também à *lei de Dalton* [76], que refere que a pressão total de uma mistura de gases é igual à soma das pressões parciais¹ de cada um dos gases constituintes:

$$P_t = P + P_a \quad (2.8)$$

em que:

P_t : Pressão total da mistura – [Pa]

P: Pressão parcial do vapor de água – [Pa]

P_a : Pressão parcial do “ar seco” – [Pa]

2.2.3.3 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

A pressão total do “ar húmido” corresponde à pressão atmosférica, na medida em que é tratado como uma mistura de gases perfeitos.

A pressão atmosférica varia consideravelmente com a altitude, a localização geográfica ou com as condições climáticas. Por forma a permitir obter estimativas das propriedades do ar quando não se

¹ A pressão parcial de um gás componente de uma mistura é igual à pressão que esse gás teria se ocupasse individualmente o mesmo volume da mistura, à mesma temperatura.

dispõe de valores da pressão atmosférica, a ASHRAE apresenta um quadro com pressões consideradas de referência para o território dos Estados Unidos, fornecidas pela NASA, do qual foram retirados os valores que se apresentam no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Pressões atmosféricas de referência para o território dos Estados Unidos, de acordo com a ASHRAE (ver [3] e [4])

Altitude [m]	Pressão [Pa]	Altitude [m]	Pressão [Pa]
-1000	113 929	2000	79 495
-500	107 478	3000	70 108
0 (nível do mar)	101 325	5000	54 020
500	95 461	7000	41 061
1000	89 874	10000	26 436

Estes valores podem também ser calculados a partir da seguinte expressão [4]:

$$P_{t,r} = 101\,325 \cdot (1 - 2,255\,77 \times 10^{-5} \cdot H)^{5,2559} \quad (2.9)$$

em que:

$P_{t,r}$: Pressão atmosférica de referência – [Pa]

H: Altitude do local – [m]

2.2.3.4 RELAÇÕES ENTRE OS COMPONENTES DO “AR HÚMIDO”

2.2.3.4.1 Equação Geral

Atendendo às equações anteriores verifica-se que para um determinado volume de ar húmido - V, a uma dada temperatura - T, temos:

$$\frac{V}{T} = \frac{m_v \cdot R_v}{P} = \frac{m_a \cdot R_a}{P_a} \quad (2.10)$$

2.2.3.4.2 Teor de Humidade do Ar

Por definição, o teor de humidade do ar corresponde à relação entre a massa de vapor de água e a massa de “ar seco”, pelo que pode escrever-se:

$$U = \frac{m_v}{m_a} = \frac{R_a}{R_v} \times \frac{P}{P_t - P} = 0,622 \frac{P}{P_t - P} \quad (2.11)$$

Na expressão anterior (2.11) tem-se:

U: Teor de humidade do ar - [kg/kg “ar seco”]

m_v : Massa de vapor de água - [kg]

m_s : Massa de “ar seco” - [kg]

R_s : Constante universal dos gases perfeitos relativa ao “ar seco” = 287,055 J/(kg·K)

R_v : Constante universal dos gases perfeitos relativa ao vapor de água = 461,520 J/(kg·K)

P_t : Pressão total da mistura - [Pa]

P: Pressão parcial do vapor de água - [Pa]

2.2.3.4.3 Humidade Absoluta do Ar

Do mesmo modo que para o teor de humidade, a humidade absoluta do ar também pode ser obtida da seguinte forma:

$$W = \frac{m_v}{V} = \frac{1}{R_v} \times \frac{P}{T} = 2,167 \times 10^{-3} \frac{P}{T} \quad (2.12)$$

em que:

W: Humidade absoluta do ar - [kg/m³]

m_v : Massa de vapor de água - [kg]

R_v : Constante universal dos gases perfeitos relativa ao vapor de água = 461,520 J/(kg·K)

P: Pressão parcial do vapor de água - [Pa]

T: Temperatura absoluta - [K]

2.2.3.5 O AR SATURADO

O “ar húmido” considera-se saturado quando se encontra em contacto e em equilíbrio neutro com água [4], sendo a correspondente pressão parcial - pressão de saturação (P_s) - um dos mais importantes parâmetros nos cálculos psicrométricos.

Existem várias expressões que permitem o cálculo deste parâmetro, das quais se apresentam nos quadros seguintes as referidas por H. Künzler [82] e pela BSI [17], dada a sua simplicidade. A expressão da BSI foi inclusivamente adoptada na prEN ISO 13788 [52].

Quadro 2.2 – Expressões apresentadas por H. Künzel [82] para o cálculo da Pressão de Saturação (P_s em Pascal)

	$P_s = 611 \cdot e^{\left(\frac{a}{b+t}\right)}$ [Pa]	
Temperatura - t [°C]	a	b
t < 0 °C	22,44	272,44
t ≥ 0 °C	17,08	234,18

Quadro 2.3 – Expressões de Magnus (apresentadas pela BSI [17]) para o cálculo da Pressão de Saturação (P_s em Pascal)

	$P_s = 610,5 \cdot e^{\left(\frac{a}{b+t}\right)}$ [Pa]	
Temperatura - t [°C]	a	b
t < 0 °C	21,875	265,5
t ≥ 0 °C	17,269	237,3

2.2.3.6 HUMIDADE RELATIVA DO AR

A humidade relativa de um determinado volume de “ar húmido” corresponde à relação entre a fracção molar do vapor de água desse volume de ar e a fracção molar do vapor de água numa amostra de ar saturado, com o mesmo volume e nas mesmas condições de temperatura e pressão (ver [3] e [4]):

$$HR = 100 \times \frac{x_v}{x_{vs}} \quad (2.13)$$

em que:

HR: Humidade relativa - [%]

x_v : Fracção molar de vapor de água

x_{vs} : Fracção molar de vapor de água de uma amostra de ar saturado

Por seu lado a fracção molar do vapor de água de uma amostra de ar pode ser calculada através da expressão (2.14), que se segue (ver [3] e [4]).

$$x_v = \frac{n_v}{n_v + n_a} \quad (2.14)$$

em que:

n_v : Número de moles de vapor de água

n_a : Número de moles de “ar seco”

Atendendo às equações (2.4), (2.8) e (2.14) pode escrever-se:

$$\frac{V}{R \cdot T} = \frac{n_v}{P} = \frac{n_a}{P_a} = \frac{n_v + n_a}{P + P_a} \quad (2.15)$$

em que:

V: Volume ocupado pelo gás - [m³]

R: Constante universal dos gases perfeitos = 8,31441 J/(mol·K)

T: Temperatura absoluta - [K]

n_v : Número de moles de vapor de água

n_a : Número de moles de “ar seco”

P: Pressão parcial do vapor de água - [Pa]

P_a : Pressão parcial do “ar seco” - [Pa]

Deste modo é possível reescrever a equação (2.14) da seguinte forma:

$$x_v = \frac{P}{P_t} \quad (2.16)$$

e então:

$$HR = 100 \times \frac{P}{P_s} \quad (2.17)$$

em que:

HR: Humidade relativa - [%]

P: Pressão parcial do vapor de água - [Pa]

P_s : Pressão de saturação - [Pa]

2.2.3.7 O DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

A representação gráfica das propriedades termodinâmicas do “ar húmido” e das relações existentes entre si permite obter o que se designa por **Diagrama Psicrométrico** (Figura 2.1). Este diagrama é sempre relativo a uma determinada pressão atmosférica, em geral a pressão atmosférica de referência, pelo que se deve proceder às devidas correcções se a pressão atmosférica for diferente daquela a que corresponde o diagrama (ver § 2.2.3.3).

Para exemplificar a utilização do diagrama psicrométrico, considere-se que o ar tem uma temperatura $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de 50 %. Pela intersecção da recta vertical que corresponde a uma temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ com a curva que corresponde a uma humidade relativa de 50 %, obtém-se um ponto **A**, a partir do qual se pode traçar uma recta horizontal que permite determinar a pressão parcial do vapor de água, que é de 1170 Pa. Ao arrefecer esse ar sem fazer variar o seu teor de humidade, a humidade relativa vai aumentando. Quando a humidade relativa atinge os 100 %, o ar fica saturado e a temperatura correspondente é a temperatura de ponto de orvalho $t_s = 9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

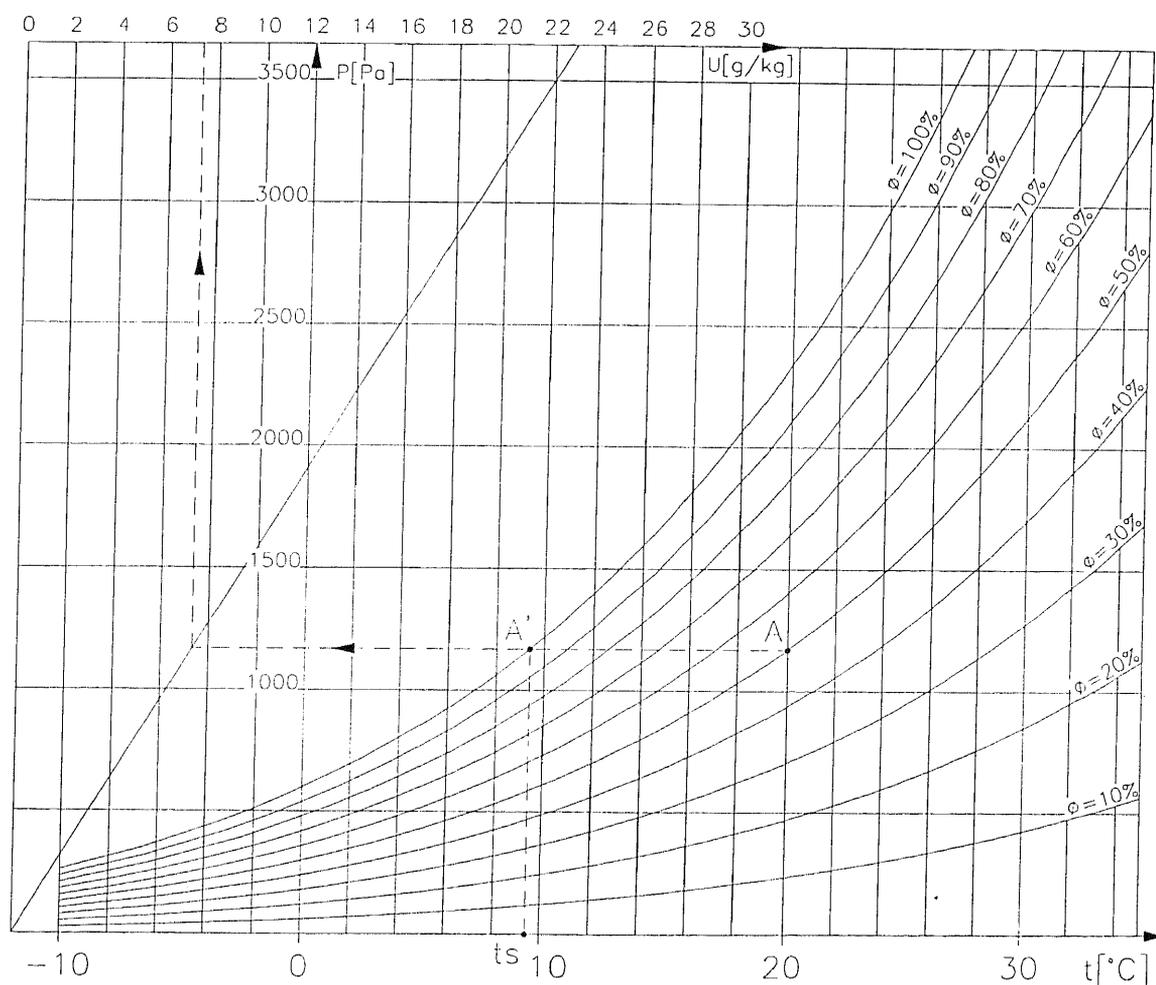


Figura 2.1 – Exemplo de um diagrama psicrométrico [46]

2.2.4 O VAPOR DE ÁGUA NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS

2.2.4.1 ORIGENS DO VAPOR EXISTENTE NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS

O vapor de água existente no ambiente interior dos edifícios resulta de diversos factores, tais como:

- O vapor de água produzido pelos ocupantes (animais e vegetais);
- O vapor de água resultante das actividades no interior dos edifícios, como por exemplo a preparação de refeições;
- O vapor de água transportado pelo ar exterior que é admitido nos edifícios;
- O vapor de água que é libertado pelos diversos materiais por fenómenos de higroscopicidade;
- O vapor de água que atravessa a envolvente dos edifícios por fenómenos de difusão.

Os dois primeiros factores são, normalmente, os mais condicionantes, tendo variações bastante significativas ao longo do dia, em função do tipo de ocupação dos edifícios. Por exemplo, numa habitação as primeiras horas do dia e da noite são normalmente as que registam uma maior produção de vapor, enquanto que num escritório o horário de expediente apresentará uma produção de vapor significativa, que geralmente cessa ao final da tarde.

Para habitações, a BSI [17] apresenta um quadro (Quadro 2.4) com valores aproximados da produção diária de humidade, em função do número de ocupantes e dos seus hábitos.

Quadro 2.4 – Produção diária de humidade em habitações [17]

Número de ocupantes	Produção diária de vapor de água [kg]		
	Ocupação seca ⁽⁺⁾	Ocupação húmida ⁽⁺⁺⁾	Ocupação muito húmida ⁽⁺⁺⁺⁾
1	3,5	6	9
2	4	8	11
3	4	9	12
4	5	10	14
5	6	11	15
6	7	12	16

⁽⁺⁾ Ocupação seca: nos casos em que a ventilação é convenientemente utilizada, incluindo os edifícios que não se encontram ocupados durante o dia. Resulta numa diferença de pressão de vapor entre os ambientes interior e exterior não superior a 300 Pa.

⁽⁺⁺⁾ Ocupação húmida: nos casos em que a humidade interior se encontra acima do normal, provavelmente com ventilação deficiente. A diferenciação de pressão de vapor de água entre o interior e o exterior situa-se entre os 300 e os 600 Pa.

⁽¹¹¹⁾ Ocupação muito húmida: nos casos em que os sistemas de ventilação dificilmente são utilizados e a produção de vapor no interior é elevada. A diferença de pressão de vapor é superior a 600 Pa.

2.2.4.2 VENTILAÇÃO DOS ESPAÇOS

A ventilação dos espaços é um mecanismo de grande importância na redução da humidade relativa interior, na medida em que permite a admissão de ar exterior, normalmente mais seco, e a extracção do ar interior, transportando consigo alguma da humidade em forma de vapor de água.

Para além da configuração dos dispositivos de ventilação e da forma como são utilizados, a renovação de ar no interior dos edifícios depende de outros factores, dos quais se destacam a exposição do edifício face à acção do vento e a sua permeabilidade ao ar. Atendendo a estes aspectos, a BSI [17] apresenta também um quadro (Quadro 2.5) com os valores típicos da taxa de renovação de ar dos edifícios, em função da sua permeabilidade e exposição.

Quadro 2.5 – Valores típicos da renovação de ar em edifícios [17]

Descrição do edifício	Taxa horária de renovação de ar – n [h ⁻¹]
Edifício convenientemente selado localizado em local abrigado	0,5
Edifício corrente localizado em local abrigado	1,0
Edifício com elevada permeabilidade ao ar localizado em local abrigado	1,5
Edifício convenientemente selado localizado em local exposto	1,0
Edifício corrente localizado em local exposto	1,5
Edifício com elevada permeabilidade ao ar localizado em local exposto	2,0

2.2.4.3 HIGROMETRIA DOS LOCAIS

Como se poderá concluir pelo exposto, a humidade relativa de um local interior ventilado é sobretudo condicionada pela humidade exterior e pelo equilíbrio entre a produção de vapor no interior e o caudal de ventilação, podendo definir-se um parâmetro designado por **higrometria**

$\left(\frac{\omega}{n \cdot V}\right)$, que traduz o aumento da pressão do vapor de água interior em relação ao exterior.

A relação entre a humidade interior e exterior pode traduzir-se pela seguinte expressão [15]:

$$W_i = W_e \times \frac{1}{1 + \frac{T_i - T_e}{273}} + \frac{\omega}{n \cdot V} \quad (2.18)$$

ou simplificadamente [52]:

$$W_i \cong W_e + \frac{\omega}{n \cdot V} \quad (2.19)$$

em que:

- W_i : Humidade absoluta do ar interior - [kg/m³]
- W_e : Humidade absoluta do ar exterior - [kg/m³]
- ω : Produção de vapor no interior - [kg/h]
- n : Taxa horária de renovação de ar - [h⁻¹]
- V : Volume interior - [m³]
- T_i : Temperatura interior - [K]
- T_e : Temperatura exterior - [K]

A higrometria dos locais é um parâmetro de grande importância nos estudos de difusão de vapor através da envolvente dos edifícios, uma vez que define o gradiente de pressão de vapor a que se encontram submetidos os elementos que compõem essa envolvente. Contudo, como facilmente se compreenderá, este parâmetro apresenta importantes variações, não só entre diferentes edifícios mas também ao longo do tempo para um mesmo local (Figura 2.2).

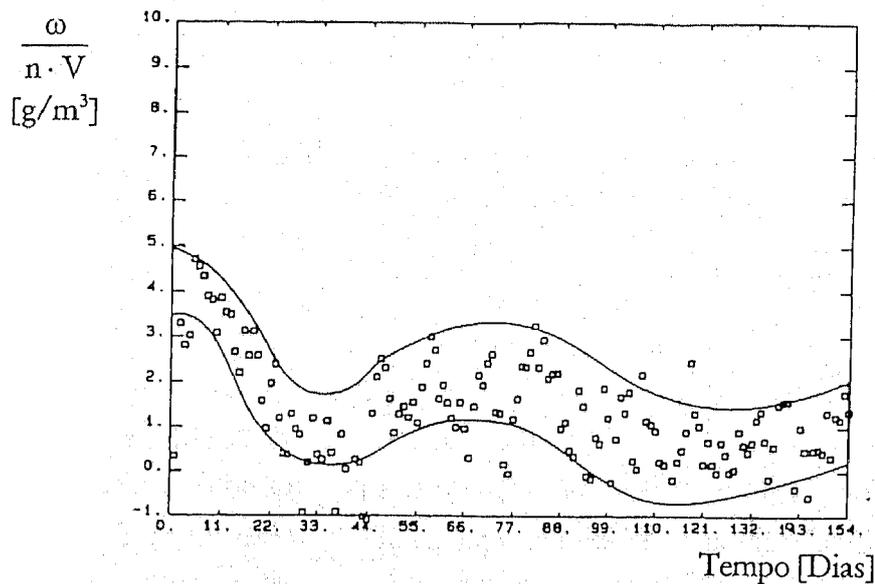


Figura 2.2 – Variação, ao longo do tempo, da higrometria de uma moradia [63]

Por forma a facilitar a simulação dos fenómenos de difusão de vapor através dos elementos construtivos, os edifícios normalmente são classificados em função de valores médios da sua higrometria. Em França, por exemplo, consideram-se quatro classes de higrometria dos edifícios, que se apresentam no Quadro 2.6 juntamente com edifícios que tipicamente correspondem a essas classes.

Quadro 2.6 – Classificação francesa dos edifícios em função da sua higrometria [15] e [49]

CLASSE	HIGROMETRIA	TIPO DE EDIFÍCIOS
I- Fraca higrometria	$\frac{\omega}{n \cdot V} \leq 2,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Escritórios, escolas, ginásios, oficinas e garagens sem produção de vapor, armazéns.
II- Média higrometria	$2,5 \times 10^{-3} < \frac{\omega}{n \cdot V} \leq 5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Edifícios de habitação não sobreocupados e correctamente ventilados.
III- Forte higrometria	$5 \times 10^{-3} < \frac{\omega}{n \cdot V} \leq 7,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Edifícios de habitação sobreocupados e com ventilação deficiente, locais com forte concentração humana ou animal, indústrias.
IV- Muito forte higrometria	$\frac{\omega}{n \cdot V} > 7,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Piscinas, certos locais industriais com grande produção de vapor, locais sanitários de colectividades.

A prEN ISO 13788 [52] apresenta uma classificação diferente, com 5 classes de higrometria cujo valor varia em função da média mensal da temperatura exterior. A Figura 2.3 representa graficamente as diferentes classes de higrometria $\left(\Delta v = \frac{\omega}{n \cdot V} \right)$ consideradas e no Quadro 2.7 referem-se alguns exemplos de edifícios que tipicamente pertencem a essas classes.

Refira-se que, na simulação dos fenómenos de difusão de vapor, os valores de higrometria a utilizar deverão ser os mais elevados da classe em que se insere o edifício em causa, excepto quando se disponham de medições apropriadas que permitam obter valores mais precisos.

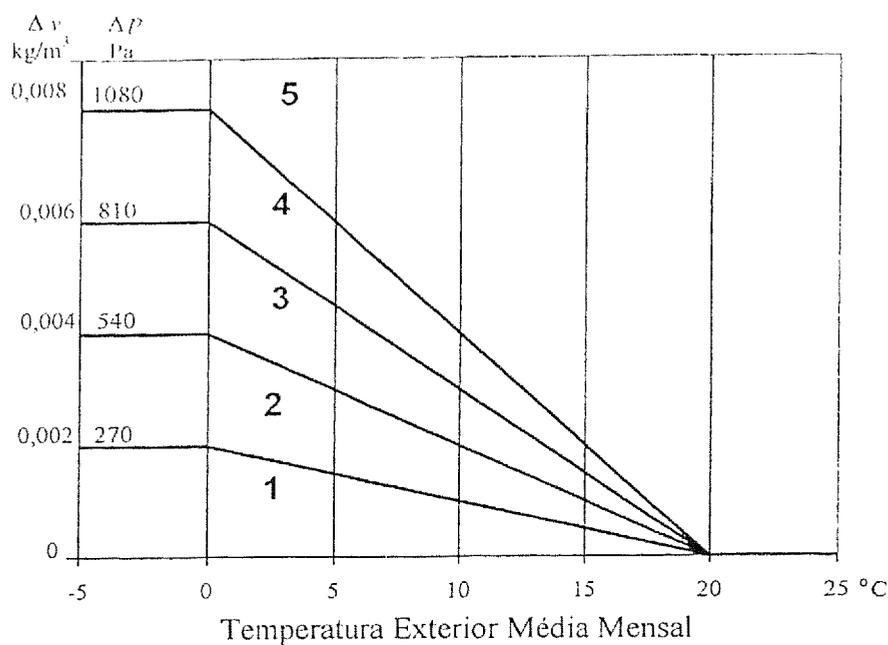


Figura 2.3 – Classes de higrometria dos edifícios $\left(\Delta v = \frac{\omega}{n \cdot V}\right)$, de acordo com a prEN ISO 13788 [52]

Quadro 2.7 – Edifícios que tipicamente se enquadram nas classes de higrometria apresentadas na Figura 2.3 [52].

Classe de Higrometria	Tipo de Edifícios
1	Armazéns
2	Escritórios, lojas comerciais
3	Habitações com pouca ocupação
4	Habitações com ocupação elevada, recintos desportivos, cozinhas, cantinas, edifícios aquecidos com aquecedores a gás
5	Edifícios especiais, como lavandarias, cervejarias, piscinas

2.2.5 CARACTERÍSTICAS DE PERMEABILIDADE AO VAPOR DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.2.5.1 PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA DO AR

O *Coefficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água do Ar* (π_{av}) representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa o ar por difusão, numa determinada direcção. Este

parâmetro depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar, podendo ser determinado a partir da seguinte expressão [85]:

$$\pi_{ar} = \frac{D}{R_v \cdot T} \quad (2.20)$$

em que:

π_{ar} : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar - [kg/(m·s·Pa)]

D: Coeficiente de difusão do vapor de água no ar - [m²/s]

R_v : Constante universal dos gases perfeitos relativa ao vapor de água = 461,520 J/(kg·K)

T: Temperatura absoluta - [K]

Alguns autores chegaram a diferentes expressões para a determinação do *Coeficiente de Difusão do Vapor de Água no Ar (D)*, sendo a de Schirmer a mais utilizada para cálculos em regime permanente [85]:

$$D = 2,306 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{P_0}{P_i}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,81} \quad (2.21)$$

em que:

D: Coeficiente de difusão do vapor de água no ar - [m²/s]

P_0 : Pressão atmosférica de referência = 101 325 Pa

P_i : Pressão atmosférica - [Pa]

T: Temperatura absoluta - [K]

T_0 : Temperatura de referência = 273,15 K (0 °C)

Apesar de não ser um parâmetro constante, é comum adoptar-se um valor médio para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar (π_{ar}). Assim, tomando como exemplo a norma DIN 4108 [51], para uma temperatura $t = 10$ °C temos:

$$\pi_{ar} = \frac{1}{1,5 \times 10^6} [\text{kg}/(\text{m.h.Pa})] = 185 \times 10^{-12} [\text{kg}/(\text{m.s.Pa})]$$

2.2.5.2 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS MATERIAIS

Para a determinação do fluxo de vapor que se difunde através de um elemento construtivo é necessário conhecer as características de permeabilidade ao vapor dos seus componentes. Para os materiais homogêneos (ou similares, como por exemplo o betão), essas características são expressas por um parâmetro designado *Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água (π)*, que representa a

quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão esse material, perpendicularmente às suas faces planas e paralelas, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre essas faces.

Um outro parâmetro correntemente utilizado na caracterização da permeabilidade ao vapor dos materiais é o *Factor de Resistência à Difusão de Vapor* (μ), que corresponde à relação, adimensional, entre a *Permeabilidade ao Vapor de Água do Ar* (π_{ar}) e a permeabilidade ao vapor de água do próprio material, indicando portanto quantas vezes a resistência à difusão de um provete desse material é maior do que a de uma camada de ar em repouso, de igual espessura e sujeita às mesmas solicitações.

$$\mu = \frac{\pi_{ar}}{\pi} \quad (2.22)$$

2.2.5.3 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

A *Permeância ao Vapor de Água* (Pe) de um elemento corresponde à densidade de fluxo de vapor de água que o atravessa, relativamente à diferença de pressão parcial de vapor a que está sujeito entre as suas faces. Por seu lado, a *Resistência à Difusão de Vapor de Água* (R_d) desse elemento corresponde ao inverso da sua Permeância, e os seus valores são dados por:

$$Pe = \frac{1}{R_d} = \frac{g}{\Delta P} \Leftrightarrow R_d = \frac{1}{Pe} = \frac{\Delta P}{g} \quad (2.23)$$

em que:

Pe : Permeância ao vapor de água do elemento construtivo - [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

R_d : Resistência à difusão de vapor do elemento construtivo - [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$]

g : Densidade do fluxo de difusão de vapor de água - [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

ΔP : Diferença de pressão de vapor de água - [Pa]

Quando temos um elemento construtivo constituído apenas por um material homogéneo de espessura (d) conhecida, podemos determinar a sua *Resistência à Difusão de Vapor de Água* (R_d) e a sua *Permeância* da seguinte forma:

$$Pe = \frac{1}{R_d} = \frac{\pi}{d} \Leftrightarrow R_d = \frac{1}{Pe} = \frac{d}{\pi} \quad (2.24)$$

em que:

π : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material - [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

d : Espessura do elemento - [m]

Tal como acontece com a permeabilidade dos materiais, também para o caso dos elementos construtivos existe um parâmetro que relaciona a sua resistência à difusão de vapor com a permeabilidade ao vapor de água do ar. Esse parâmetro designa-se por *Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente* (S_d) e corresponde à espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão de vapor de água que o elemento construtivo, obtendo-se da seguinte forma:

$$S_d = \pi_{ar} \cdot R_d = \mu \cdot d \quad (2.25)$$

Quando temos um elemento construtivo constituído por diferentes camadas, a sua resistência à difusão de vapor corresponde ao somatório das resistências dessas camadas, enquanto que a permeância do conjunto é o inverso dessa soma:

$$R_{d_{total}} = \sum_i \frac{d_i}{\pi_i} + \sum_j R_{d_j} + \frac{d_{ar}}{\pi_{ar}} = \frac{1}{Pe_{total}} \quad (2.26)$$

em que:

$R_{d_{total}}$: Resistência à difusão de vapor do elemento construtivo - [$m^2 \cdot s \cdot Pa / kg$]

d_i : Espessura da camada homogénea (i) - [m]

π_i : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água da camada homogénea (i) - [$kg / (m \cdot s \cdot Pa)$]

R_{d_j} : Resistência à difusão de vapor da camada não homogénea (j) - [$m^2 \cdot s \cdot Pa / kg$]

d_{ar} : Espessura do espaço de ar - [m]

π_{ar} : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar - [$kg / (m \cdot s \cdot Pa)$]

O processo de determinação destes parâmetros é idêntico ao que se utiliza nos cálculos de transferência de calor, mas desprezando a influência das resistências superficiais.

2.2.5.4 FACTORES QUE AFECTAM A PERMEABILIDADE AO VAPOR DOS MATERIAIS

2.2.5.4.1 Aspectos Gerais

Apesar de ser uma característica bem definida para cada material, a experiência tem mostrado que, em alguns materiais, a permeabilidade ao vapor é bastante influenciada pelas condições higrotérmicas a que o material é submetido, em particular a humidade relativa.

A permeabilidade ao ar e as propriedades dos materiais face à transferência de humidade na fase líquida, são também factores com alguma influência na sua permeabilidade ao vapor de água, para além das heterogeneidades inerentes aos materiais anisotrópicos.

2.2.5.4.2 Teor de Humidade dos Materiais

A generalidade dos materiais contém poros ou interstícios, que podem estar ligados entre si - materiais com porosidade aberta - ou não - materiais com porosidade fechada (Figura 2.4).

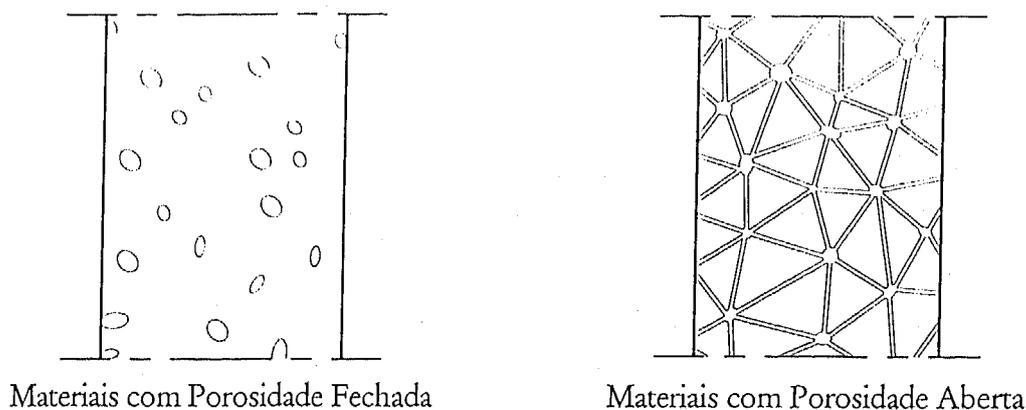


Figura 2.4 - Representação esquemática da porosidade dos materiais

No seu conjunto, os poros apresentam uma grande superfície interna, com afinidades para as moléculas de água. Contudo, para que um material possa sofrer humificação interna terá que apresentar uma porosidade aberta face à água na fase líquida ou na fase vapor, caso contrário apenas poderá ser humificado superficialmente.

Assim, quando uma estrutura porosa é colocada em contacto com água (na fase vapor ou na fase líquida), desde que não ocorra qualquer reacção química entre ambas, a fixação da humidade no meio poroso pode dar-se através de três mecanismos - a higroscopicidade (ou adsorção física), a condensação e a capilaridade [16]. A quantidade de água contida nos poros pode então variar desde o zero (correspondente ao material seco), até ao preenchimento total dos poros abertos [75]. Entre estes dois extremos, que dificilmente se atingem em condições naturais, existem alguns pontos intermédios bastante importantes (Figura 2.5e Figura 2.6).

Os mecanismos de fixação de humidade referidos são complexos e indissociáveis, podendo ainda juntar-se-lhes a acção da gravidade e de pressões externas, o que torna complexo o estudo e modelização do movimento da água no interior dos materiais de construção.

	[Diagrama de porosidade fechada]	[Diagrama de porosidade aberta]	
0	W_n	W_{cr}	W_{sat} W_{max}
Secagem Artificial	Domínio Higroscópico	Domínio Capilar	Humificação sob Pressão

Figura 2.5 - Descrição convencional dos teores de humidade de referência de um material poroso, segundo Freitas [64]

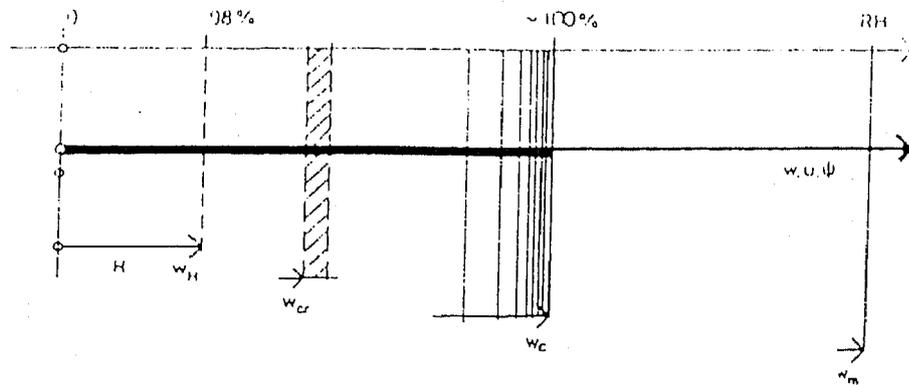


Figura 2.6 – Descrição convencional dos teores de umidade de referência de um material poroso, segundo Hens [76]

O *Teor de Umidade Higroscópico* (w_h) corresponde à quantidade de água que um material contém quando em equilíbrio com uma ambiência que apresenta uma determinada umidade relativa. Pode variar entre o zero absoluto, se o material estiver em contacto com uma ambiência de umidade relativa nula, e o *Teor de Umidade Crítico* (w_{cr}).

O *Teor de Umidade Crítico* (w_{cr}) é o teor de umidade que um material apresenta quando em contacto com uma ambiência saturada e abaixo do qual o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível, pelo que apenas ocorre transporte de vapor. É um parâmetro importante nos fenómenos de secagem e nas condensações internas em/entre camadas capilares [75].

O *Teor de Umidade de Saturação* (w_{sat}) corresponde à quantidade de água que um material contém quando em contacto com um plano de água durante um determinado período de tempo. Acima deste valor, a circulação de ar para dentro ou para fora do material deixa de ser possível.

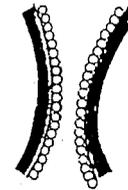
O *Teor de Umidade Máximo* (w_{max}) é o teor de umidade que um material apresenta quando todos os poros abertos se encontram totalmente preenchidos com água, situação que apenas se atinge através da imersão em vácuo. O intervalo entre o *Teor de Umidade de Saturação* (w_{sat}) e o *Teor de Umidade Máximo* (w_{max}) desempenha um papel importante nos riscos de danificação pelo gelo, que são tanto maiores quanto menor for esse intervalo.

2.2.5.4.3 Higroscopicidade dos Materiais

No interior dos poros dos materiais, as forças intermoleculares (forças de Van der Waals [16]) actuam sobre as moléculas de vapor de água, fixando-as à superfície dos poros, fenómeno este que se designa por adsorção ou higroscopicidade. A quantidade de água que é retida por um material através deste processo depende das características do próprio material, nomeadamente a sua estrutura porosa, e varia em função da umidade relativa do ambiente envolvente.

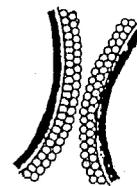
Nestas condições, se um material seco for colocado numa ambiência com temperatura constante, na qual se faz variar gradualmente a humidade relativa, de modo a que cada patamar seja mantido tempo suficiente para permitir a estabilização do material, verifica-se um aumento do seu peso, correspondente ao aumento do respectivo teor de humidade. Este processo apresenta três fases distintas (ver [16] e [76]):

1.^a Para valores muito baixos de humidade relativa ($0\% \leq HR \leq 20\%$), as moléculas de água adsorvidas fixam-se directamente sobre a superfície dos poros numa camada monomolecular – *adsorção monomolecular* – que será tanto maior quanto maior for a porosidade do material e menores forem os poros.



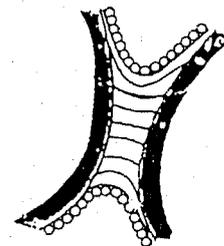
Adsorção Monomolecular

2.^a Para valores um pouco superiores de humidade relativa, as moléculas de água vão-se sobrepondo em camadas sucessivas – *adsorção plurimolecular*.



Adsorção Plurimolecular

3.^a Quando a humidade relativa ultrapassa o valor de cerca de² 30%, nos poros de menores dimensões as camadas de moléculas de água adsorvidas tocam-se, dando origem ao que se designa por *condensação capilar*. À medida que a humidade relativa sobe, este fenómeno ocorre num maior número de poros, até que, ao atingir o valor de 100%, toda a estrutura porosa deveria estar completamente preenchida de água. Contudo, na prática, o ar que fica retido nos poros impede que o material atinja a saturação por este processo.



Condensação Capilar

Esta variação de peso que o material sofre permite traçar uma curva (Figura 2.7), designada por *curva de adsorção isotérmica*, relacionando o teor de humidade do material com a humidade relativa da ambiência em que se encontra.

² O limite de 30% foi apontado por H. Hens em 1991 [76], enquanto que S. Bories, em 1982 [16], apontava um valor de cerca de 50%.

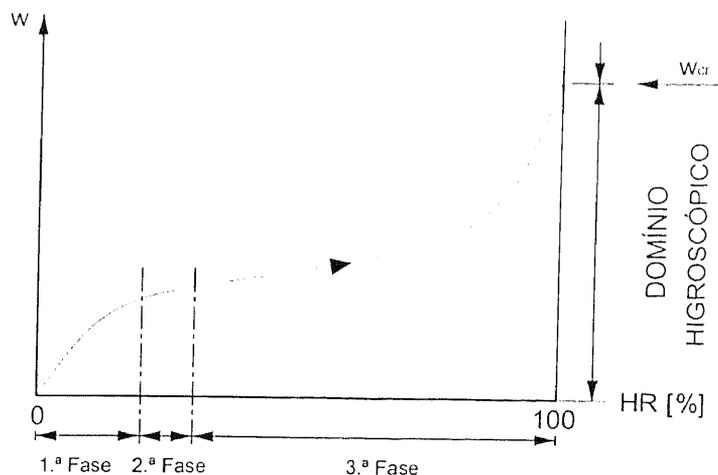


Figura 2.7 – Aspecto genérico de uma curva de adsorção isotérmica

Se o procedimento descrito anteriormente para a determinação da curva de adsorção isotérmica for efectuado em “sentido” inverso, isto é, se o material for colocado saturado numa ambiência com 100% de humidade relativa e esta for baixando gradualmente, encontra-se uma curva de “restituição higroscópica” [75]. Esta curva geralmente não é igual à curva de adsorção, apresentando, para a mesma humidade relativa, valores mais elevados do teor de humidade (Figura 2.8), sendo esta diferença designada de *histerésis*. Ao conjunto destas duas curvas dá-se o nome de curvas higroscópicas, que são características de cada material. Refira-se, contudo, que apesar de este fenómeno estar largamente confirmado pela experiência, existem ainda questões ligadas à influência da temperatura na *histerésis* que não estão completamente esclarecidas [64].

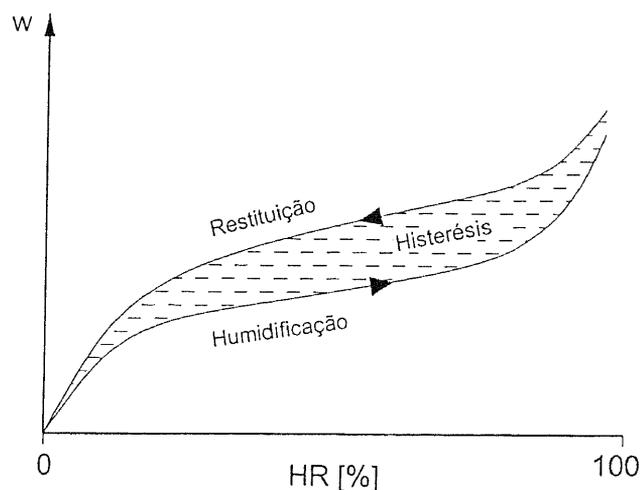


Figura 2.8 – Representação esquemática das curvas higroscópicas de um material

Alguns materiais conseguem reter por higroscopicidade quantidades de água significativas, mesmo para humidades relativas não muito elevadas, tendo a capacidade de a restituir ao ambiente adjacente quando a humidade relativa é baixa. Estes materiais dizem-se *higroscópicos*, como por exemplo a

madeira e a generalidade dos materiais fibrosos. Pelo contrário, se o material apresenta um peso praticamente constante qualquer que seja a humidade relativa do ambiente em que se encontre, diz-se *não higroscópico*, como é o caso do barro vermelho.

2.2.5.4.4 Condensação

Como foi já referido anteriormente, a condensação do vapor de água existente no ar pode ocorrer no interior de um elemento construtivo ou nos seus paramentos, e o resultado será obviamente a sua humedificação, eventualmente seguida de uma redistribuição da humidade.

Note-se contudo que, ao contrário da higroscopicidade, este mecanismo necessita de um gradiente de temperatura para que se verifique a sua ocorrência, uma vez que se a temperatura for constante ao longo de um elemento construtivo então não ocorrem condensações internas, pois a pressão de saturação é também constante e superior à pressão instalada, caso contrário corresponderia à ocorrência de condensações superficiais em ambas as faces do elemento.

2.2.5.4.5 Capilaridade

A capilaridade intervém como mecanismo de fixação de humidade quando um material é posto em contacto com água líquida. O contacto entre a água e a superfície dos poros do material conduz ao estabelecimento de um gradiente de pressão, que corresponde à diferença entre a pressão do ar (P_a) e a pressão da água ($P_{água}$) e é designado por pressão capilar (P_c).

Por sua vez, a pressão capilar, que é função da temperatura e da humidade do material, bem como da distribuição dos raios dos poros e da sua variação, dá origem a um fluxo de água (J_e) que tende a preencher completamente os poros (Figura 2.9).

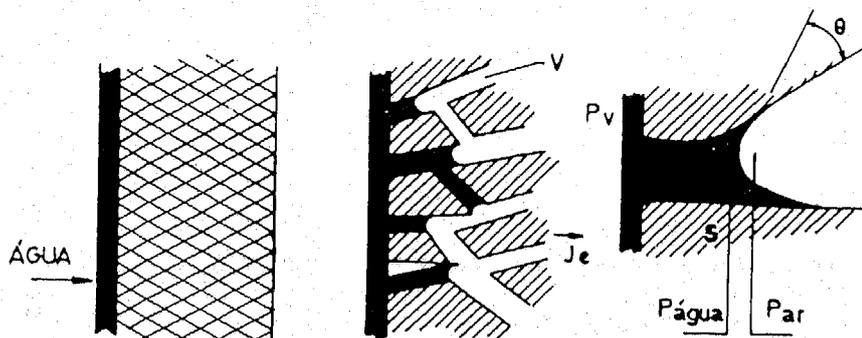


Figura 2.9 - Representação esquemática do fenómeno da capilaridade [64]

Tal como acontece com a higroscopicidade, o fenómeno da capilaridade pode ocorrer em condições termodinâmicas de equilíbrio no seio do material e apresenta um efeito de histerésis entre embebição e secagem.

2.2.5.4.6 Influência da Humidade Relativa na Permeabilidade ao Vapor dos Materiais

Com o objectivo de estudar a influência da humidade relativa nas características de permeabilidade ao vapor dos materiais e elementos de construção, Tveit [101] ensaiou vários materiais utilizando uma série de soluções salinas no interior de tinas de ensaio, tendo concluído que a variação da permeabilidade ao vapor com a humidade relativa depende sobretudo das propriedades higroscópicas dos materiais.

A permeabilidade ao vapor de materiais higroscópicos aumenta consideravelmente com o aumento da humidade relativa da ambiência. Por outro lado, a permeabilidade de materiais com pouca ou nenhuma higroscopicidade é praticamente independente da humidade relativa.

Na Figura 2.10 mostra-se, de uma forma esquemática, como o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (π) varia em função da humidade relativa.

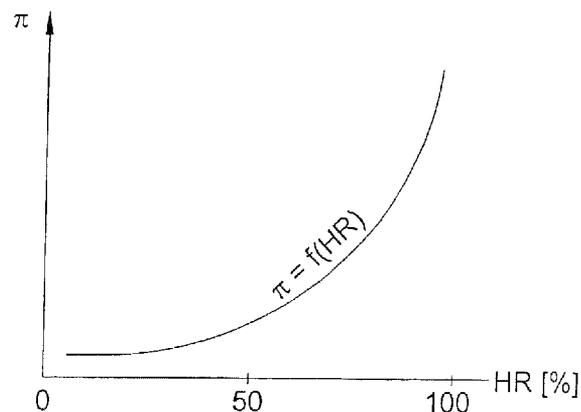


Figura 2.10 - Princípio de variação do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (π) em função da humidade relativa (HR)

Burch, Thomas e Fanney [17] (1991) realizaram vários ensaios com 10 materiais de construção, sendo estes submetidos a diferentes condições ambientais, e chegaram à conclusão que a permeância ao vapor de água dos provetes ensaiados é uma função exponencial da humidade relativa, do tipo que se apresenta seguidamente na expressão (2.27).

$$Pe = e^{(A_0 + A_1 \cdot HR + A_2 \cdot HR^2)} \quad (2.27)$$

em que:

- Pe: Permeância ao vapor de água - [kg/(m²·s·Pa)]
- e: Número de Nepper - $e \cong 2,718$
- A₀, A₁, A₂: Coeficientes da função exponencial, determinados por processos numéricos de regressão, de forma que se obtenha uma curva o mais próxima possível dos vários pontos encontrados.
- HR: Humidade Relativa - [%]

2.2.5.4.7 Influência da Temperatura na Permeabilidade ao Vapor dos Materiais

A temperatura tem alguma influência sobre a permeabilidade ao vapor de água dos materiais e elementos construtivos. Contudo, normalmente esta é menos importante que a da humidade relativa e na maior parte dos casos o seu efeito não é tomado em consideração.

Em [2] e [3] é apresentada uma equação que permite relacionar o valor da permeabilidade ao vapor de determinados materiais (nomeadamente resinas, borrachas e polímeros) com a temperatura:

$$\pi = \pi_0 \cdot e^{\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right)} \quad (2.28)$$

em que:

- π : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água
- π_0 : Constante para $T = \infty$
- e: Número de Nepper - $e \cong 2,718$
- E: Energia de activação
- T: Temperatura absoluta - [K]

2.3 MÉTODO DE GLASER

2.3.1 ASPECTOS GERAIS

O estudo teórico da transferência conjunta de calor e humidade em meios porosos não saturados e, em particular, em materiais e elementos de construção tem sido objecto de importante investigação, tendo surgido, a partir da década de cinquenta, vários modelos baseados na mecânica dos fluidos,

utilizando as leis de difusão de massa (fase líquida - DARCY; fase vapor - FICK) e de difusão de calor (FOURIER). Destes trabalhos, destacam-se os realizados por GLASER, KRISCHER, LUIKOV, PHILIP e DE VRIES, VOS e WHITAKER. [64].

O método de GLASER, apesar das suas limitações, é ainda hoje muito utilizado em engenharia civil, na análise dos riscos de ocorrência de condensações internas e na definição de regras de qualidade a que devem satisfazer os elementos construtivos face à difusão de vapor.

Este método parte do princípio de que, se um elemento construtivo estiver sujeito a um gradiente de pressões e temperaturas, então a pressão de saturação será variável de ponto para ponto. Deste modo, se a “curva” de pressões instaladas, gerada pelas condições limite, não intersectar a “curva” de pressões de saturação, não ocorrem condensações internas. No caso de se verificarem intersecções, então haverá condensações.

O programa de cálculo automático “CONDENSA”, desenvolvido no Laboratório de Física das Construções – LFC da FEUP, é baseado no método de GLASER.

2.3.2 DOMÍNIO DE APLICAÇÃO

A aplicação do método de Glaser requer a consideração de algumas hipóteses simplificativas, que são as seguintes:

- A humidade desloca-se apenas por transferência de vapor de água;
- Não há transporte de ar, pelo que a transferência de vapor se deve apenas à difusão;
- A difusão de vapor de água obedece à lei de FICK;
- O transporte de calor dá-se apenas por condução;
- O regime é permanente;
- Os materiais são não-higroscópicos;
- Os elementos de construção são estanques ao ar;
- Os elementos de construção têm as faces planas e paralelas;
- Os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e de condutibilidade térmica são constantes;
- Não há redistribuição da água condensada.

2.3.3 CÁLCULO ANALÍTICO

Considerando um elemento de construção constituído por materiais homogéneos, com diferentes camadas de faces planas e paralelas, o fluxo de vapor de água que atravessa esse elemento é dado, com base na lei de FICK, pela expressão:

$$g = \sum_j \frac{\pi_j}{d_j} \cdot (P_i - P_e) \quad (2.29)$$

em que:

g : Densidade de fluxo de difusão de vapor de água - [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

π_j : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água da camada j - [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

d_j : Espessura da camada j - [m]

P_i, P_e : Pressão parcial de vapor de água no interior e no exterior, respectivamente - [Pa]

Por sua vez, o fluxo de calor obedece à lei de FOURIER:

$$q = \sum_j \frac{\lambda_j}{d_j} \cdot (t_i - t_e) \quad (2.30)$$

em que:

q : Fluxo de calor por unidade de superfície - [W/m^2]

λ_j : Coeficiente de condutibilidade térmica da camada j - [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]

t_i, t_e : Temperatura interior e exterior, respectivamente - [$^\circ\text{C}$]

Deste modo, para aplicar o método de GLASER basta conhecer as condições climáticas interiores e exteriores (t_i, P_i, t_e, P_e), as propriedades dos materiais que constituem as diferentes camadas e respectivas espessuras (λ_j, π_j, d_j) e as resistências térmicas superficiais $\left(\frac{1}{h_i}, \frac{1}{h_e}\right)$.

A partir da expressão (2.30) pode-se determinar a “curva” das temperaturas instaladas nos diferentes pontos do elemento construtivo e, a partir destas, obter a “curva” das pressões de saturação (P_s), através do diagrama psicrométrico (ver 2.2.3.7). Por outro lado, a expressão (2.29) permite determinar a “curva” das pressões instaladas (P) no elemento.

A eventual zona de ocorrência de condensações internas será determinada considerando as seguintes condições:

- $P \leq P_s$, qualquer que seja o ponto no interior do elemento construtivo, pois a pressão parcial de vapor de água nunca pode ser superior à pressão de saturação;
- $\frac{d_g}{d_x} \leq 0$, ou seja, $g_{saída} \leq g_{entrada}$, o que significa que a densidade de fluxo não pode aumentar, uma vez que se considera que não há produção de humidade no interior do elemento.

Estas duas condições não são independentes e podem ser expressas da seguinte forma:

$P < P_s \Rightarrow \frac{d_g}{d_x} = 0$, isto é, a densidade de fluxo de vapor de água mantém-se constante e a pressão parcial de vapor de água (P) tem uma variação linear.

$P = P_s \Rightarrow \frac{d_g}{d_x} < 0$, isto é, a pressão parcial efectiva segue a variação da “curva” correspondente às pressões de saturação e a densidade de fluxo de vapor de água diminui.

2.3.4 ANÁLISE GRÁFICA

Graficamente, o método de Glaser tem as seguintes fases (Figura 2.11):

1ª Fase - Representa-se o elemento construtivo num sistema de eixos (R_d ; P), em que

$$R_{d_j} = \sum_j \frac{e_j}{\pi_j}$$

é a resistência à difusão acumulada no ponto j (do exterior para

o interior) e P_j a pressão parcial de vapor de água instalada nesse ponto;

2ª Fase - Calcula-se a “curva” das temperaturas instaladas no elemento construtivo e a “curva” das pressões de saturação correspondente, utilizando o diagrama psicrométrico (ver 2.2.3.7);

3ª Fase - Compara-se a “curva” das pressões de saturação com a “curva” das pressões instaladas³, gerada pelas condições nas suas faces. Se as “curvas” não se intersectarem, então não há condensações.

³ Atendendo a que no eixo das abcissas as camadas são representadas pela sua resistência à difusão de vapor de água, no caso de ausência de condensações a “curva” das pressões instaladas é um segmento de recta.

4ª Fase - Se a "curva" das pressões de saturação e a "curva" das pressões instaladas se intersectarem, então traçam-se as tangentes à "curva" das pressões de saturação, a partir dos pontos que definem as pressões instaladas nas suas faces, delimitando-se assim a zona onde ocorrem as condensações.

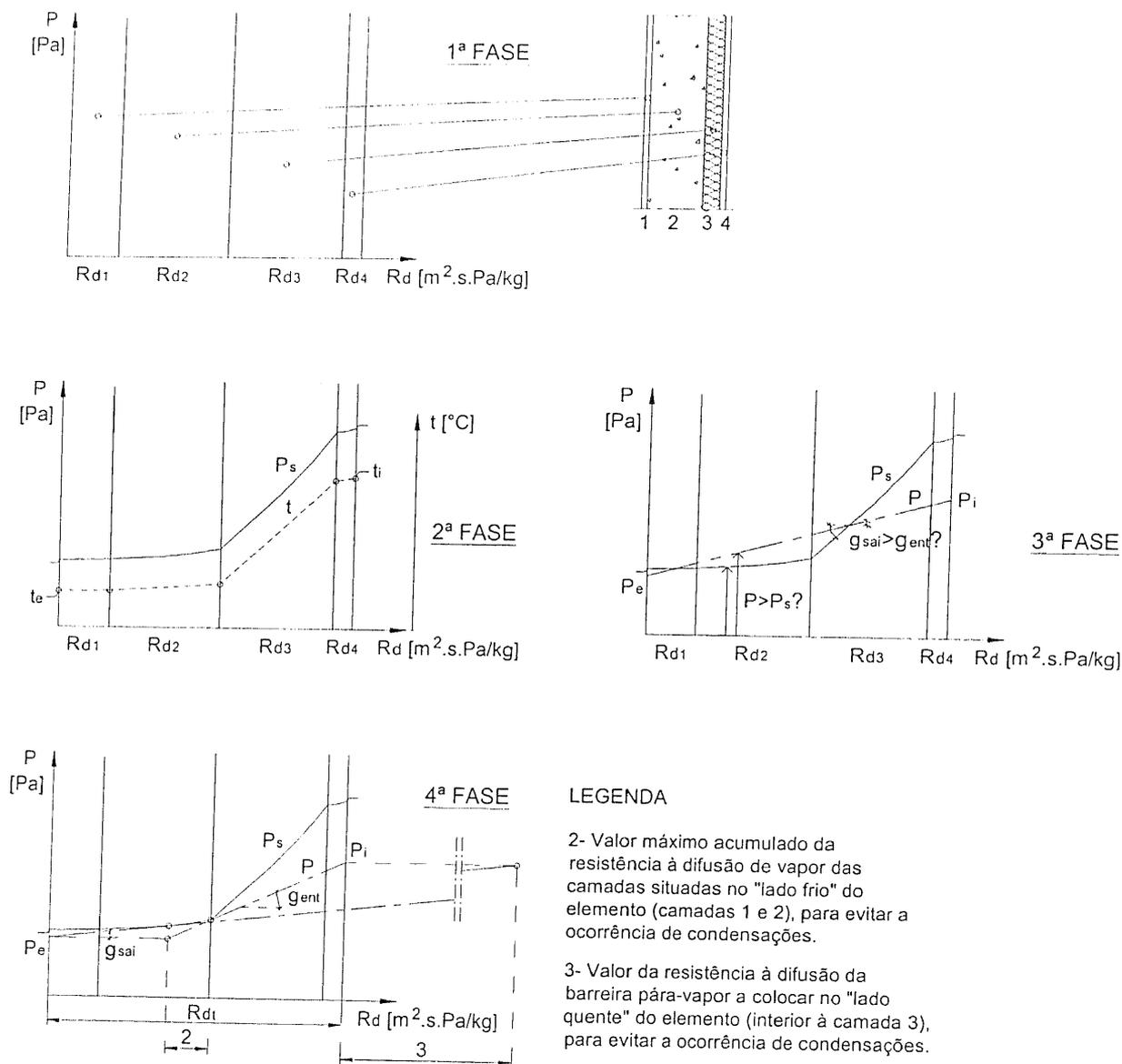


Figura 2.11 – Representação gráfica do método de GLASER

Para determinar a quantidade de humidade que se deposita no interior do elemento de construção, basta aplicar a lei de FICK e considerar que o fluxo condensado é igual à diferença entre os fluxos de entrada e de saída nas superfícies de abcissa x_1 e x_2 (Figura 2.12), que limitam a zona de condensações.

$$g_{\text{condensado}} = \left(\frac{P_i - P_x}{R_{d_{\text{total}}} - R_{d_x}} \right)_{x=x_2} - \left(\frac{P_x - P_e}{R_{d_x}} \right)_{x=x_1} \quad (2.31)$$

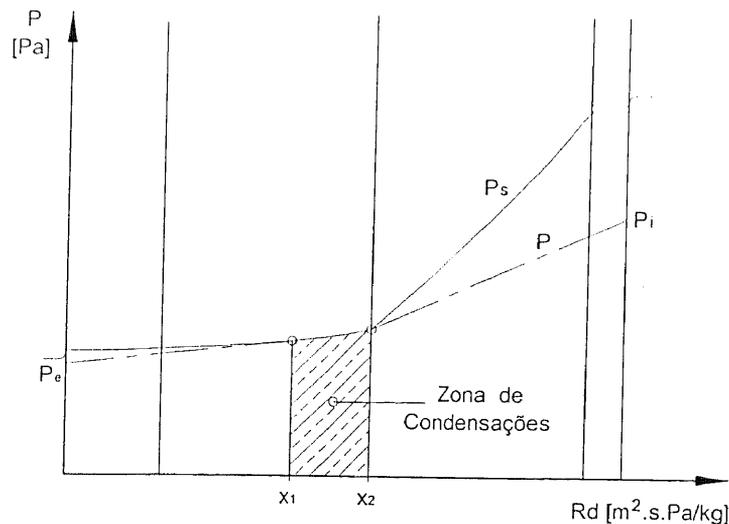


Figura 2.12 – Determinação da zona de ocorrência de condensações no interior de uma parede (método de GLASER)

2.3.5 O PROBLEMA DA SECAGEM

Apesar de normalmente não se entrar em linha de conta com a secagem na utilização do método de Glaser, a prEN ISO 13788 [52] propõe que esta seja considerada. Assim, a análise dos elementos construtivos deverá ser feita para um período de um ano, dividido em 12 períodos (12 meses). Em cada período de análise, as condições higrotérmicas que condicionarão a análise deverão corresponder às condições médias de cada um dos meses do ano.

A análise deverá iniciar-se pelo primeiro mês em que se registam condensações, que deverá ser encontrado por tentativas. Se em nenhum mês se registarem condensações então termina-se o processo com essa indicação. Se, pelo contrário, se registarem condensações em todos os meses, então pode iniciar-se a simulação por qualquer um deles.

Para ter em conta a secagem, a prEN ISO 13788 [52] sugere que na simulação do mês seguinte ao primeiro (que, como se explicou, terá condensações), as interfaces em que se registam condensações no primeiro mês vão considerar-se como saturadas no mês seguinte, e então o fluxo de difusão de vapor terá o sentido do interior para o exterior do elemento construtivo, como é o caso das interfaces $S'_{d,c}$, $S'_{d,c1}$ e $S'_{d,c2}$ da Figura 2.13.

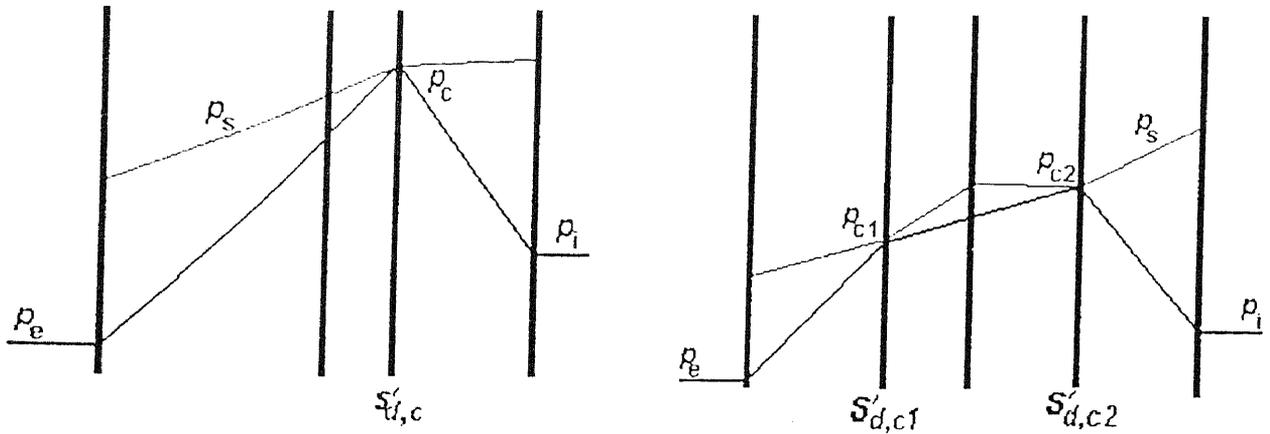


Figura 2.13 – Quantificação da secagem segundo a prEN ISO 13788 [52]

O processo é assim repetido para todos os meses, podendo registar-se situações em que um elemento apresenta secagem de umas interfaces, como é o caso da interface $S'_{d,c2}$ da Figura 2.14, e condensações noutras, como é o caso da interface $S'_{d,c1}$ da Figura 2.14.

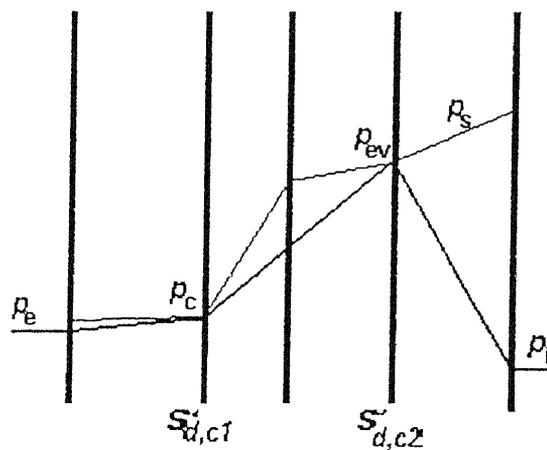


Figura 2.14 – Situação com secagem de uma interface ($S_{d,c2}$) e condensações noutra ($S_{d,c1}$) [52].

Se um elemento chegar ao fim dos 12 meses e o fluxo de secagem compensar o fluxo condensado, então não haverá problemas, caso contrário será necessário rever a sua concepção. Refira-se que os fluxos são calculados de acordo com a expressão (2.31).

3. BARREIRAS PÁRA-VAPOR

3.1 DEFINIÇÃO

A expressão barreira pára-vapor é utilizada, em Portugal, para a designação de componentes que oferecem uma resistência significativa à passagem de vapor de água.

Em alguma bibliografia belga ([45] e [46], por exemplo) é possível encontrar uma designação idêntica para este tipo de materiais – “écran pare-vapeur”. Noutros países, como a França, o Reino Unido ou os Estados Unidos, utilizam-se termos como “barrière de vapeur”, “vapour control layer” ou “vapor retarders”, respectivamente, e a ASHRAE [3] faz inclusivamente a distinção entre “vapor retarders” (componentes que dificultam a transferência de vapor de água) e “vapor barriers” (componentes cuja permeância ao vapor de água é nula).

A designação “pára-vapor” não descreve da forma mais adequada o comportamento em serviço deste tipo de materiais ou elementos construtivos, pois apesar da elevada resistência à difusão de vapor, a generalidade destes componentes não impede completamente a sua passagem. Contudo, tem a virtude de enfatizar a sua principal função.

3.2 MATERIAIS

Existem vários componentes construtivos que poderão actuar como barreira pára-vapor, face às suas características de permeabilidade ao vapor de água. Estas propriedades poderão trazer vantagens ou problemas no controlo da difusão de vapor, em função do seu posicionamento relativo no elemento construtivo em que se insere, como se refere mais à frente no § 5.1.2.

Contudo, a designação de “barreira pára-vapor”, da forma como aqui é interpretada, aplica-se a materiais ou elementos que se destinam essencialmente a limitar as transferências de vapor de água, por forma a eliminar ou minimizar os problemas de condensações internas.

As barreiras pára-vapor podem agrupar-se em duas tipologias principais [6]:

- Membranas – Consistem em elementos laminares pré-fabricados de pequena espessura. Podem ser rígidas, tais como plásticos reforçados, alumínio ou outras chapas metálicas, ou flexíveis, como folhas metálicas (Figura 3.1), papéis, filmes e folhas de plástico (Figura 3.1) ou feltros;
- Películas de Revestimento – São compostos semi-líquidos (Figura 3.2) com alguma resistência à difusão de vapor de água após o endurecimento, como é o caso de algumas tintas e materiais que fundem por acção da temperatura. A sua composição normalmente é do tipo betuminosa, resinosa ou polimérica, podendo aplicar-se a pincel, a rolo, com espátula, etc., em função do tipo de material e do tipo de suporte.

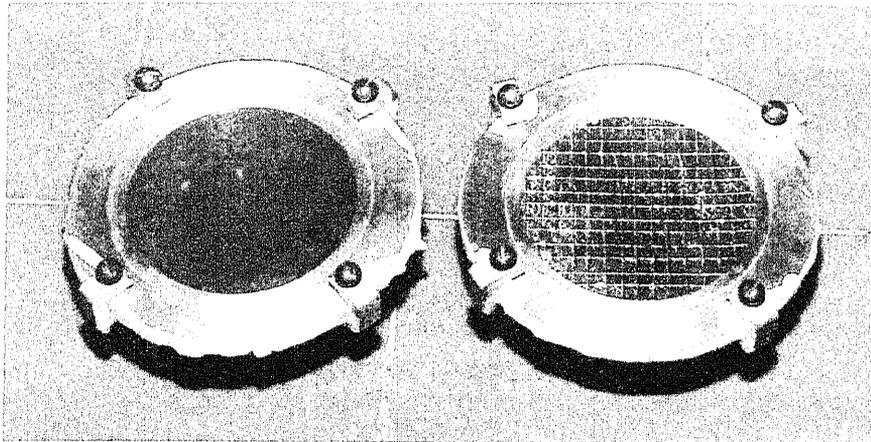


Figura 3.1 – Exemplo de barreiras pára-vapor tipo membrana (à esquerda uma folha de polietileno e à direita uma folha de alumínio)

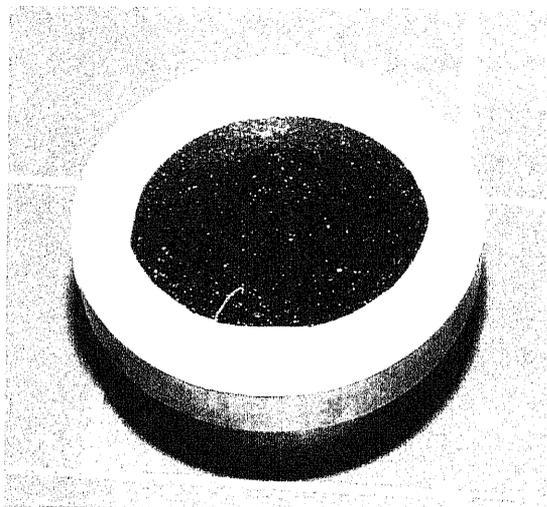


Figura 3.2 – Exemplo de uma barreira pára-vapor tipo película de revestimento

3.3 BARREIRAS “INTELIGENTES”

3.3.1 CARACTERIZAÇÃO

Para além dos produtos anteriormente referidos, existem actualmente no mercado produtos correntemente designados de barreiras “inteligentes”, cujo princípio de funcionamento assenta basicamente na sua capacidade de restringir as transferências de humidade em fase vapor através da envolvente dos edifícios para as situações normais de utilização, permitindo também a secagem de água que possa ficar retida no seio do elemento construtivo, assim que as condições climáticas sejam propícias.

Estas características tornam as barreiras “inteligentes” particularmente indicadas para elementos construtivos ligeiros, em que se procuram eliminar os espaços de ar ventilados (ver § 5.1.3) e em que as exigências de estanquidade à água normalmente obrigam ao recurso a paramentos exteriores muito impermeáveis e que dificultam a transferência de humidade nas diferentes fases, nomeadamente na fase vapor, o que cria alguns problemas na sua secagem.

Conhecem-se, até ao momento, dois tipos de materiais com estas capacidades:

- Uma membrana de poliamida (também designada por nylon) desenvolvida pelo Fraunhofer Institute for Building Physics;
- Uma membrana desenvolvido na Dinamarca, constituída por um feltro absorvente confinado entre tiras de material plástico (barreira pára-vapor).

3.3.2 MEMBRANAS DE POLIAMIDA

As membranas de poliamida têm sido sobretudo utilizadas na embalagem de alimentos, com a função de impedir a transferência de odores. Apresentam boa resistência mecânica, nomeadamente a esforços de tracção (cerca de 3 vezes a do polietileno), são pouco inflamáveis e são impermeáveis a substâncias orgânicas, como por exemplo tratamentos de preservação de madeira [57].

Apesar de, nas situações correntes, este material ser pouco permeável ao vapor de água, a sua capacidade para adsorver e absorver água provoca um aumento do seu teor de humidade quando em contacto com ambientes húmidos, aumentando também a sua permeabilidade ao vapor de forma significativa (Figura 3.3). Recorde-se que este fenómeno foi já abordado anteriormente no § 2.2.5.4.6.

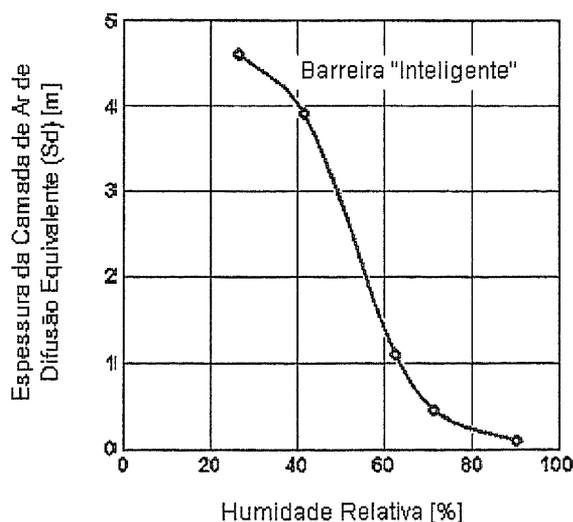


Figura 3.3 – Variação das características de permeabilidade ao vapor da membrana de poliamida em função da humidade relativa ambiente [57]

Este tipo de comportamento pode ser bastante vantajoso para elementos em que seja necessária uma barreira pára-vapor, mas em que exista o risco de humidificação do seio do elemento construtivo e a sua secagem para o exterior não seja viável, quer pela elevada estanquidade das camadas exteriores, quer pela impossibilidade de criar espaços de ar ventilados que permitam essa secagem.

Considere-se, por exemplo, uma parede com uma barreira pára-vapor adjacente à face interior da camada de isolamento térmico, pelo exterior do qual existe um revestimento de elevada estanquidade (Figura 3.4). Nos climas frios e temperados existe uma marcada diferença da humidade relativa interior dos edificios entre o Verão e o Inverno. Enquanto que no Inverno o valor normalmente não ultrapassa os 50%, desde que os espaços sejam convenientemente aquecidos e ventilados, no Verão a humidade relativa interior é geralmente superior a 60% [57].

Assim, durante o Inverno, quando o fluxo de vapor se regista normalmente do interior para o exterior, a baixa humidade relativa do ambiente interior leva a que a barreira de poliamida apresente uma baixa permeância ao vapor, reduzindo os riscos de ocorrência de condensações na interface entre a camada de isolamento e o revestimento exterior. No Verão, o aumento da humidade relativa do ambiente interior e a própria humidificação do elemento construtivo (nomeadamente devido a condensações internas) conduzem a um aumento da permeância ao vapor da barreira de poliamida, facilitando a secagem para o ambiente interior.

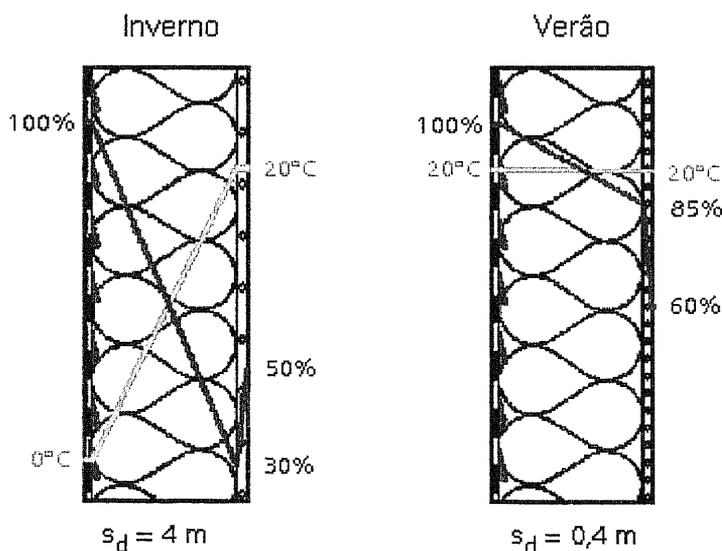


Figura 3.4 – Princípio de funcionamento da membrana de poliamida [57]

3.3.3 BARREIRA “INTELIGENTE” DESENVOLVIDA NA DINAMARCA

Tal como se referiu anteriormente, uma outra barreira “inteligente” foi desenvolvida na Dinamarca, sendo constituída por um feltro absorvente com tiras de material plástico adjacentes a ambas as faces, de forma descontínua e de modo a que as faixas da membrana sem material plástico não se encontram no mesmo alinhamento em ambos os lados do feltro (Figura 3.5).

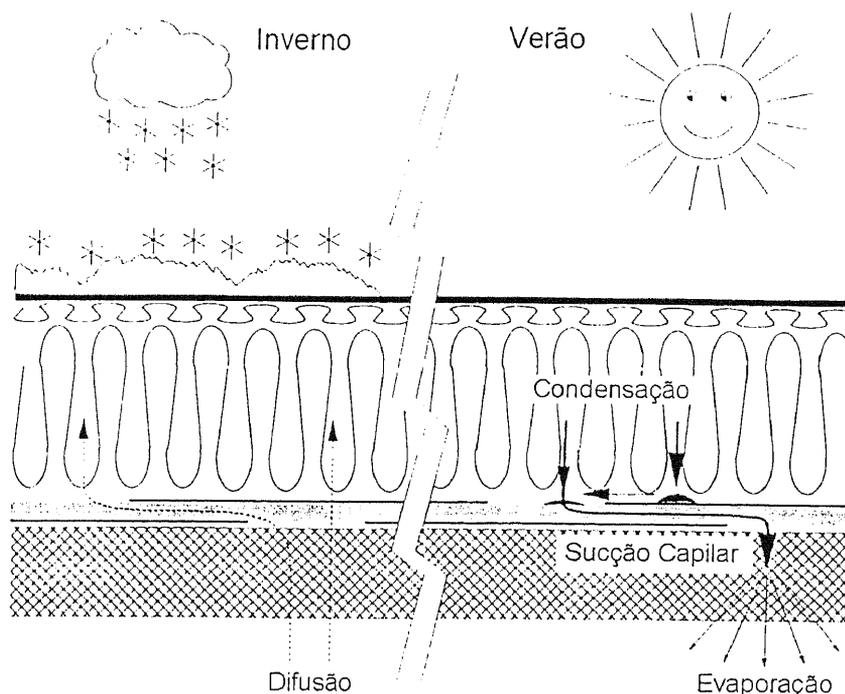


Figura 3.5 – Princípio de funcionamento da barreira “inteligente” desenvolvida na Dinamarca [81]

As tiras de material plástico oferecem uma elevada resistência à difusão de vapor, desempenhando a função de barreira pára-vapor, para o sentido normal do fluxo (normalmente registado no Inverno). Contudo, a humidade que eventualmente se acumule no seio do elemento construtivo pode ser absorvida pelo feltro que compõe a membrana e transferida para o ambiente interior, directamente ou através de eventuais camadas interiores à membrana (por exemplo um revestimento).

3.4 CLASSIFICAÇÃO DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR EM FUNÇÃO DA SUA PERMEÂNCIA

A permeância ao vapor de água é, naturalmente, o parâmetro mais importante na caracterização de uma barreira pára-vapor. Para a generalidade deste tipo de componentes, este parâmetro não varia linearmente com a espessura.

Um valor referido pela ASHRAE [3] como limite máximo para classificação de um elemento como barreira pára-vapor corresponde a $P_e = 1 \text{ perm} = 57,2 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, apesar de hoje em dia este valor apenas ser aceitável para utilização em edifícios residenciais.

Segundo Latta [87], no Canadá uma barreira pára-vapor (vapour barrier) pode ser do Tipo I, devendo nesse caso apresentar uma permeância não superior a $14,3 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ($=0,25 \text{ perm}$), ou do Tipo II, passando o limite máximo da permeância a ser de $42,9 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ($=0,75 \text{ perm}$) antes do “envelhecimento” e de $57,2 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ($=1 \text{ perm}$) após “envelhecimento”.

Na Bélgica, o CSTC ([45] e [46]) define uma classificação de barreiras pára-vapor, que se apresenta no Quadro 3.1, em função da espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d).

Quadro 3.1 – Classificação de barreiras pára-vapor, em função das suas características de permeabilidade ao vapor de água ([45] e [46])

Classe	S_d	P_e
E1	$2 \text{ m} < S_d \leq 5 \text{ m}$	$39 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \leq P_e < 98 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
E2	$5 \text{ m} < S_d \leq 25 \text{ m}$	$7,8 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \leq P_e < 39 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
E3	$25 \text{ m} < S_d \leq 200 \text{ m}$	$0,98 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \leq P_e < 7,8 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
E4	$S_d > 200 \text{ m}$	$P_e < 0,98 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

3.5 FACTORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DAS BARREIRAS PÁRA-VAPOR

3.5.1 ASPECTOS GERAIS

As características de permeabilidade ao vapor de uma barreira pára-vapor podem sofrer alterações significativas ao longo do seu “período de vida”. A existência de orifícios, mesmo que de pequenas dimensões, pode comprometer seriamente o seu funcionamento. Para alguns componentes, por exemplo, o simples manuseamento dos materiais pode originar a sua perfuração, aumentando significativamente a sua permeância.

As condições de serviço dos elementos construtivos também poderão afectar o desempenho das barreiras pára-vapor incluídas na sua composição, devido, por exemplo, ao contacto com temperaturas muito elevadas ou muito baixas, com substâncias susceptíveis de provocar degradação, tais como água, óleos, etc..

Outras zonas problemáticas são as juntas, os pontos de atravessamento de tubagens ou outras zonas pontuais que necessitam de selagem. É importante garantir a continuidade da barreira, pelo que as juntas devem ser estanques e de fácil execução. Refira-se que mesmo a classificação E1 (apresentada anteriormente no Quadro 3.1) apenas se pode atribuir nas situações em que seja garantida a continuidade da barreira pára-vapor e a conveniente estanquidade das juntas. Para os sistemas das classes E3 e E4 é ainda indispensável assegurar a estanquidade ao ar.

Assim, para além da permeabilidade ao vapor, existem outras propriedades que poderão ter maior ou menor importância no desempenho de uma barreira pára-vapor, de acordo com o tipo de aplicação pretendida, tais como:

- Resistência mecânica, nomeadamente a esforços de tracção, punçoamento, etc.;
- Elasticidade;
- Estabilidade dimensional;
- Estabilidade higrotérmica;
- Resistência a agentes de deterioração;
- Facilidade de fabrico, aplicação e selagem das juntas;
- Adequado comportamento ao fogo;
- Aderência (normalmente sem importância para barreiras do tipo membrana);
- Etc..

Nos Estados Unidos existem já procedimentos de ensaio normalizados para avaliar o comportamento das barreiras pára-vapor face a alguns destes parâmetros, cujo interesse se procura esclarecer de seguida. Refira-se, contudo, que esses ensaios estão sobretudo adaptados a barreiras do tipo membrana flexível.

3.5.2 COMPORTAMENTO APÓS EMBEBIÇÃO E SECAGEM E APÓS EMBEBIÇÃO PROLONGADA

Tal como acontece com outros materiais de construção, as barreiras pára-vapor, após fabrico, podem ser submetidas a várias condições de humedificação e secagem e de imersão, total ou parcial, que poderão comprometer o seu desempenho, nomeadamente por poderem originar corrosão, delaminação ou alterações nas suas características de permeabilidade ao vapor de água.

Para avaliar a influência deste tipo de solicitações no comportamento de barreiras pára-vapor, as normas ASTM C 1136 [9] e ASTM E 154 [8] indicam ensaios que podem ser realizados com esse fim.

Após serem submetidos a determinadas condições de ensaio, os provetes dos materiais a testar são sujeitos a análises específicas para determinar os riscos de ocorrência de corrosão ou delaminação, assim como a ensaios de permeabilidade ao vapor cujos resultados serão comparados com os resultados dos ensaios realizados sobre provetes normais, isto é, provetes que não são submetidos a essas mesmas condições de ensaio.

3.5.3 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

As finas membranas utilizadas como barreiras pára-vapor são sujeitas a vários tipos de tensões de manuseamento.

A resistência à tracção de uma barreira permite ter uma ideia sobre a sua resistência ao corte e a alongamentos permanentes em condições normais de utilização, podendo ser utilizada como termo de comparação entre diferentes materiais que estejam a ser considerados para uma determinada utilização [8].

3.5.4 RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO

Os esforços de punçoamento são dos esforços mais importantes a que as barreiras pára-vapor do tipo membrana são submetidas durante a sua utilização [8].

Na normalização americana está prevista a realização de um ensaio para avaliar este parâmetro, que consiste em medir a força necessária para provocar a perfuração do material a ensaiar com um determinado dardo pontiagudo.

Se a constituição das barreiras não for homogénea, é possível que a resistência ao punçoamento não seja igual para ensaios realizados sobre as diferentes faces. Nestes casos, para as barreiras que ficam expostas após aplicação, é possível realizar os ensaios apenas sobre a face que ficará exposta em serviço, caso contrário é necessário testar as diferentes faces.

3.5.5 RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA PLÁSTICA E A ELEVADAS TEMPERATURAS

Existem determinados materiais que, se permanecerem sob tensão por períodos de tempo prolongados, tornam-se menos espessos devido a fenómenos de fluência plástica. As mesmas variações dimensionais podem ocorrer em alguns materiais quando são submetidos a temperaturas elevadas [8].

Esta diminuição de espessura afecta a permeância ao vapor das barreiras e as potenciais alterações podem ser avaliadas determinando as características de permeabilidade ao vapor de provetes dos

materiais a ensaiar, após serem submetidos a temperaturas elevadas e/ou tensões por períodos prolongados.

A norma ASTM E 154 [8], por exemplo, prevê que antes dos ensaios de permeabilidade ao vapor, os provetes sejam colocados durante 28 dias num ambiente com uma temperatura de 60 a 62 °C e uma humidade relativa de 28% a 32%, sobre uma camada de rocha esmagada (dimensões de 12 a 19 mm), cuidadosamente nivelada, e com uma carga superior de 11 kg, distribuída por uma área de $152 \times 152 \text{ mm}^2$.

3.5.6 RESISTÊNCIA A BAIXAS TEMPERATURAS

Algumas barreiras podem ficar expostas a temperaturas baixas, que reduzem a sua flexibilidade. Nestas circunstâncias, alguns materiais podem fendilhar, romper ou desagregarem-se ao serem manuseados.

Para este tipo de exposições, é necessário colocar os provetes do material a ensaiar e um cilindro metálico com 25 mm de diâmetro (ver ASTM C 1136 [9] e ASTM E 154 [8]) num ambiente com baixa temperatura (pré-estabelecida), durante um determinado período de tempo. Em seguida, dobram-se alguns provetes em torno do cilindro metálico, verificando se não ocorre qualquer fissuração ou delaminação.

Os restantes provetes são utilizados em ensaios de permeabilidade ao vapor, comparando os resultados com os valores normais, obtidos com provetes não sujeitos a estas condições de ensaio.

3.5.7 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

As barreiras pára-vapor do tipo membrana não devem sofrer variações dimensionais significativas durante a sua utilização, pois pode comprometer o seu desempenho, nomeadamente nas juntas e pontos singulares.

As barreiras pára-vapor flexíveis usadas com isolantes térmicos não devem sofrer variações dimensionais superiores a 0,25%, após serem expostas, durante 15 min, a uma temperatura de $93 \pm 2 \text{ °C}$ [9].

3.5.8 COMPORTAMENTO AO FOGO

Algumas barreiras pára-vapor podem ficar com uma face directamente exposta a chamas, pelo que o seu comportamento ao fogo deverá ser apropriado, em termos de propagação de chamas e de desenvolvimento de fumos.

Se a constituição das barreiras não for homogénea ao longo da espessura, os ensaios para determinar o seu comportamento ao fogo deverão ser efectuados sobre a superfície que ficará exposta em serviço.

3.5.9 RESISTÊNCIA AO DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS

Não se deve verificar o desenvolvimento de fungos nas barreiras pára-vapor, o que poderá ser avaliado através da realização de ensaios normalizados, em que três provetes das barreiras a testar são expostos a determinados ambientes particularmente propícios ao desenvolvimento de fungos.

As folhas metálicas não necessitam de ser testadas. As barreiras com composição não homogénea ao longo da espessura devem ser submetidas a ensaios em ambas as faces, excepto se uma das faces for metálica, que não necessita de ser testada [9].

3.5.10 RESISTÊNCIA À EXPOSIÇÃO A RAIOS ULTRAVIOLETA

Após o fabrico e até à aplicação as barreiras pára-vapor podem ficar sujeitas à acção de radiação ultravioleta, que poderá afectar as suas características de permeabilidade ao vapor.

A norma ASTM E 154 [8] propõe que este risco seja avaliado comparando os valores da permeância ao vapor obtidos em ensaios realizados sobre provetes das barreiras a testar, antes e após serem submetidos à radiação de lâmpadas Xénon.

Contudo, a mesma norma refere que não existe necessariamente uma relação entre os resultados da exposição a lâmpadas Xénon e ao ambiente natural exterior, ou outro qualquer ambiente artificial usado em laboratório.

3.5.11 RESISTÊNCIA À DEGRADAÇÃO POR ORGANISMOS E SUBSTÂNCIAS EM CONTACTO COM O SOLO

Alguns materiais, quando em contacto com o solo (caso dos pavimentos e paredes enterrados), podem ser atacados por organismos ou substâncias aí presentes, o que pode afectar as suas propriedades, nomeadamente a sua permeância ao vapor de água.

Para quantificar este risco a ASTM E 154 [8] propõe que, à semelhança do que se referiu para a exposição a raios ultravioleta, se compare a permeância ao vapor dos provetes das barreiras a testar, antes e após serem colocados em contacto com solo de grande actividade microbiológica.

Nestes ensaios, os provetes são colocados dentro de recipientes apropriados e totalmente envolvidos por solo rico em organismos destrutivos de celulose. Os recipientes são então colocados num compartimento escuro, a uma temperatura de 27 ± 2 °C e uma humidade relativa de 70 ± 3 %, durante um determinado período de tempo, que dependerá da actividade microbiológica do solo. De seguida, os provetes são limpos e pesados, quando atingirem peso estável, sendo então submetidos a ensaios de permeabilidade ao vapor [8].

A mesma norma refere ainda que a diminuição da resistência mecânica do material pode-se estimar como sendo proporcional à perda de peso dos provetes durante o acondicionamento em contacto com o solo.

3.5.12 RESISTÊNCIA À DEGRADAÇÃO POR PRODUTOS VENENOSOS PARA SOLOS

Existem alguns produtos venenosos que são aplicados em solos, nomeadamente para evitar o aparecimento de térmitas, e que podem provocar deterioração de alguns tipos de barreiras pára-vapor, nomeadamente quando o veículo utilizado para a sua diluição é um produto petrolífero.

Tal como acontece com as restantes substâncias em contacto com o solo, o efeito que os produtos petrolíferos podem ter sobre as barreiras pára-vapor pode ser determinado colocando provetes das barreiras a testar em contacto com um solo rico em produtos desse género, num compartimento com uma temperatura de 27 a 32 °C durante 10 dias. Os provetes são então limpos e condicionados até atingirem peso constante e são submetidos a ensaios para determinar a sua permeância ao vapor, resistência à tracção e alongamento para a carga de rotura, cujos resultados serão comparados com os resultados obtidos para provetes que não estiveram em contacto com o solo [8].

3.6 SELECÇÃO DAS BARREIRAS PÁRA-VAPOR

Como se referiu anteriormente, a escolha de uma barreira pára-vapor é sobretudo orientada pelas suas características de permeabilidade ao vapor, que serão condicionadas pelas solicitações higrotérmicas do elemento construtivo em que se insere, nomeadamente as diferenças de temperatura e humidade relativa dos ambientes que separa.

Ao seleccionar uma barreira pára-vapor deve atender-se também às restantes solicitações a que é normalmente submetida, não só na fase de utilização mas também nas restantes fases que sucedem a sua produção, podendo mesmo justificar-se a realização de ensaios (alguns dos quais foram já mencionados no § 3.5) que permitam caracterizar o comportamento do sistema (incluindo juntas e ligações) após ser submetido a determinadas condições.

A fragilidade mecânica de alguns materiais, por exemplo, poderá impedir a sua utilização em determinadas situações ou justificar a utilização de espessuras mais elevadas do que aquelas que seriam necessárias se apenas se atendesse aos valores da permeância medidos em laboratório. Noutros casos, o contacto com determinados produtos ou ambientes agressivos poderá provocar a sua degradação prematura, sendo necessário equacionar este aspecto na fase de concepção dos elementos construtivos.

A importância de cada um dos parâmetros mencionados poderá então variar em função do tipo de elemento construtivo em que é aplicada uma barreira. A título de exemplo, apresenta-se no Quadro 3.2 a importância relativa de algumas das propriedades das barreiras pára-vapor do tipo membrana, em termos qualitativos, segundo a ASTM C 755-85 [6].

Quadro 3.2 – Critérios de selecção de barreiras pára-vapor do tipo membrana [6]

Elemento Construtivo	Resistência ao punçoamento	Resistência à abrasão	Resistência ao corte	Não corrosiva	Resistência ao “apodrecimento”	Resistência à humidade	Notas
Paredes	Baixa	Baixa	Baixa				
Pavimentos térreos	Alta	Alta	Baixa		X	X	
Coberturas	Baixa	Alta	Média				
Câmaras frigoríficas	Alta	Alta	Alta	X	X	X	Sem retracção

X – significa recomendável

Refira-se que para alguns destes parâmetros a norma ASTM C 755-85 [6] define critérios mais objectivos, nomeadamente:

- Resistência ao punçoamento, medida em unidades Beach⁴:
 - Baixa = 15 Beach
 - Média = 25 Beach
 - Alta = 50 Beach
- Resistência à tracção, medida em⁵ lb/in:
 - Baixa = 15 lb/in (2,625 kN/m)

⁴ De acordo com a norma ASTM C 1136 [9], uma unidade Beach equivale a 0,305 cm·kg e é uma medida da energia necessária para rasgar o material ensaiado e curv-lo para fora do percurso do dardo pontiagudo utilizado para o efeito.

⁵ 1 lb/in = 0,175 kN/m.

- Média = 20 lb/in (3,5 kN/m)
- Alta = 35 lb/in (6,125 kN/m)

Outro aspecto importante na escolha de uma barreira pára-vapor corresponde aos pontos singulares, nomeadamente o seu número e facilidade de tratamento. Por exemplo, um componente com maiores dimensões e, portanto, menos juntas poderá conduzir a um melhor comportamento do sistema após aplicação do que um material com maior resistência à difusão de vapor de água mas com menores dimensões e, conseqüente, maior número de juntas. Refira-se que as barreiras do tipo membrana necessitam de materiais acessórios para a selagem das juntas, enquanto que as películas de revestimento garantem uma maior continuidade do componente.

4. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE AO VAPOR DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR

4.1 ESQUEMA DE ENSAIO

4.1.1 PRINCÍPIO DE DETERMINAÇÃO

O método experimental de determinação da permeabilidade ao vapor de água de materiais e elementos de construção tem apoio teórico na lei de Fick (ver § 2.2.2). Este método consiste em colocar o provete do material ou elemento que se pretende ensaiar entre dois ambientes à mesma temperatura mas com pressões parciais de vapor diferentes, devido às diferenças de humidade relativa, criando assim um gradiente de pressões entre as suas faces, o que origina um fluxo de vapor de água através do provete. Conhecendo a diferença de pressões parciais de vapor entre as ambiências separadas pelo provete e as suas dimensões e calculando o fluxo de difusão em regime estacionário, podem-se determinar as características de permeabilidade ao vapor de água do material ou elemento em estudo.

Em seguida descreve-se a metodologia seguida nos ensaios efectuados sobre alguns materiais que podem ser utilizados como barreiras pára-vapor, assim como os principais aspectos a ter em conta na sua realização, com base nas indicações de alguns documentos de carácter normativo, em particular a prEN ISO 12572 [53].

4.1.2 CONFIGURAÇÃO GERAL DOS ENSAIOS

Coloca-se o provete a ensaiar num recipiente (tina) estanque à difusão de vapor, passando o provete a constituir a parte superior do mesmo (Figura 4.1) e devendo a ligação entre ambos ser convenientemente selada ao longo do contorno. Dentro da tina de ensaio é previamente colocada uma substância condicionadora da humidade relativa do ar, de modo a que, mantendo a temperatura constante, a pressão parcial de vapor no interior da tina também se mantenha constante, mesmo que se verifiquem trocas de vapor de água com o ambiente exterior à tina.

A tina de ensaio é então colocada num compartimento climatizado (câmara de ensaio), mantido a temperatura constante, com uma humidade relativa também constante e diferente da registada no interior da tina, de modo a que se instale um fluxo de difusão de vapor de água através do provete (Figura 4.2). Esse fluxo é determinado através da pesagem periódica (ver § 4.4.1) das tinas de ensaio, até que a variação de massa por unidade de tempo seja linear – corrente estacionária de difusão.

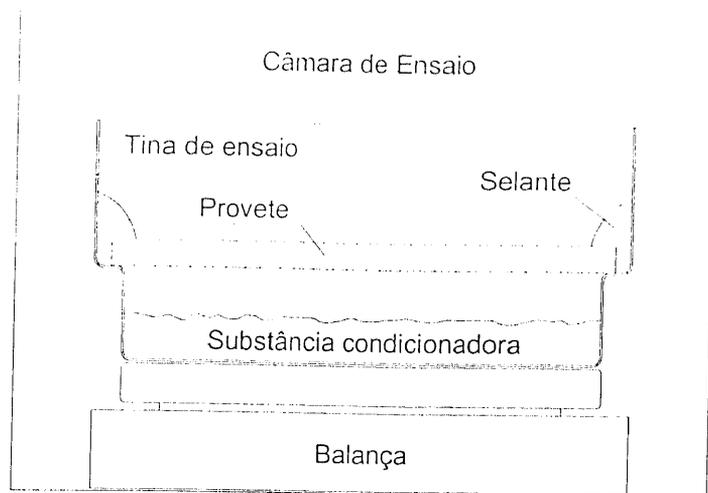
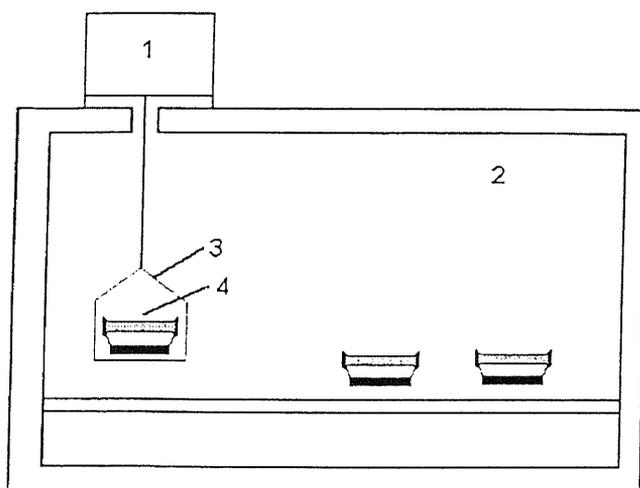


Figura 4.1 – Configuração das tinas de ensaio



LEGENDA:

- 1 - Balança
- 2 - Câmara de ensaio
- 3 - Plataforma suspensa para pesagem
- 4 - Tina de ensaio

Figura 4.2 – Esquema de ensaio [53]

4.1.3 CONDIÇÕES DE ENSAIO (TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA)

As condições ambientes (temperatura e humidade relativa) a manter durante os ensaios não são igualmente definidas nas diferentes normas. No entanto, é usual distinguirem-se dois métodos, de acordo com as diferenças de humidade relativa entre as faces do provete:

- Método da Tina Seca (MTS)

Humidade relativa do ar num dos lados do provete: $\approx 0\%$

Humidade relativa do ar no outro lado do provete: $\approx 50\%$

- Método da Tina Húmida (MTH)

Humidade relativa do ar num dos lados do provete: $\approx 100\%$

Humidade relativa do ar no outro lado do provete: $\approx 50\%$

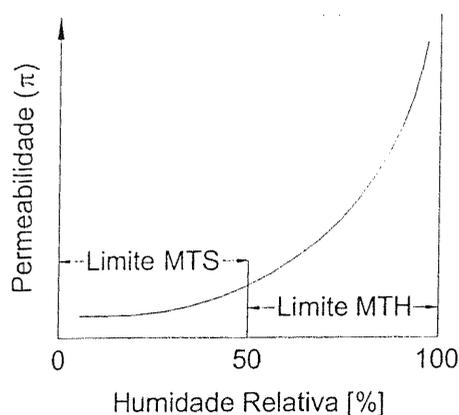


Figura 4.3 – Representação dos limites das condições de ensaio

O Método da Tina Seca permite caracterizar o comportamento dos materiais em ambientes com pouca humidade, em que a transferência de água é sobretudo devida a fenómenos de difusão de vapor. Para valores de humidade relativa mais elevados, como é o caso do Método da Tina Húmida, os poros começam a ficar preenchidos com água, como se explicou no § 2.1, aumentando o transporte na fase líquida e diminuindo o transporte na fase vapor. Em todos os ensaios realizados, as condições higrotérmicas das ambiências corresponderam ao Método da Tina Seca.

A prEN ISO 12572 [53] define quatro tipos de condições de ensaio, que se apresentam no Quadro 4.1, com uma tolerância de 0,5 °C para a temperatura e de 3% para a humidade relativa. Contudo, o documento refere a possibilidade de se utilizarem outras condições de ensaio em situações especiais. As variações de temperatura e humidade relativa admitidas conduzem a uma variação na diferença de pressão de vapor através do provete de $\pm 10\%$ relativamente ao valor pretendido.

Quadro 4.1 – Condições de ensaio definidas na prEN ISO 12572 [53]

Tipo	Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]	
		Lado 1	Lado 2
A	23 ± 0,5	0 a 3	50 ± 3
B	23 ± 0,5	0 a 3	85 ± 3
C	23 ± 0,5	50 ± 3	93 ± 3
D	38 ± 0,5	0 a 3	93 ± 3

4.2 DESCRIÇÃO DA CÂMARA DE ENSAIO UTILIZADA

4.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Atendendo às tolerâncias apresentadas anteriormente para as condições de temperatura e humidade durante os ensaios, podemos perceber a importância na escolha de um equipamento que garanta esta homogeneidade do ambiente num compartimento de ensaio adequado.

Nos ensaios realizados utilizou-se um equipamento de que dispõe o Laboratório de Física das Construções – LFC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP (Figura 4.4 e Figura 4.5), cuja primeira utilização foi precisamente a realização destes ensaios.

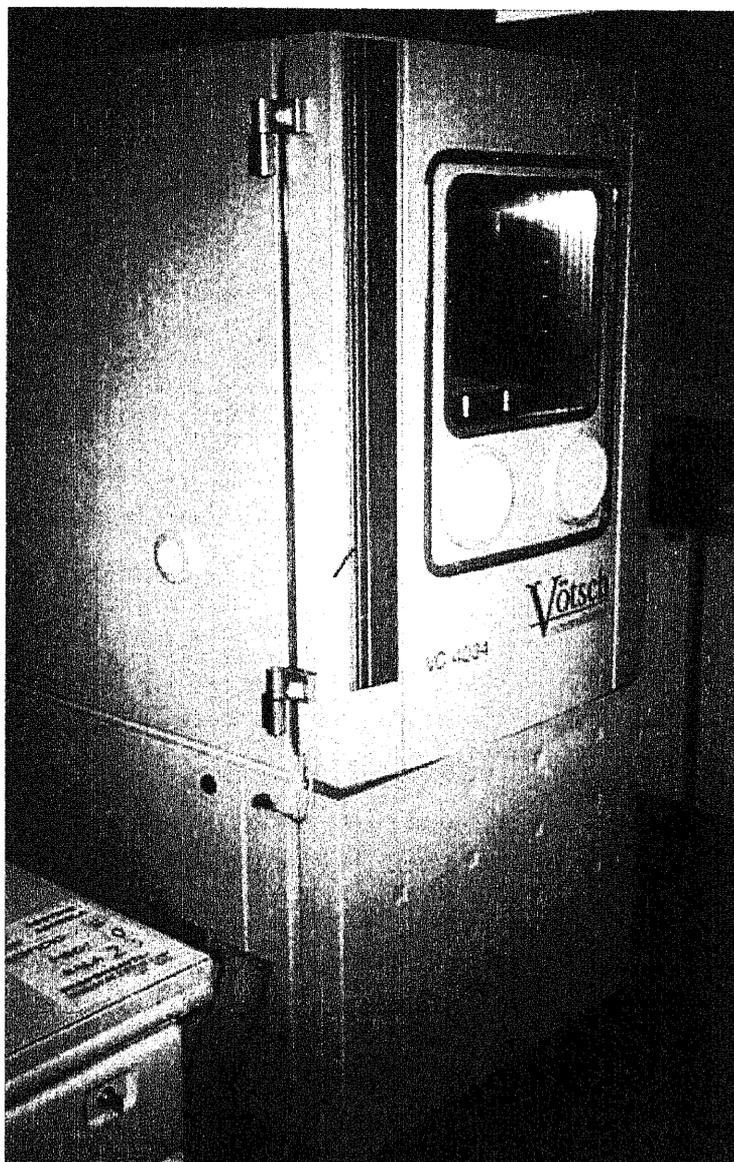


Figura 4.4 – Aspecto geral do exterior da câmara de ensaio do LFC

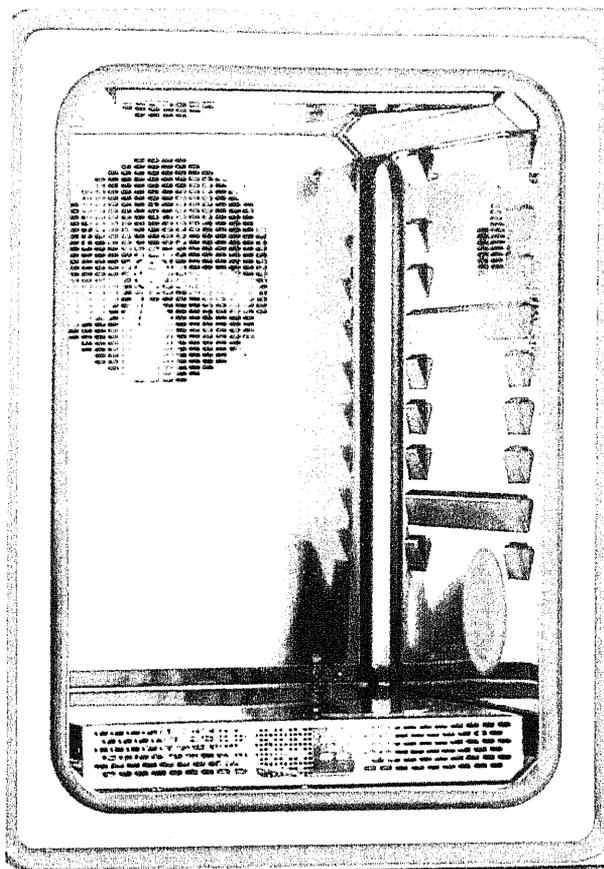


Figura 4.5 – Aspecto geral do compartimento interior da câmara de ensaio do LFC

O equipamento é da marca Vötsch, modelo VC 4034 e é essencialmente constituído por:

- Um compartimento de ensaio, com um volume útil de cerca de 340 l, totalmente revestido em aço inoxidável (Figura 4.5);
- Uma unidade de condicionamento do ar interior do compartimento de ensaio, renovado através de um ventilador de grandes dimensões, instalado na parte posterior do compartimento (Figura 4.5);
- Uma unidade de secagem do ar, que permite alargar o intervalo permitido para as condições de ensaio (temperatura e humidade relativa no interior da câmara). Esta unidade funciona com ar comprimido fornecido externamente, no presente caso por um pequeno compressor;
- Um painel do tipo “touch-panel” para o controlo e programação dos ensaios (Figura 4.6).

As paredes do equipamento são isoladas termicamente com poliuretano e o envidraçado que existe na porta de acesso ao compartimento de ensaio (Figura 4.4) é constituída por múltiplas camadas de vidro, por forma a evitar condensações.

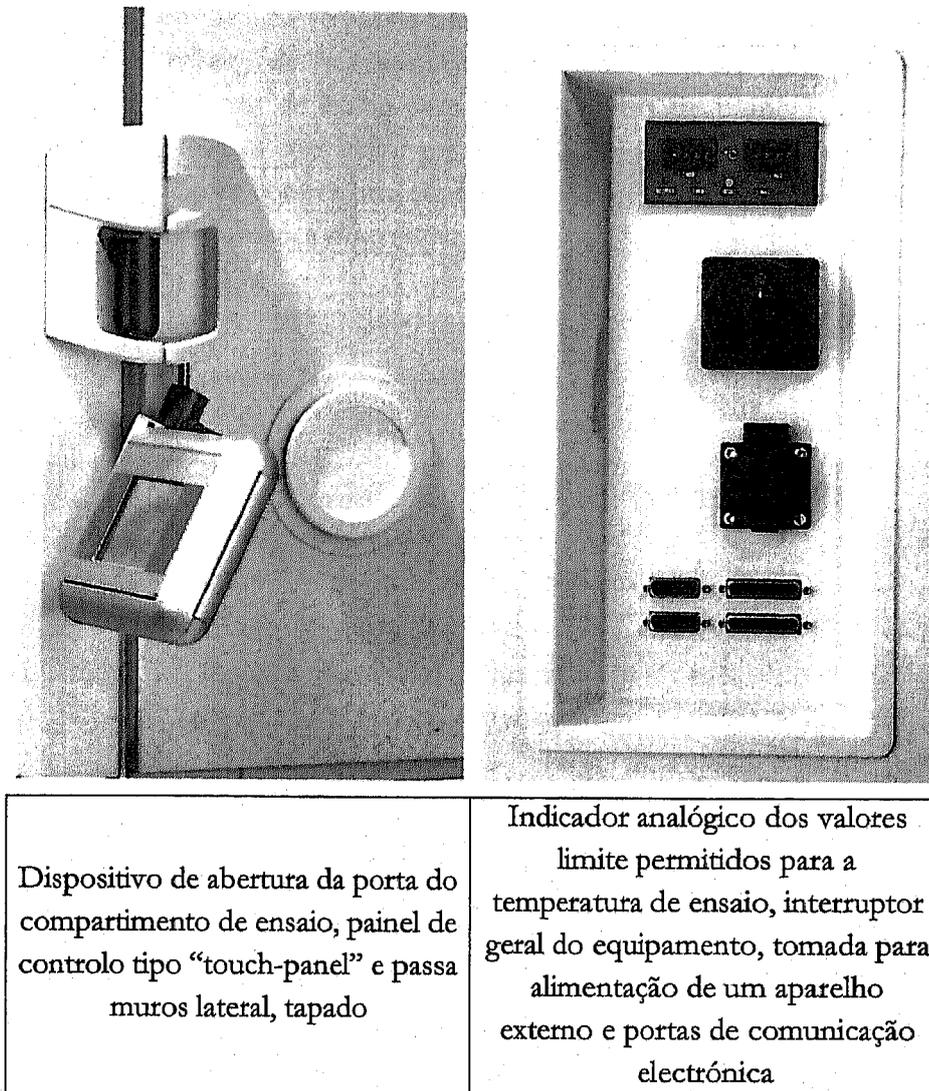


Figura 4.6 – Aspecto dos painéis exteriores da câmara de ensaio do LFC

4.2.2 CAPACIDADES DO EQUIPAMENTO

A câmara de ensaio do LFC tem capacidade para realizar ensaios nos seguintes intervalos de temperatura (T) e humidade relativa (HR), que estão dentro dos limites referidos anteriormente no § 4.1.3:

$$-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C} - \text{flutuação no tempo} < \pm 0,3\text{ °C}$$

$$10\% \leq HR \leq 98\% - \text{flutuação no tempo} < \pm 3\%$$

Para ensaios com controlo de ambos os parâmetros, a capacidade da câmara encontra-se representada pela condições correspondentes à área sombreada dos gráficos que se apresentam na

Figura 4.7, com excepção da zona 3. A capacidade para o funcionamento na zona 1 é assegurada pela unidade de secagem do ar.

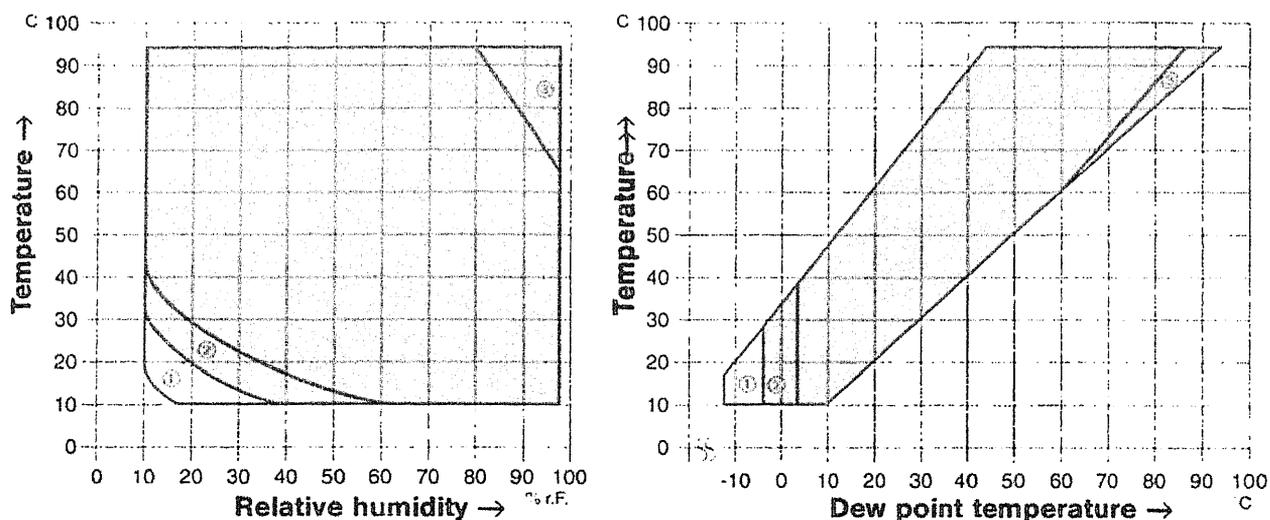


Figura 4.7 – Condições de temperatura e humidade relativa permitidas pelo equipamento do LFC

O equipamento permite que as condições de ensaio variem ao longo do tempo, tendo como imitação o seu tempo de resposta. Estas variações podem ser programadas, quer através do painel de controlo da câmara quer através de um computador que esteja ligado ao equipamento e disponha do software apropriado para o efeito.

Nas paredes laterais da câmara existem dois orifícios (um em cada parede – Figura 4.4 a Figura 4.6) que permitem, por exemplo, a passagem de cabos para a colocação de uma balança ou outro equipamento de medição no interior do compartimento de ensaio. Na porta de acesso a esse compartimento também existem dois orifícios (Figura 4.4) que permitem a aplicação de luvas para que os ensaios se possam levar a cabo sem a abertura da porta, o que poderia introduzir alterações ao processo.

Refira-se que no presente caso não foi possível disponibilizar uma balança apenas para a realização dos ensaios, face a sua longa duração, pelo que as pesagens foram efectuadas fora do compartimento de ensaio.

4.2.3 DISPOSITIVOS DE CONTROLO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO

Os valores da temperatura e humidade relativa deverão ser medidos e registados em contínuo através de sensores apropriados, cuja calibração seja efectuada regularmente.

A câmara do LFC dispõem de uma sonda de temperatura que pode ser colocada em qualquer ponto do compartimento de ensaio, de um sensor de humidade relativa fixo e de um dispositivo psicrométrico com termómetro de bolbo seco e termómetro de bolbo húmido, que permite a determinação da humidade relativa com maior precisão mas cujo funcionamento pode não ser o mais adequado quando se trabalham com valores elevados de humidade. Este dispositivo também é fixo e encontra-se na zona dianteira inferior do compartimento de ensaio (Figura 4.5 e Figura 4.8).

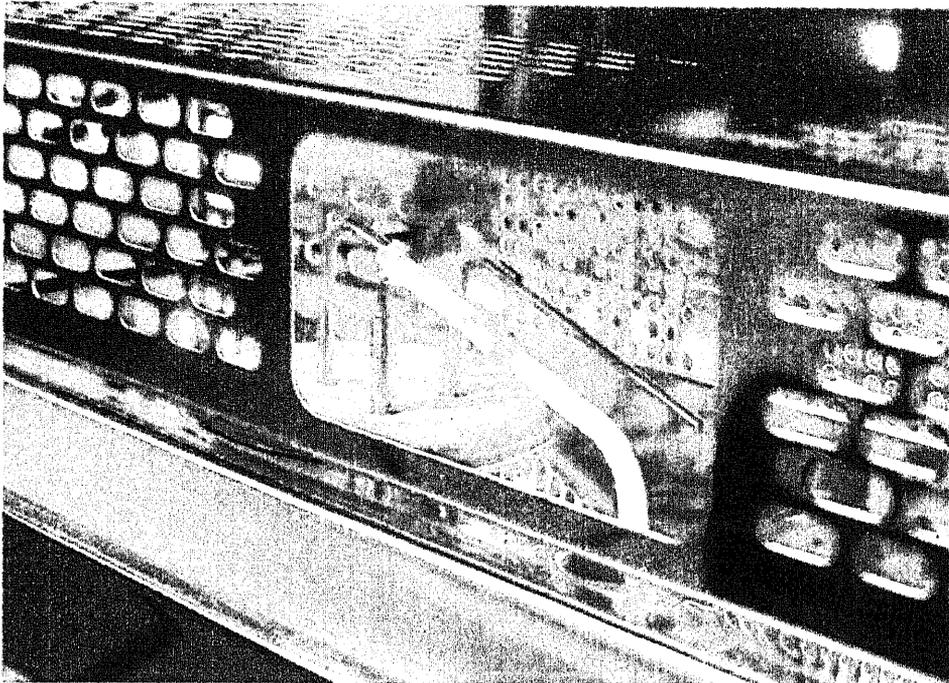


Figura 4.8 – Pormenor do sensor psicrométrico da câmara de ensaio do LFC

A questão da calibração dos sensores não se colocou neste caso, uma vez que o equipamento foi adquirido na altura de realização dos ensaios e tinha sido calibrado antes da entrega.

No que toca ao registo das condições de ensaio, o equipamento permite que o registo seja efectuado directamente para uma impressora, de forma contínua, ou para um computador externo, desde que disponha do software apropriado. No presente caso, devido aos problemas iniciais com a instalação do software, utilizou-se uma impressora para o registo das condições de temperatura e humidade relativa no interior da câmara, apresentando-se um exemplo de uma das folhas de registo na Figura 4.9.

Como se pode verificar, sempre que a porta do compartimento de ensaio foi aberta para proceder à pesagem dos provetes, como por exemplo no dia 20/10/2000 por volta das 18 horas, as variações das condições higrotérmicas do compartimento de ensaio foram mais significativas, em particular no caso da humidade relativa.

Temperature [°C] : setpoint --- actual value ___
 rel. humidity [%RH] : setpoint --- actual value ___

speed: 1.0 [mm/h]

page: 1

Manual mode

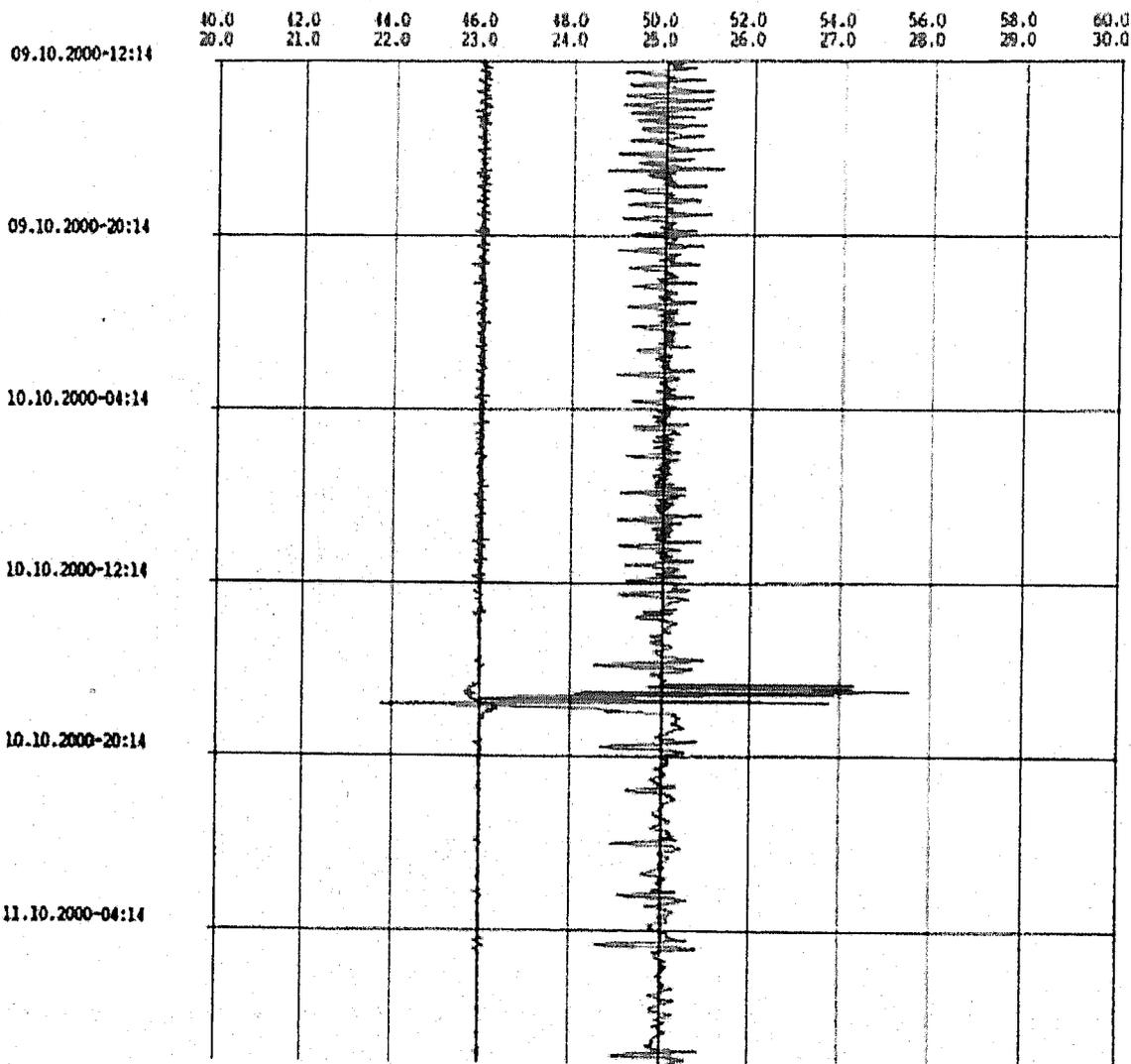


Figura 4.9 – Exemplo de uma folha de registo das condições de temperatura e humidade relativa no interior do compartimento de ensaio

Por forma a garantir condições uniformes do ambiente, a velocidade do ar no interior da câmara de ensaio deverá estar compreendida entre 0,02 e 0,3 m/s. Contudo, no caso de se ensaiarem provetes com elevada permeância, a velocidade do ar sobre os mesmos deverá ser de, pelo menos, 2 m/s, de modo a que seja desprezável a resistência à difusão da camada de ar em contacto com a superfície do provete. Nestas situações é também desejável que não existam obstáculos à circulação de ar junto à

superfície do provete, devendo-se optar por tinas de ensaio e processos de selagem que resultem na menor altura possível acima dessa superfície [53].

A ASTM E 96 [11] apresenta um critério ligeiramente diferente, em que a velocidade do ar em pés/minuto deverá ser numericamente igual a, pelo menos, 10 vezes a permeância do provete expressa em unidades [perm], sem exceder o valor máximo de 600 pés/min (3,05 m/s). Isto equivale a dizer que⁶ a velocidade expressa em m/s deverá ser numericamente igual à permeância do provete, em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, multiplicada por um factor não inferior a $8,9 \times 10^8$, sem exceder 3,05 m/s.

No equipamento do LFC é possível controlar a velocidade de funcionamento do ventilador que garante a renovação do ar no compartimento de ensaio mas não é possível registar a velocidade do ar no interior. Nos ensaios realizados, inicialmente não foi possível controlar adequadamente a velocidade do ventilador, pelo que se mantiveram as condições predefinidas pelo fabricante. Contudo, procedeu-se a medições da velocidade do ar com um anemómetro (Figura 4.10), em vários pontos do compartimento de ensaio, tendo-se obtido um valor médio de cerca de 0,9 m/s.

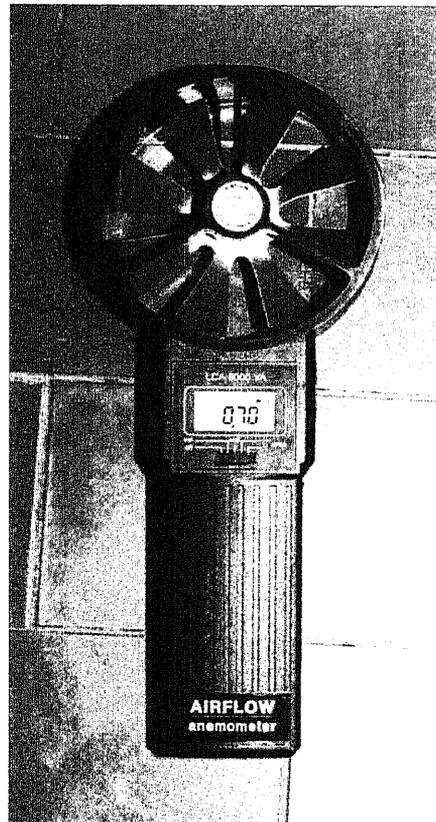


Figura 4.10 – Aspecto geral do anemómetro utilizado na medição da velocidade do ar no interior do compartimento de ensaio

⁶ $1 \text{ pé}/\text{min} = 0,3048 \text{ m}/\text{min}$ (ver [54]) = $0,00508 \text{ m}/\text{s}$

$1 \text{ perm} = 57,2 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ (ver [11])

4.3 PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

4.3.1 TINAS DE ENSAIO

4.3.1.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL

Tal como foi referido anteriormente, os provetes a ensaiar são montados sobre tinas estanques à difusão de vapor, onde previamente é colocada uma substância condicionadora da humidade relativa, sendo a ligação entre o provete e a tina convenientemente selada ao longo do contorno.

As tinas deverão ser constituídas por materiais, preferencialmente leves, que não sejam susceptíveis de sofrer degradação ou alterações face aos ambientes em que serão inseridos e aos produtos com que estarão em contacto, nomeadamente os provetes, as substâncias condicionadoras e os produtos de selagem. Normalmente utilizam-se tinas metálicas ou de vidro, tendo estas últimas a vantagem de permitirem um maior controlo da substância condicionadora, caso sejam transparentes.

A configuração das tinas deverá adaptar-se às diferentes condicionantes dos ensaios a realizar, nomeadamente as características dos provetes, o tipo e quantidade de substância condicionadora e o processo de selagem, normalmente mais fácil nas tinas circulares.

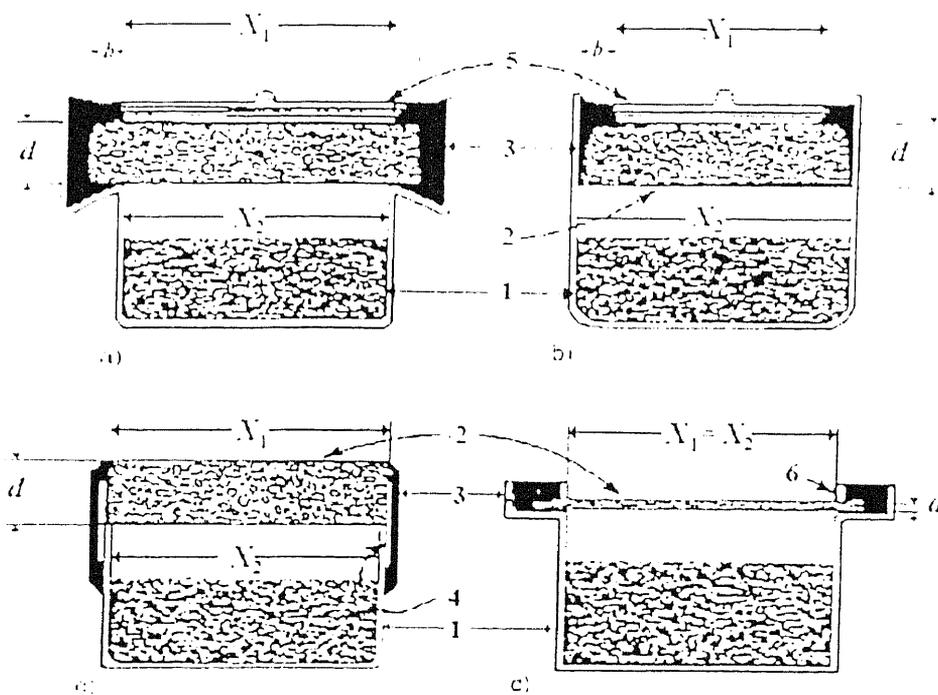
A forma da tina deverá ser tal que a área superior da substância condicionadora não seja inferior à área livre inferior do provete, sendo normalmente coincidentes. Contudo, no caso de se utilizarem substâncias condicionadoras líquidas, admite-se a utilização de uma rede para quebrar a ondulação gerada ao manusear as tinas e evitar que a substância atinja a face inferior do provete. De qualquer modo, a área livre da rede não deverá ser inferior a 90% da área livre inferior do provete [11].

Para alguns procedimentos de selagem utiliza-se um negativo (Figura 4.11 – a) e b)), de modo a obter uma área de ensaio bem definida. Tal como se referiu anteriormente, a área do negativo, que corresponde à área livre superior do provete, deverá ser, pelo menos, igual a 90% da sua área total, por forma a limitar as transmissões marginais de vapor (ver § 4.6.3).

Na Figura 4.11 encontram-se alguns exemplos de tinas de ensaio apresentados em [53] e na Figura 3.1 e Figura 3.2 encontram-se exemplos dos dois tipos de tinas utilizadas nos ensaios realizados.

Estas tinas são as que têm sido utilizadas no LFC para este tipo de ensaios e face às dificuldades em preparar novas tinas em número tão elevado como o pretendido, optou-se pela utilização das existentes.

Nos ensaios de provetes rígidos (Figura 3.2), o negativo de selagem foi conseguido através do recurso a uma tira de papel enrolada em torno do fundo de uma tina, tina essa que foi retirada após a secagem do produto de selagem.



LEGENDA:

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 - Substância condicionadora | 6 - Anel de contorno |
| 2 - Provete | X_1 - Área livre superior |
| 3 - Selante | X_2 - Área livre inferior |
| 4 - Fita adesiva impermeável | d - Espessura do provete |
| 5 - Negativo | b - Largura de selagem |

Figura 4.11 – Exemplos esquemáticos de tinas de ensaio [53]

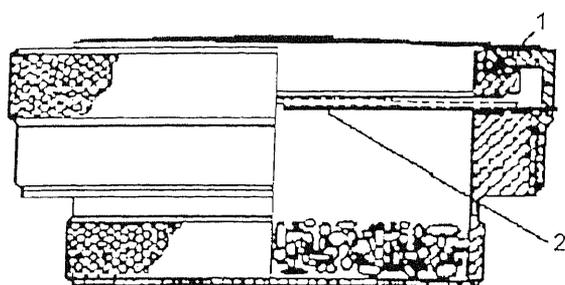
4.3.1.2 TINAS PARA ENSAIO DE MEMBRANAS

Para o ensaio de elementos delgados e flexíveis, do tipo membrana ou folha, a selagem dos provetes deverá ser efectuada mecanicamente, por aperto. A utilização de anéis de selagem constituídos por materiais adequados pode melhorar a selagem, como se exemplifica na Figura 4.12.

Nos ensaios realizados utilizaram-se tinas que permitem o aperto mecânico dos provetes, conforme se mostra na Figura 3.1.

Para este tipo de componentes não é usual proceder à determinação do coeficiente de permeabilidade ao vapor (π) do material mas sim da permeância (P_v) ou da resistência à difusão de vapor ($R_d = 1/P_v$) do elemento, uma vez que não apresentam um comportamento homogéneo em

função da espessura e são ensaiados tal como são utilizados. Por esta razão, a espessura dos provetes é apresentada mais a título indicativo, para identificação dos elementos testados, sendo também possível indicar a massa superficial do material.



LEGENDA:

1 - Anel de selagem

2 - Provete

Figura 4.12 – Exemplo esquemático de uma tina de ensaio para membranas e folhas [53]

4.3.2 ENSAIO DE PELÍCULAS DE REVESTIMENTO

As películas de revestimento são materiais normalmente aplicados líquidos, a pincel trincha rolo ou por spray, formando um filme de pequena espessura após secagem, como por exemplo as tintas, os vernizes, etc..

Face às dificuldades em obter provetes destes materiais para ensaio, estes deverão ser aplicados sobre um material de suporte compatível, de forma idêntica à que é seguida na utilização normal do revestimento.

O material de suporte pode ser rígido ou então uma membrana permeável, devendo a sua resistência à difusão de vapor ser previamente determinada, de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.

Nos ensaios realizados sobre películas de revestimento utilizou-se o betão celular como material de suporte.

As características de permeabilidade da película de revestimento são obtidas subtraindo a resistência à difusão de vapor do material de suporte à resistência total dos provetes ensaiados com revestimento.

Devido às dificuldades em determinar a espessura das películas de revestimentos, não é usual proceder à determinação do coeficiente de permeabilidade ao vapor (π) do material mas sim da permeância (P_d) ou da resistência à difusão de vapor ($R_d = 1/P_d$) do elemento, tal como se referiu para os materiais do tipo membrana. Devem no entanto ser especificados os dados sobre a aplicação dos revestimentos, como o número de camadas aplicadas, a massa superficial após secagem, etc.

4.3.3 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

4.3.3.1 CUIDADOS GERAIS

Os provetes devem ser representativos dos materiais em estudo e do fim a que se destinam, pelo que as suas características, físicas, geométricas, etc., deverão ser o mais próximas possível das que o material apresenta nas suas diferentes utilizações.

Se o produto a testar for anisotrópico, os respectivos provetes devem ser obtidos de modo a que as faces paralelas sejam normais à direcção do fluxo de vapor através do produto em utilização. Se não se conhecer a direcção do fluxo, devem-se efectuar ensaios para cada uma das direcções de fluxo possíveis.

Na preparação dos provetes deve ter-se o cuidado de não provocar alterações nas suas superfícies que possam afectar o fluxo de vapor de água, como por exemplo na obtenção dos provetes por corte, que pode originar a criação de uma película superficial que diminui a sua permeabilidade.

Caso se pretenda determinar a permeabilidade ao vapor de água de um material com o acabamento previsto, deverão efectuar-se em primeiro lugar medições em provetes de cada um dos componentes, seguidas de novas medições sobre provetes do conjunto (acabamento e respectivo suporte).

Antes dos ensaios, os provetes deverão ser colocados num ambiente controlado, com uma temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 5)\%$ de humidade relativa, durante um período suficiente para que o seu peso estabilize de modo a que em três pesagens diárias consecutivas os valores não apresentem diferenças superiores a 5% [53].

Como facilmente se deduzirá, existem materiais que não necessitam deste condicionamento antes dos ensaios, como é o caso dos filmes plásticos ou das folhas de alumínio, pois não têm capacidade para fixar humidade.

4.3.3.2 DIMENSÕES DOS PROVETES

4.3.3.2.1 Área

A área dos provetes deverá ser definida de acordo com os respectivos procedimentos de ensaio, nomeadamente o tipo de tina e método de selagem, de modo a que o seu diâmetro ou lado (caso se trate de um provete rectangular) corresponda a, pelo menos, o dobro⁷ da espessura do provete e

⁷ Em [85] o valor referido para materiais de isolamento térmico é o quádruplo da espessura e não o dobro.

não seja inferior a⁸ 50 cm² [53]. Refira-se que a ASTM E 96 [11] impõe um limite mais baixo para a área útil de ensaio, cujo valor é de 30 cm².

A área útil de ensaio corresponde à média aritmética entre as áreas livres superior e inferior do provete (áreas sem selagem), que não devem diferir mais do que 3% relativamente à média, no caso de materiais homogêneos, ou 10% para outros materiais [53].

Para o ensaio de provetes com alguma espessura, a área útil de ensaio deverá corresponder a, pelo menos, 90% da área total do provete, por forma a limitar as transmissões marginais de vapor (ver § 4.6.3).

Quanto maior for a área de ensaio menores serão os erros na determinação da permeabilidade ao vapor do material. Contudo, as tinas disponíveis e a precisão dos instrumentos de pesagem (ver § 4.4.1) são factores que normalmente condicionam a sua definição.

Uma das deficiências das tinas utilizadas nos ensaios foi precisamente a reduzida dimensão da superfície de ensaio, que foi inferior a 50 cm². Para os provetes de betão celular (com ou sem revestimento) a área útil de ensaio foi de cerca de 47,4 cm² e para as membranas e folhas foi de 40,6 cm². Nos ensaios de provetes rígidos, o diâmetro útil da tina foi de 76,2 mm, enquanto que o diâmetro do negativo foi de 79,2 mm, o que corresponde a diferenças da ordem dos 4% entre as áreas livres superior e inferior relativamente à média. Nos ensaios de membranas e folhas a área da boca da tina e a área do negativo eram coincidentes, com um diâmetro de 71,9 mm.

4.3.3.2.2 Espessura

A espessura dos provetes deve, na medida do possível, ser igual à espessura que se pretende para o material aquando da sua utilização, como acontece com componentes do tipo membrana, folha ou películas de revestimento. De qualquer modo, a espessura deverá permitir representar de forma adequada a influência de eventuais heterogeneidades do material.

Para testar materiais de isolamento devem utilizar-se provetes com uma espessura não inferior a 20 mm, enquanto que para os materiais a granel a espessura mínima deverá ser de 100 mm, face às dificuldades que existem na sua determinação. No caso de materiais rígidos não homogêneos, como

⁸ Nesta versão da pré-norma o valor referido é de 0,05 m² (500 cm²). Contudo, a generalidade dos restantes documentos (ver, por exemplo, [83], [84] e [85]) e inclusivamente uma versão mais antiga desta pré-norma, referem valores iguais ou próximos de 50 cm², pelo que se admite que tenha havido um erro de impressão. No próprio texto é exigido que o número de provetes não seja inferior a 5 se a superfície de ensaio for inferior a 0,05 m², o que seria redundante caso a área mínima de ensaio também tivesse o mesmo limite.

por exemplo o betão normal, a espessura dos provetes deverá corresponder a, pelo menos, 3 vezes (de preferência 5 vezes) o tamanho da maior partícula⁹ que entre na sua composição [53].

Se um material tiver vazios macroscópicos, a parte sólida deverá ser testada e a resistência do material no seu conjunto calculada a partir das proporções entre a parte sólida e os espaços de ar, admitindo fluxo unidireccional [53].

No caso de materiais homogéneos, a ASTM E 96 [11] refere que só é possível determinar as características de permeabilidade ao vapor do material (π e μ) se a espessura dos provetes for, pelo menos, igual a 12,5 mm.

Para além das espessuras mínimas dos provetes, é também necessário evitar espessuras elevadas, por forma a minimizar as transmissões marginais, como se explica mais à frente no § 4.6.3. No caso de materiais homogéneos, normalmente não são aconselháveis espessuras superiores a 100 mm.

4.3.3.2.3 Precisão na Determinação das Dimensões

A medição das áreas livres do provete (que estão em contacto com cada um dos ambientes de ensaio) deverá ser efectuada com uma precisão de $\pm 0,5$ mm [53], cuja influência na precisão da área de ensaio será tanto maior quanto menor for essa área. Por exemplo, para uma área de ensaio circular ou quadrada de 500 cm², o erro será inferior a $\pm 0,5\%$.

Na determinação da espessura dos provetes, a precisão deverá corresponder ao mais exigente dos seguintes valores: $\pm 0,1$ mm ou $\pm 0,5\%$ [53]. A espessura deverá corresponder à média de quatro valores medidos no ponto intermédio de cada um dos quatro quadrantes do provete. No ensaio de materiais compressíveis, a granel ou de superfície irregular devem descrever-se detalhadamente os procedimentos para determinação da espessura de ensaio.

Quando se pretende determinar a permeância de elementos não homogéneos ou de muito baixa espessura, que são ensaiados com a espessura de utilização, como é por exemplo o caso das membranas e películas de revestimento ensaiadas, a precisão na determinação da espessura não é um factor relevante, o que já não acontece quando se determina o coeficiente de permeabilidade ao vapor (π) de um material homogéneo.

⁹ Em [85] refere-se que a espessura deverá corresponder, pelo menos, ao dobro da dimensão máxima do vazio ou do grão.

Nos ensaios realizados, as dimensões dos provetes foram determinadas com um paquímetro digital, cuja precisão de leitura é de 0,01 mm. A determinação da espessura dos provetes apenas foi importante nos provetes de betão celular.

4.3.3.3 NÚMERO DE PROVETES

Para o ensaio de permeabilidade ao vapor de um material ou elemento de construção são necessários, em geral, 5 provetes. Contudo, no caso de materiais suficientemente homogêneos e cuja área de ensaio não seja inferior a 500 cm² poderão utilizar-se apenas 3 provetes [53].

Quando se testam provetes cuja permeância seja inferior a $2,86 \times 10^{-12}$ kg/(m²·s·Pa) (= 0,05 perms), ou provetes de baixa permeância que possam sofrer variações de peso ao longo dos ensaios (por exemplo, devido a fenómenos de evaporação ou oxidação), é recomendável utilizar um provete de referência, que seja preparado e testado exactamente como os restantes, mas em que não seja utilizada nenhuma substância condicionadora no interior da tina de ensaio [11]. A variação de peso que este provete de referência sofrer ao longo do ensaio deverá ser subtraída à variação de peso dos restantes provetes testados.

No presente caso, por limitações de espaço interior na câmara de ensaio, apenas se testaram 3 provetes de cada material, apesar de as áreas de ensaio não serem superiores a 500 cm². Pela mesma razão, também não se utilizaram provetes de referência.

4.3.3.4 CARACTERÍSTICAS DOS PROVETES ENSAIADOS

No Quadro 4.2, no Quadro 4.3 e no Quadro 4.4 encontram-se as características dos provetes ensaiados, recordando-se que a área útil de ensaio foi de cerca de 47,4 cm² para os provetes de betão celular e de 40,6 cm² para as membranas e folhas. Para facilitar a nomenclatura, os provetes de betão celular sem revestimento terão a designação de provetes de betão celular, enquanto que os provetes de betão celular revestidos com pinturas ou emulsões betuminosas serão designados através do material de revestimento. Para as folhas e membranas utilizar-se-á a designação correspondente ao material ou materiais principais que as compõem.

Como se pode verificar no Quadro 4.2, a superfície dos provetes de betão celular é relativamente elevada, pelo que a área útil de ensaio correspondeu a cerca de 53% da área dos provetes, não respeitando os 90% recomendáveis, referidos anteriormente no § 4.3.3.2.1. Isto deve-se ao facto de os provetes, de forma circular, se terem obtido a partir de blocos de grandes dimensões, por corte com uma broca de coroa com 10 cm de diâmetro interior, que foi a única disponível. Para evitar a danificação dos provetes ao tentar reduzir a sua área, optou-se por não o fazer.

No Quadro 4.3 indicam-se as pesagens efectuadas nos provetes com as películas de revestimento ensaiadas. A massa superficial do revestimento obteve-se dividindo a diferença entre o peso do provete com e sem revestimento pela respectiva área. O número de camadas de produto aplicadas encontra-se indicado na própria designação do provete (x 2 ou x 4), com excepção da emulsão betuminosa tipo 1 (Emulsão_1), em que foi aplicada apenas uma camada, pois apesar das tentativas não foi possível obter aderência de uma segunda camada de produto sobre a primeira.

Quadro 4.2 – Dimensões dos provetes de betão celular utilizados nos ensaios

Provete		Espessura [mm]					Diâmetro [mm]			Área [cm ²]
		a	b	c	d	Média	a	b	Média	
Betão Celular	4	12,63	12,55	12,57	12,5	12,563	93,75	93,62	93,685	68,93
	5	12,6	12,67	12,8	12,78	12,713	92,28	92,7	92,490	67,19
	8	14,96	14,8	14,79	14,99	14,885	93,86	93,95	93,905	69,26
Pintura_1 (x 2)	1	12,66	11,89	11,33	11,94	11,955	93,99	93,92	93,955	69,33
	2	13,92	14,06	14,02	14,17	14,043	93,65	93,78	93,715	68,98
	3	12,49	12,59	12,71	12,61	12,600	94,03	93,8	93,915	69,27
Pintura_1 (x 4)	26	13,16	12,94	12,7	12,92	12,930	93,82	93,67	93,745	69,02
	27	13,71	13,43	13,03	13,34	13,378	93,77	93,77	93,770	69,06
Emulsão_1	6	12,52	12,56	12,54	12,46	12,520	93,88	93,94	93,910	69,26
	9	13,55	13,24	13,09	13,31	13,298	93,71	93,77	93,740	69,01
	24	13,02	13,22	13,09	12,89	13,055	93,87	93,82	93,845	69,17
Emulsão_2 (x 2)	11	13,13	12,66	12,47	12,91	12,793	93,9	93,8	93,850	69,18
	12	12,51	12,95	12,94	12,61	12,753	93,93	93,77	93,850	69,18
	13	12,39	12,53	12,62	12,51	12,513	93,73	93,79	93,760	69,04
Emulsão_2 (x 4)	14	13,07	12,96	13,11	13,08	13,055	93,84	93,79	93,815	69,12
	15	12,95	13,09	13,2	13,07	13,078	93,84	93,73	93,785	69,08
	16	12,95	12,58	12,83	13,27	12,908	93,76	93,71	93,735	69,01
Pintura_2 (x 2)	20	12,75	12,96	12,98	12,84	12,883	93,66	93,61	93,635	68,86
	21	13,47	12,96	12,62	13,16	13,053	93,86	93,97	93,915	69,27
	22	12,82	12,1	11,55	12,32	12,198	93,89	93,79	93,840	69,16
Pintura_2 (x 4)	17	12,88	12,78	12,5	12,57	12,683	93,82	93,95	93,885	69,23
	18	12,63	11,83	11,04	11,89	11,848	93,92	93,96	93,940	69,31
	19	12,89	12,85	12,92	12,97	12,908	93,92	93,79	93,855	69,18

Quadro 4.3 – Peso dos provetes de películas de revestimento utilizados nos ensaios

Provete		Área	Pesagens		
		[cm ²]	Provetes sem revestimento [g]	Provetes com revestimento [g]	Revestimento [kg/m ²]
Pintura_1 (x 2)	1	69,33	40,952	42,641	0,2436
	2	68,98	48,37	49,94	0,2276
	3	69,27	43,522	44,965	0,2083
Pintura_1 (x 4)	26	69,02	44,582	47,116	0,3671
	27	69,06	46,31	48,611	0,3332
Emulsão_1	6	69,26	43,193	45,818	0,3790
	9	69,01	45,768	47,453	0,2442
	24	69,17	44,919	46,708	0,2586
Emulsão_2 (x 2)	11	69,18	44,46	45,788	0,1920
	12	69,18	43,797	45,19	0,2014
	13	69,04	43,093	44,433	0,1941
Emulsão_2 (x 4)	14	69,12	44,746	46,829	0,3013
	15	69,08	44,909	46,893	0,2872
	16	69,01	44,061	45,907	0,2675
Pintura_2 (x 2)	20	68,86	44,191	45,459	0,1841
	21	69,27	45,333	46,785	0,2096
	22	69,16	42,521	43,925	0,2030
Pintura_2 (x 4)	17	69,23	43,851	45,577	0,2493
	18	69,31	40,992	42,622	0,2352
	19	69,18	44,453	46,238	0,2580

Quadro 4.4 – Características das membranas e folhas ensaiadas

Provete		Espessura [mm]	Diâmetro [mm]			Área [cm ²]	Pesagens	
			a	b	Média		Peso [g]	Massa Superficial [kg/m ²]
Folha de Polietileno	30	0,23	107,21	108,2	107,705	91,11	2,048	0,2248
	31	0,24	107,52	106,7	107,110	90,11	2,126	0,2359
	32	0,23	108,46	108,06	108,260	92,05	2,103	0,2285
Papel kraft com asfalto	33	0,1	108,72	108,51	108,615	92,66	0,768	0,0829
	34	0,1	107,5	107,64	107,570	90,88	0,76	0,0836
	35	0,1	107,99	108,2	108,095	91,77	0,767	0,0836
Papel kraft com alumínio	36	0,1	107,89	108,15	108,020	91,64	0,88	0,0960
	37	0,1	108,14	108,11	108,125	91,82	0,879	0,0957
	38	0,1	108,03	107,98	108,005	91,62	0,874	0,0954
Folha de Alumínio	39	0,12	108,23	107,81	108,020	91,64	0,654	0,0714
	40	0,12	107,92	107,33	107,625	90,97	0,633	0,0696
	41	0,12	107,46	107,44	107,450	90,68	0,624	0,0688
Tela (2,7mm)	42	2,62	107,71	107,49	107,600	90,93	30,902	3,3984
	43	2,68	107,03	106,95	106,990	89,90	31,378	3,4902
	44	2,54	105,83	106,92	106,375	88,87	29,135	3,2783
Tela (3,1mm)	45	2,9	106,49	106,17	106,330	88,80	34,08	3,8379
	46	2,85	106,58	106,46	106,520	89,12	33,717	3,7835
	47	2,88	106,7	106,99	106,845	89,66	34,458	3,8432
Tela com alumínio	48	2,42	107,54	108,11	107,825	91,31	22,233	2,4348
	49	2,31	106,55	107,55	107,050	90,00	22,299	2,4775
	50	2,29	107,6	107,42	107,510	90,78	21,981	2,4214

4.3.4 ESCOLHA E APLICAÇÃO DA SUBSTÂNCIA CONDICIONADORA

No interior das tinas de ensaio a temperatura é a mesma que no exterior, uma vez que esta é colocada no interior de um compartimento de ensaio a temperatura constante. Por sua vez, a humidade relativa no interior da tina é controlada pela substância condicionadora, para a qual se indicam alguns exemplos no Quadro 4.5, bem como os respectivos valores da humidade relativa para uma temperatura de 20 a 23 °C.

Quadro 4.5 – Valores da humidade relativa de substâncias condicionadoras

Substância Condicionadora	Temperatura [°C]	Humidade relativa [HR]	Referência
CaCl ₂ (tamanho das partículas < 3 mm ¹⁰)	23	0	[53], [85]
Mg(ClO ₄) ₂	23	0	[53]
P ₂ O ₅	23	0	[85]
Sílica-Gel	23	0 a 3	[85]
LiCl × H ₂ O	20	12	[50]
COOK	20	22	[50]
Na ₂ Cr ₂ O ₇ ·2(H ₂ O)	23	52	[85]
Mg(NO ₃) ₂	23	53	[53]
NaSO ₂	20	65	[50]
ClNa	20	76	[50]
KCl	23	85	[53]
NH ₄ H ₂ PO ₄	23	93	[53], [85]
KNO ₃	23	94	[53]
H ₂ O	20	100	[50]

As tinas devem ser agitadas regularmente de modo a garantir a homogeneidade da substância condicionadora, o que se torna bastante mais fácil se forem utilizadas tinas transparentes. Quando se utilizam soluções saturadas, como é por exemplo o caso do Nitrato de Magnésio (Mg(NO₃)₂) ou do Cloreto de Potássio (KCl), deve garantir-se que estas se mantêm como uma mistura homogénea de líquido com porções significativas de material não dissolvido.

A substância condicionadora deverá ser colocada com uma altura de, pelo menos, 15 mm acima do fundo da tina e de modo a deixar um espaço de ar com uma espessura de (15 ± 5) mm, entre a substância e a face inferior do provete [53]. Este espaço de ar permite a renovação das camadas da substância condicionadora, por agitação após cada pesagem, e evita a molhagem do provete quando se utilizam substâncias líquidas. Como se referiu anteriormente no § 4.3.1.1, no caso de se utilizarem substâncias condicionadoras líquidas, é possível utilizar uma rede para quebrar a ondulação gerada ao manusear as tinas e evitar que a substância atinja a face inferior do provete.

¹⁰ A ASTM E 96 [11] refere que o material deverá ser constituído por partículas que passem no peneiro n.º 8 (malha de 2,36 mm) e isento de finos que passem no peneiro n.º 30 (malha de 600 µm).

Na selecção da substância a utilizar deve garantir-se que não provocará qualquer tipo de reacção com os provetes, tinas de ensaio ou materiais de selagem. Além disso, a quantidade utilizada deverá ser suficiente para que o valor da humidade relativa se mantenha constante ao longo de todo o período de ensaio, o que se torna mais problemático na utilização de dissecantes em ensaios de materiais com permeabilidade elevada.

A prEN ISO 12572 [53] impõe que nos ensaios em que se utilizem dissecantes (como no método da tina seca), estes não devem adsorver humidade em quantidades superiores a 1,5 g por cada 25 ml de substância, ao longo do período de ensaio. Quando se utilizam soluções líquidas (como é o caso do método da tina húmida), a perda de massa deverá ser inferior a metade da quantidade inicial colocada na tina.

Por seu lado, a norma ASTM E 96 [11] refere que o cloreto de cálcio (CaCl_2) não deverá adsorver água em quantidades superiores a 10% do seu peso após secagem a 200 °C, enquanto que no caso da sílica-gel esse limite é de apenas 4%, para a mesma temperatura de activação (200 °C). Este critério parece mais razoável, uma vez que diferentes substâncias terão diferentes capacidades de absorção de humidade.

Nos ensaios realizados utilizou-se sílica-gel como dissecante, deixando um espaço de ar com cerca de 12 mm entre o topo da substância e a face inferior dos provetes. A altura das tinas entre o fundo da concha e a base dos provetes é de 46,6 mm, no caso das tinas para provetes rígidos, e 39,2 mm nas tinas para membranas e folhas. Assim, de acordo com o critério da prEN ISO 12572 [53], a máxima variação de peso da substância condicionadora durante os ensaios deveria ser de cerca de 9,5 g, no caso das tinas para ensaio de provetes rígidos (cujo diâmetro é igual a 76,2 mm), e de cerca de 6,6 g, no caso das tinas para ensaio de membranas e folhas (cujo diâmetro é igual a 71,9 mm).

No que toca ao critério referido pela ASTM E 96 [11], apresenta-se no Quadro 4.6, para cada um dos provetes, o valor da máxima variação de peso admitida (coluna da direita – Max. Var.).

Quadro 4.6 – Peso da sílica-gel utilizada nos ensaios e respectiva variação máxima admitida, de acordo com os critérios da ASTM E 96 [11]

Provete		Pesagens [g]			
		Tinas	Tinas com sílica-gel	Sílica-gel	Max. Var.
Betão Celular	4	111,629	240,002	128,373	5,135
	5	112,973	248,028	135,055	5,402
	8	109,856	242,722	132,866	5,315
Pintura 1 (x 2)	1	112,959	243,498	130,539	5,222
	2	112,648	244,688	132,04	5,282
	3	111,85	250,208	138,358	5,534
Pintura 1 (x 4)	26	129,835	262,955	133,12	5,325
	27	113,218	248,829	135,611	5,424

Quadro 4.6 (continuação) – Peso da sílica-gel utilizada nos ensaios e respectiva variação máxima admitida, de acordo com os critérios da ASTM E 96 [11]

Provete		Pesagens [g]			
		Tinas	Tinas com sílica-gel	Sílica-gel	Max. Var.
Emulsão_1	6	111,888	245,384	133,496	5,340
	9	133,952	266,072	132,12	5,285
	24	112,149	237,842	125,693	5,028
Emulsão_2 (x 2)	11	111,057	246,013	134,956	5,398
	12	134,065	264,252	130,187	5,207
	13	111,608	244,596	132,988	5,320
Emulsão_2 (x 4)	14	113,23	238,419	125,189	5,008
	15	111,554	239,818	128,264	5,131
	16	111,406	239,828	128,422	5,137
Pintura_2 (x 2)	20	112,92	244,188	131,268	5,251
	21	111,73	243,475	131,745	5,270
	22	136,69	263,913	127,223	5,089
Pintura_2 (x 4)	17	110,489	238,662	128,173	5,127
	18	112,663	242,778	130,115	5,205
	19	124,009	254,185	130,176	5,207
Folha de Polietileno	30	225,781	322,069	96,288	3,852
	31	95,504	183,119	87,615	3,505
	32	95,656	187,508	91,852	3,674
Papel kraft com asfalto	33	95,419	181,137	85,718	3,429
	34	95,858	189,028	93,17	3,727
	35	98,56	191,665	93,105	3,724
Papel kraft com alumínio	36	94,79	184,607	89,817	3,593
	37	95,53	186,972	91,442	3,658
	38	94,144	182,455	88,311	3,532
Folha de Alumínio	39	97,406	188,689	91,283	3,651
	40	97,286	188,438	91,152	3,646
	41	96,961	185,339	88,378	3,535
Tela (2,7mm)	42	96,314	187,08	90,766	3,631
	43	96,633	184,673	88,04	3,522
	44	96,96	185,000	88,04	3,522
Tela (3,1mm)	45	80,684	174,909	94,225	3,769
	46	94,899	186,395	91,496	3,660
	47	96,557	185,553	88,996	3,560
Tela com alumínio	48	97,251	187,652	90,401	3,616
	49	95,255	186,119	90,864	3,635
	50	98,763	187,659	88,896	3,556

4.3.5 SELAGEM DAS TINAS

Os selantes deverão ser impermeáveis à água, tanto na fase vapor como na fase líquida, e compatíveis com os elementos com que estarão em contacto, nomeadamente os provetes e as tinas. Deverão também ser fáceis de manusear, permanecer flexíveis, ter uma boa aderência aos materiais com que estarão em contacto e não sofrer alterações durante os ensaios, como por exemplo fissuração. Não devem afectar a pressão de vapor nas ambiências adjacentes aos provetes e não devem sofrer variações de massa ao longo dos ensaios susceptíveis de afectar os respectivos resultados em mais de 2% [53].

Os selantes fluídos podem penetrar nos materiais porosos o suficiente para introduzir erros na determinação área útil de ensaio. Nestes casos é conveniente proceder previamente à aplicação de um material do tipo fita adesiva ou resinas epoxy, ao longo do perímetro de selagem [53]. Nos ensaios em que se utilizaram provetes de betão celular deveria ter-se efectuado esta pré-selagem. Contudo, a configuração das tinas de ensaio tornava difícil o posterior acerto da área livre com a boca da tina, pelo que se optou por não a efectuar.

É necessário muito cuidado na utilização de selantes a elevadas temperaturas, como é o caso das ceras, devendo assegurar-se que os materiais com que estarão em contacto não serão afectados pela temperatura de aplicação do selante.

Para o ensaio de provetes cuja permeância seja inferior a $228,8 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ (=4 perm) deve utilizar-se asfalto derretido ou cera como selante [11]. Dois exemplos de selantes à base de cera que podem ser utilizados na generalidade dos ensaios são [53]:

- Uma mistura de 90% de cera microcristalina e 10% de um plastificante, por exemplo “poli-isobutileno” de baixo peso molecular;
- Uma mistura de 60% de cera microcristalina com 40% de cera de parafina cristalina refinada. Este foi o tipo de selante que se utilizou nos ensaios realizados.

Refira-se que é também possível testar o comportamento dos materiais de selagem. Para tal é necessário realizar ensaios de permeabilidade ao vapor com provetes do próprio material e com provetes completamente impermeáveis, como por exemplo uma chapa metálica, normalmente selados com o produto a testar [11].

4.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

4.4.1 ESQUEMA DE PESAGEM DOS PROVETES

4.4.1.1 RECOMENDAÇÕES

A pesagem dos provetes deverá ser efectuada com intervalos de tempo seleccionados de acordo com a permeância prevista e com a precisão dos instrumentos de pesagem disponíveis, pois influenciam a precisão dos resultados.

Uma vez que a permeância depende da variação de massa entre pesagens sucessivas, para obter uma precisão de X% na determinação dessa variação de massa, utilizando uma balança cuja repetibilidade do erro seja de m_p (em kg), então o intervalo de tempo (Δ_{tp}) entre pesagens não deverá ser inferior a [53]:

$$\Delta_{tp} = \frac{200 \times m_p \times \mu \times d}{\pi_{ar} \times \Delta P \times A \times X} \quad (4.1)$$

em que:

Δ_{tp} : Intervalo de tempo entre pesagens - [s]

m_p : Repetibilidade do erro da balança - [kg]

μ : Factor de resistência à difusão de vapor¹¹ - [-]

d : Espessura média do provete¹¹ - [m]

π_{ar} : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar - [kg/(m·s·Pa)]

ΔP : Diferença de pressão de vapor de água entre as faces do provete - [Pa]

A : Área de ensaio - [m²]

X : Precisão na determinação da variação de massa entre pesagens sucessivas - [%]

Se, por alguma razão, se pretender estabelecer previamente um determinado intervalo de tempo (Δ_{tp}) entre pesagens, utilizando uma balança cuja repetibilidade do erro seja de m_p (em kg), então a área de ensaio necessária para obter uma precisão de X% na determinação da variação de massa entre pesagens é dada por:

$$A = \frac{200 \times m_p \times \mu \times d}{\pi_{ar} \times \Delta P \times \Delta_{tp} \times X} \quad (4.2)$$

¹¹ Lembre-se que, para elementos construtivos não homogéneos, em que não é possível determinar um valor exacto de μ , o produto $\mu \times e$ pode ser substituído pela espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) do provete (ver § 2.2.5.3).

A pesagem dos provetes deverá ser levada a cabo, de preferência, sem que as tinas sejam retiradas do compartimento climatizado, caso contrário deverá realizar-se num ambiente cuja temperatura se encontre num intervalo de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ relativamente à temperatura de ensaio [53]. Nos ensaios realizados, as pesagens foram efectuadas fora da câmara de ensaio, numa sala com ar condicionado regulado para uma temperatura igual à dos ensaios (23°C).

A balança utilizada nas pesagens deve, preferencialmente, ter uma resolução de 0,001 g. No entanto, nos casos em que os elementos a pesar (tina com provete, substância condicionadora e selagem) tenham peso elevado, admite-se que a resolução seja apenas de 0,01 g [53].

As pesagens devem realizar-se até que a variação de massa por unidade de tempo se mantenha constante (corrente estacionária de difusão) e, portanto, apresente uma variação aproximadamente linear no tempo. A prEN ISO 12572 [53] impõe que os ensaios sobre um provete só terminem quando em 5 pesagens consecutivas a variação de massa em função do tempo, excluindo a pesagem inicial, se mantiver num intervalo de $\pm 5\%$ relativamente ao valor médio, ou de $\pm 10\%$ se a permeância do provete for baixa ($\mu > 750\,000$). Refira-se que este limite não parece muito correcto, uma vez que o factor de resistência à difusão de vapor (μ) é mais apropriado para caracterizar os materiais e não os provetes, para os quais é mais adequada uma caracterização através da permeância (P_e) ou da espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d), conforme se referiu anteriormente no § 2.2.5.

Para além deste critério, a prEN ISO 12572 [53] impõe também que os ensaios se prolonguem apenas até que a variação de peso das tinas ultrapasse 100 vezes a repetibilidade do processo de pesagem.

Para facilitar a identificação da altura em que se atinge a corrente estacionária de difusão, recomenda-se a elaboração de um gráfico com a variação de massa dos provetes em função do tempo.

Refira-se que a ASTM E 96 [11] apresenta critérios diferentes quanto à pesagem dos provetes. Assim, a balança utilizada nos ensaios deverá ter sensibilidade para uma alteração de peso inferior a 1% da variação total registada durante o período de corrente estacionária de difusão. Se a sensibilidade da balança for pequena, aumenta-se o período de ensaio considerado.

Os intervalos entre pesagens deverão permitir obter 8 ou 10 medições durante o ensaio e a hora a que é feita cada pesagem deverá ser determinada com uma precisão de 1% do intervalo de tempo entre pesagens sucessivas [11].

4.4.1.2 ESQUEMA DE PESAGEM UTILIZADO NOS ENSAIOS

Nos ensaios realizados, face ao grande número de provetes, às diferenças das suas características de permeabilidade ao vapor, etc., optou-se por encontrar um esquema de pesagem que permitisse pesar todas as tinas na mesma altura, evitando demasiadas perturbações no ambiente do compartimento de ensaio. Assim, para a generalidade dos provetes utilizou-se um intervalo de tempo entre pesagens de cerca de uma semana, com excepção dos provetes com maior permeância ao vapor, nomeadamente os provetes de betão celular (sem revestimento) e os provetes de papel kraft com asfalto, que foram pesados diariamente, menos aos fins-de-semana e feriados.

No que toca à balança utilizada (Figura 4.13), apesar da sua resolução ser de 0,001 g, não foi possível determinar a sua repetibilidade do erro, pelo que não se conhece a precisão das medições efectuadas.



Figura 4.13 – Aspecto geral da balança utilizada nos ensaios

4.4.2 REGISTO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO

A forma como foi efectuado o registo das condições de temperatura, humidade relativa e velocidade do ar no interior do compartimento de ensaio, foi já referida no § 4.2.3.

Além destes parâmetros, deve também proceder-se ao registo diário da pressão barométrica no laboratório onde decorram os ensaios, podendo em alternativa ser obtida numa estação meteorológica próxima [53].

A FEUP dispõe de uma estação meteorológica que permitiu obter os valores da pressão barométrica durante parte do tempo em que decorreram os ensaios. Contudo, a mudança de instalações da FEUP e algumas falhas registadas no equipamento não permitiram que o registo fosse efectuado ao longo de todo esse período, apresentando-se na Figura 4.14 os registos que foi possível obter.

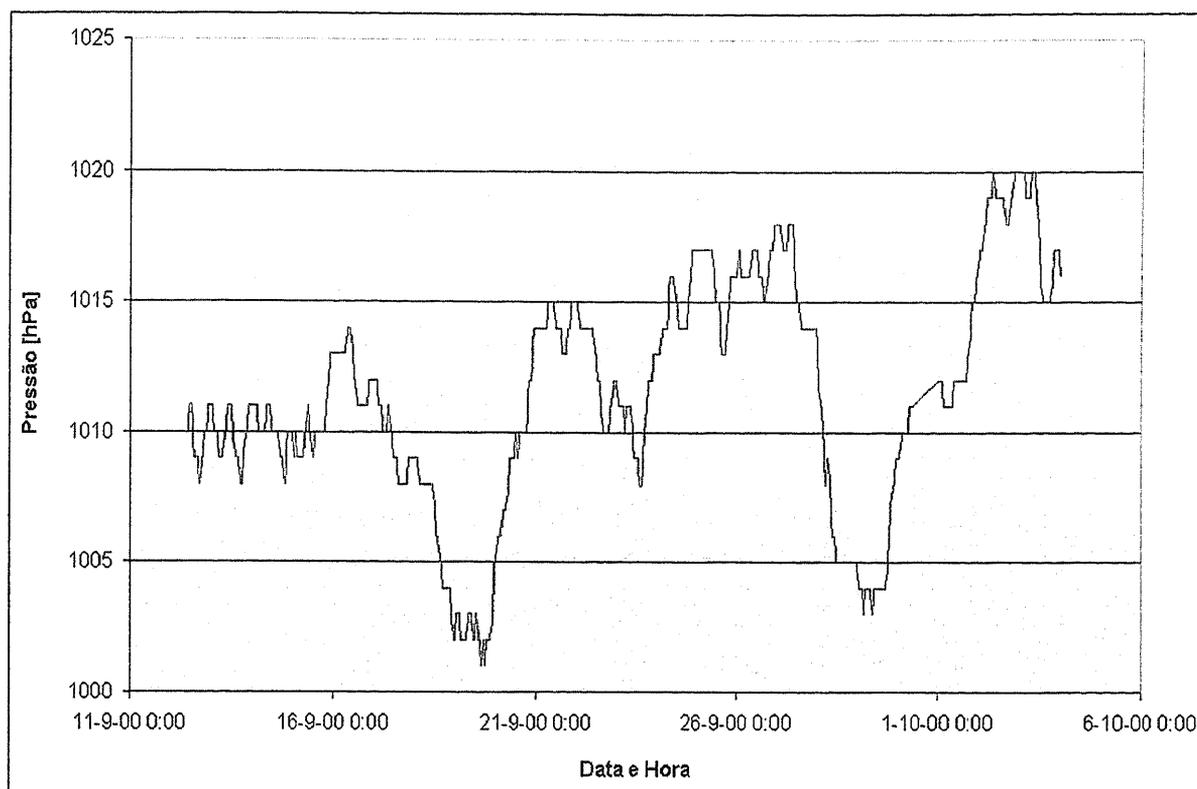


Figura 4.14 – Pressão barométrica registada pela estação meteorológica da FEUP durante o período assinalado

Para provetes com elevada resistência à difusão de vapor, especialmente membranas flexíveis de pequena espessura, variações elevadas da pressão barométrica de dia para dia podem afectar os resultados. Este efeito pode ser controlado utilizando apenas os valores das pesagens efectuadas em alturas com pressão barométrica idêntica ou através da utilização de um provete de referência [53].

O provete de referência, conforme se referiu anteriormente no § 4.3.3.3, é ensaiado exactamente como os restantes mas sem que seja colocada qualquer substância condicionadora no interior da tina. Pelas razões já apontadas não se utilizou nenhum provete de referência.

Também não se seleccionaram apenas as pesagens efectuadas em alturas em que a pressão barométrica foi idêntica, uma vez que na maioria dos provetes o número de pesagens efectuadas foi baixo. Por outro lado, nos casos em que se efectuaram mais pesagens, as limitações impostas pela quantidade máxima de humidade adsorvida pela substância condicionadora, obrigaram a que se considerassem apenas os valores iniciais, conforme se explica mais à frente no § 4.7.

4.5 DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS

4.5.1 DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE DIFUSÃO DE VAPOR DE ÁGUA

Recorrendo à representação gráfica da variação da massa do provete em função do tempo e fazendo uma regressão linear com os pontos a partir dos quais a variação de massa por unidade de tempo se mantém constante, determina-se a inclinação da recta que mais se aproxima dos pontos que definem a corrente estacionária de difusão, que é igual ao fluxo de difusão de vapor de água e pode ser expressa da seguinte forma:

$$G_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (4.3)$$

em que:

G_{12} : Fluxo de difusão de vapor de água - [kg/s]

$m_2 - m_1$: Variação da massa depois de estabelecida a corrente estacionária de difusão - [kg]

$t_2 - t_1$: Intervalo de tempo correspondente à variação de massa - [s]

4.5.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO DE DIFUSÃO DE VAPOR DE ÁGUA

A densidade de fluxo de difusão de vapor de água (g) obtém-se dividindo o fluxo de difusão de vapor de água (G) pela área útil de ensaio - A (em m^2):

$$g = \frac{G}{A} \quad (4.4)$$

4.5.3 DETERMINAÇÃO DA PERMEÂNCIA E DA RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE ÁGUA

A resistência à difusão de vapor de água dos provetes pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$R_d = \frac{P_s \cdot \frac{HR_1 - HR_2}{100}}{g} \quad (4.5)$$

em que:

R_d : Resistência à difusão de vapor de água - [($m^2 \cdot s \cdot Pa$)/kg]

- P_s : Pressão de saturação à temperatura que decorreu o ensaio - [Pa]
 $HR_1 - HR_2$: Diferença entre as humidades relativas existentes no interior e no exterior da tina de ensaio - [%]

Por seu lado, a Permeância (Pe) ao vapor do provete corresponde ao inverso da sua resistência à difusão, conforme se havia referido anteriormente no § 2.2.5.3:

$$Pe = \frac{1}{R_d} = \frac{g}{\Delta P} = \frac{g}{P_s \cdot \frac{HR_1 - HR_2}{100}} \quad (4.6)$$

4.5.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA

Para determinar o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (π) do material, basta dividir a espessura do provete – d (em metros) pela sua resistência à difusão de vapor de água (R_d):

$$\pi = \frac{d}{R_d} = \frac{Pe}{d} \quad (4.7)$$

4.5.5 DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE E DO FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR

Tal como foi referido anteriormente no § 2.2.5, a espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) e o factor de resistência à difusão de vapor (μ) são parâmetros que permitem comparar as características de permeabilidade ao vapor dos provetes ensaiados com a permeabilidade ao vapor de água do ar (π_{ar}), da seguinte forma:

$$\mu = \frac{\pi_{ar}}{\pi} \quad (4.8)$$

$$S_d = \pi_{ar} \cdot R_d = \frac{\pi_{ar}}{Pe} = \mu \cdot d \quad (4.9)$$

O valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar (π_{ar}) pode ser obtido através das expressões (2.20) e (2.21), apresentadas no § 2.2.5.1.

4.6 FACTORES DE ERRO NOS RESULTADOS

4.6.1 GENERALIDADES

Existem vários factores que influenciam a precisão dos resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor, alguns dos quais foram já mencionados, nomeadamente as flutuações das condições de ensaio (temperatura, humidade relativa e consequentemente pressão de vapor), a precisão na determinação das dimensões dos provetes, a precisão do esquema de pesagem das tinas, as flutuações da pressão barométrica, etc..

A importância destes erros é maior nos provetes com maior permeância ao vapor de água, e a prEN ISO 12572 [53] refere mesmo que os procedimentos de ensaio anteriormente referidos apenas são apropriados para provetes cuja espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) seja, pelo menos, igual a 0,1 m.

Para além dos erros referidos, existem dois tipos de erro que em seguida serão analisados, que estão associados às resistências das camadas de ar adjacentes aos provetes durante os ensaios e às áreas de selagem.

4.6.2 INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DO AR NOS ENSAIOS

A existência de uma camada de ar no interior da tina de ensaio implica a existência de uma resistência adicional à difusão de vapor de água, para além da resistência dos provetes. Além disso, há que considerar também a resistência superficial à difusão de vapor de água, em ambas as faces do provete. Assim, a resistência à difusão do vapor de água medida no ensaio é igual à soma da resistência do ar e das resistências superficiais com a do provete ensaiado. A não consideração deste factor pode originar um erro que é tanto mais importante quanto maior for a permeância (P_e) do provete.

A correcção deste problema pode ser efectuada de três formas:

- A - Se o valor da resistência do ar é muito pequeno, comparado com o valor da resistência do material, então o seu valor é desprezado. Existem certas normas que inclusivamente não fazem qualquer referência à resistência da camada de ar (são os casos da NP 2256 [77] e da ASTM E 96-94 [11]). Para provetes cuja espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) seja, pelo menos, igual a 0,2 m, a prEN ISO 12572 [53] não impõe qualquer correcção devido aos espaços de ar.

B - Partir da espessura da camada de ar de difusão equivalente total ($S_{d_{total}}$), retirar a espessura de ar (d_{ar}) existente no interior da tina e ficar com a espessura da camada de ar de difusão equivalente do material ($S_{d_{material}}$):

$$S_{d_{material}} = S_{d_{total}} - d_{ar} \quad (4.10)$$

Alguns documentos seguem esta metodologia de cálculo, como é o caso da ficha de ensaio do LNEC – FE Hu 11 [84].

Para provetes cuja espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) seja inferior a 0,2 m, a prEN ISO 12572 [53] apresenta um critério idêntico, indicando que a permeância corrigida (Pe_c) dos provetes deverá ser obtida da seguinte forma:

$$Pe_c = \frac{1}{\frac{1}{Pe} - \frac{d_{ar}}{\pi_{ar}}} \quad (4.11)$$

em que:

Pe_c : Permeância ao vapor corrigida - [kg/(m²·s·Pa)]

Pe : Permeância ao vapor obtida nos ensaios, sem correcção - [kg/(m²·s·Pa)]

d_{ar} : Espessura do espaço de ar no interior da tina de ensaio - [m]

π_{ar} : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar - [kg/(m·s·Pa)]

Para além desta correcção, a prEN ISO 12572 [53] indica que, no caso de se ensaiarem provetes com elevada permeância, a velocidade do ar sobre os mesmos deverá ser de, pelo menos, 2 m/s, de modo a que seja desprezável a resistência à difusão da camada de ar em contacto com a superfície do provete, conforme se havia já referido no § 4.2.3.

C - Tomar em consideração a resistência da camada de ar no interior das tinas de ensaio e a resistência superficial à difusão de vapor de água em ambas as faces do provete.

Na situação C é necessário determinar a resistência à difusão de vapor de água das camadas de ar adjacentes a ambas as faces do provete, que é função da humidade relativa, da temperatura e da pressão atmosférica - R_f (HR, T, P). Fanney *et al.* (1991 - [19]) realizaram uma série de ensaios para determinação do seu valor, usando vários tipos de soluções salinas e duas temperaturas de ensaio. No Quadro 4.7 são apresentados os resultados desses ensaios.

Quadro 4.7 – Resistência à difusão de vapor de água das camadas de ar – R_f [19]

Soluções Salinas		Temperatura de 24 °C			Temperatura de 7 °C		
		Humidade Relativa [%]		$R_f \times 10^8$ [Pa·s·m ² /kg]	Humidade Relativa [%]		$R_f \times 10^8$ [Pa·s·m ² /kg]
		Interior	Exterior		Interior	Exterior	
L Cl	K C ₂ H ₃ O ₂	11	23	4,87	11	23	5,76
Mg Cl ₂	K ₂ CO ₃	33	43	5,23	34	43	4,69
Na Br	KI	58	69	7,58	63	73	5,55
Na Cl	K Cl	75	85	4,27	76	87	5,23
Sr (NO ₃) ₂	K ₂ SO ₄	85	97	4,39	92	98	4,40

A resistência à difusão de vapor de água do material ($R_{d_{material}}$) é, assim, igual à diferença entre a resistência total do ensaio ($R_{d_{total}}$) e a resistência do ar (R_f):

$$R_{d_{material}} = R_{d_{total}} - R_f \quad (4.12)$$

Após uma análise do Quadro 4.7, pode-se confirmar que a humidade relativa e a temperatura têm alguma influência na determinação da resistência à difusão do vapor de água das camadas de ar, evidenciando a necessidade de uma maior investigação nesta área.

4.6.3 INFLUÊNCIA DA ÁREA DE SELAGEM

Para algumas configurações das tinas de ensaio, a área total dos provetes excede a área útil da tina de ensaio, levando a que o fluxo de vapor ocorra a duas dimensões (Figura 4.15). Por esta razão, o fluxo de vapor obtido nos ensaios é superior ao real.

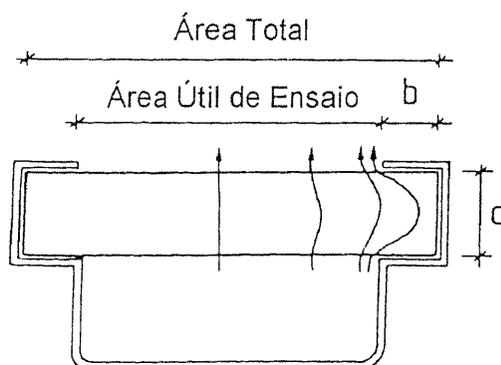


Figura 4.15 – Representação esquemática do fluxo de vapor através dos provetes [72]

A prEN ISO 12572 [53] apresenta a seguinte fórmula para correcção do valor da densidade de fluxo de difusão de vapor (g), devido à existência de selante:

$$\frac{g_{me}}{g} = 1 + \frac{4 \times d}{\pi \times S} \times \ln\left(\frac{2}{1 + e^{(-2 \times \pi \times b/d)}}\right) \quad (4.13)$$

em que:

- g_{me} : Densidade de fluxo de difusão corrigido atendendo à área de selagem – [kg/(m²·s)]
- g: Densidade de fluxo de difusão determinado no ensaio – [kg/(m²·s)]
- d: Espessura do provete – [m]
- b: Largura da área selada – [m]
- π : 3,14159
- S: Diâmetro hidráulico, que corresponde ao quádruplo da área de ensaio a dividir pelo perímetro (em provetes circulares = $4 \times A / (\pi \times D)$) – [m]

4.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

4.7.1 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

Em seguida apresentam-se os gráficos obtidos nos ensaios para os diferentes provetes, com a variação de massa de cada tina ao longo do tempo.

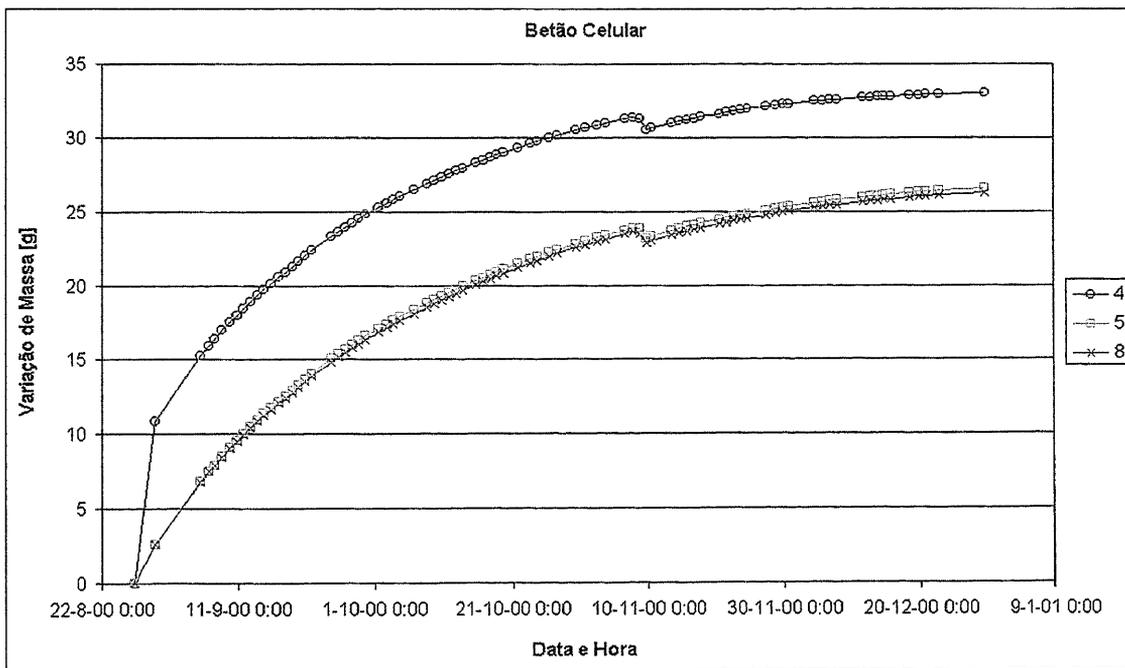


Figura 4.16 – Variação de massa dos provetes de betão celular ao longo dos ensaios

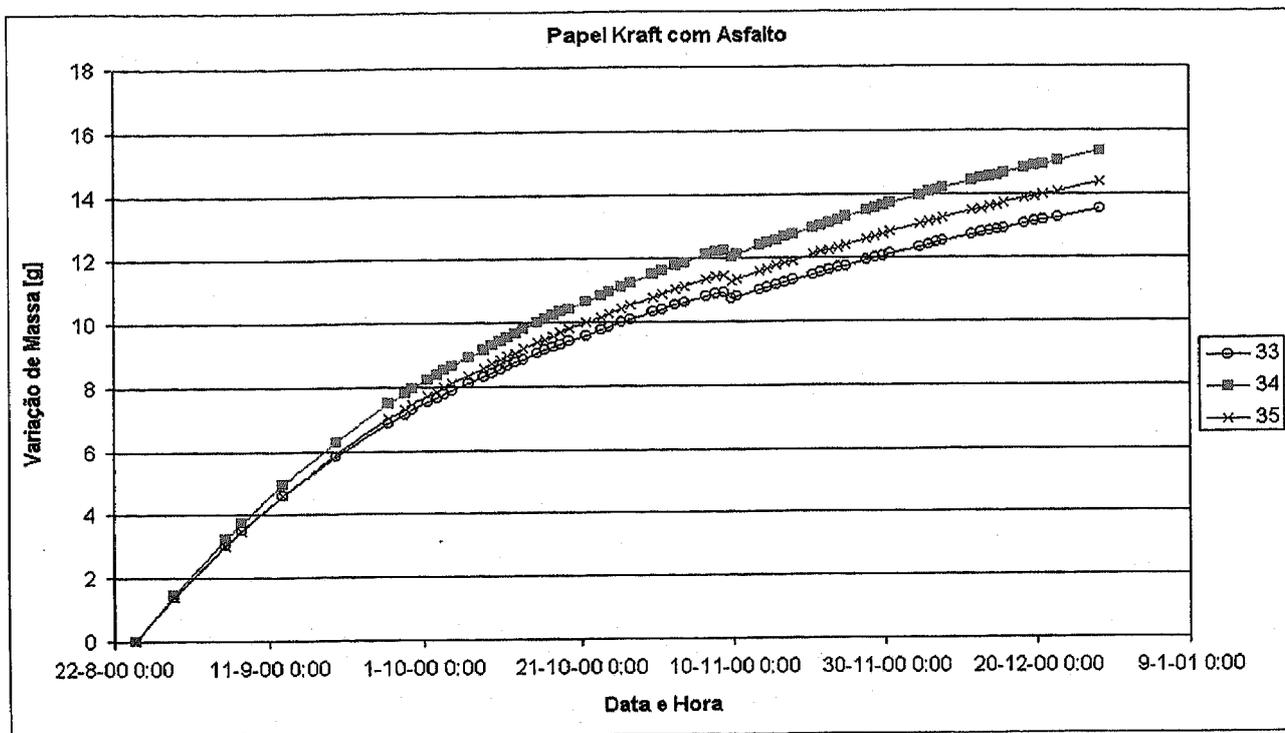


Figura 4.17 – Variação de massa dos provetes de papel kraft com asfalto ao longo dos ensaios

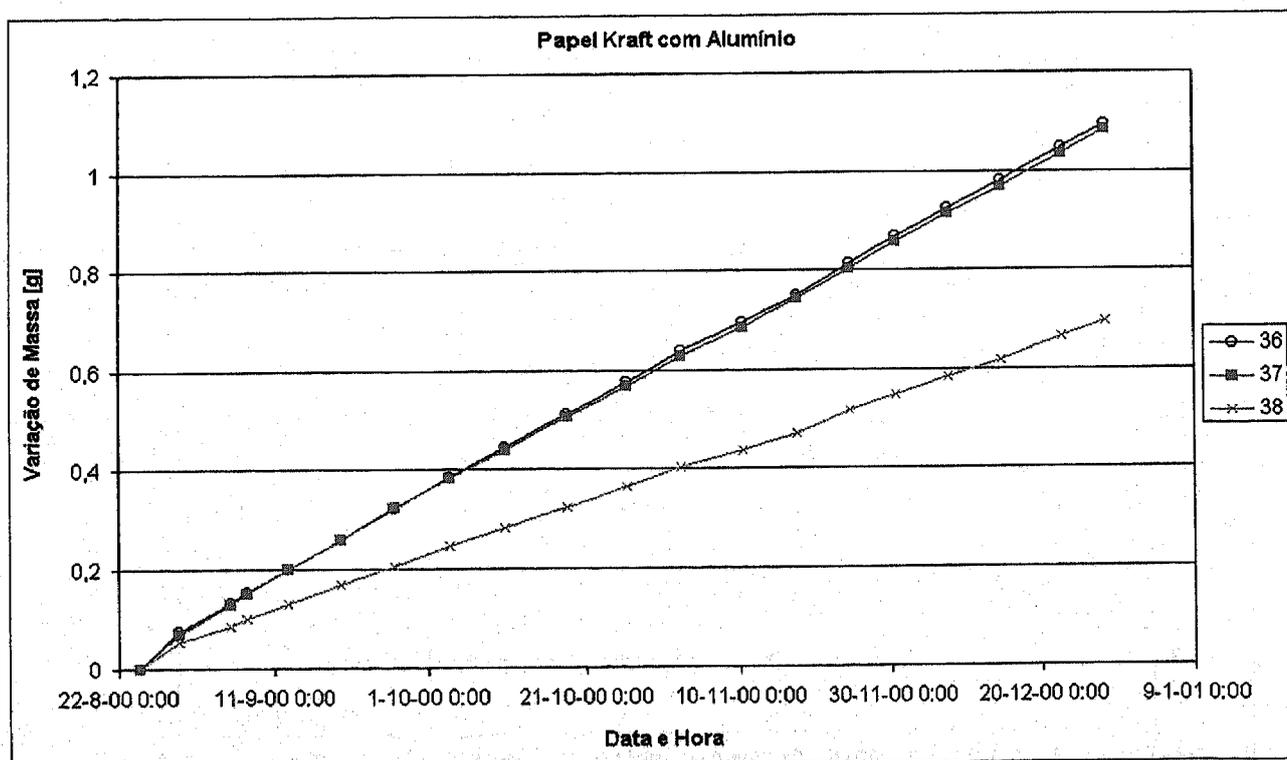


Figura 4.18 – Variação de massa dos provetes de papel kraft com alumínio ao longo dos ensaios

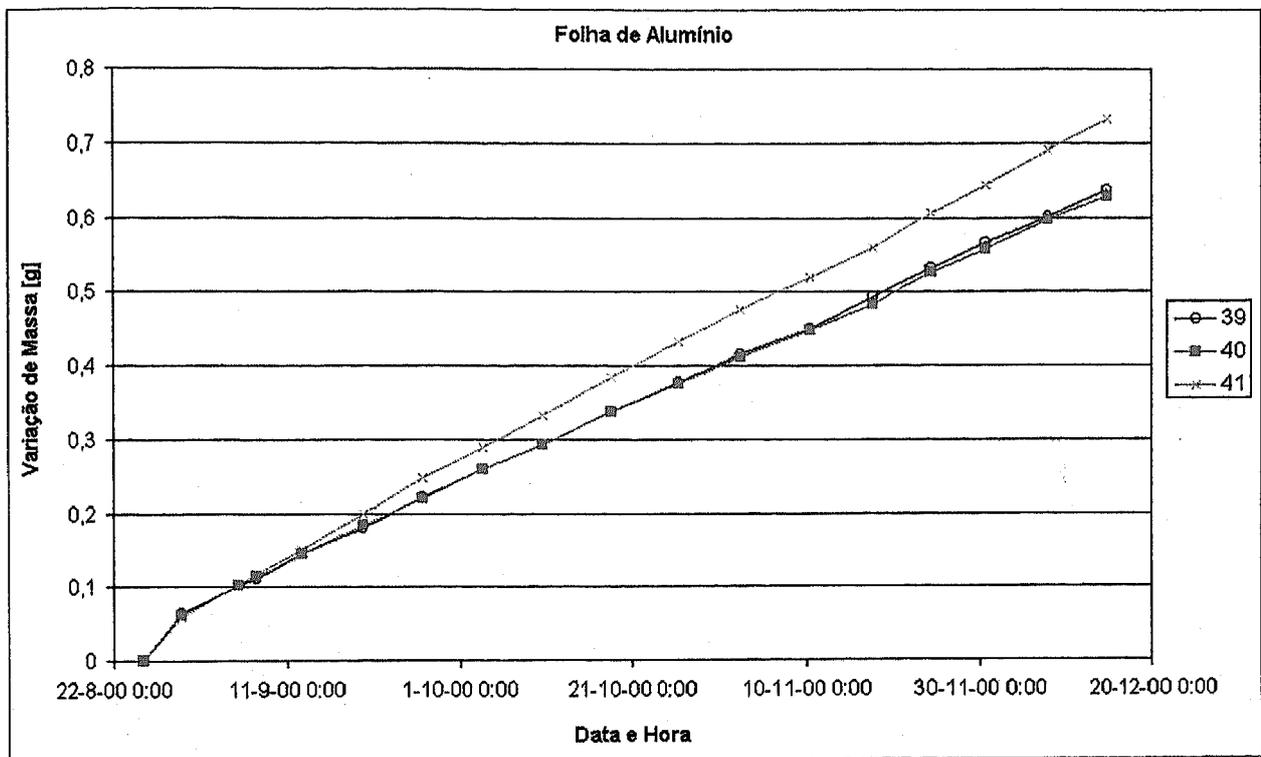


Figura 4.19 – Variação de massa dos provetes de folha de alumínio ao longo dos ensaios

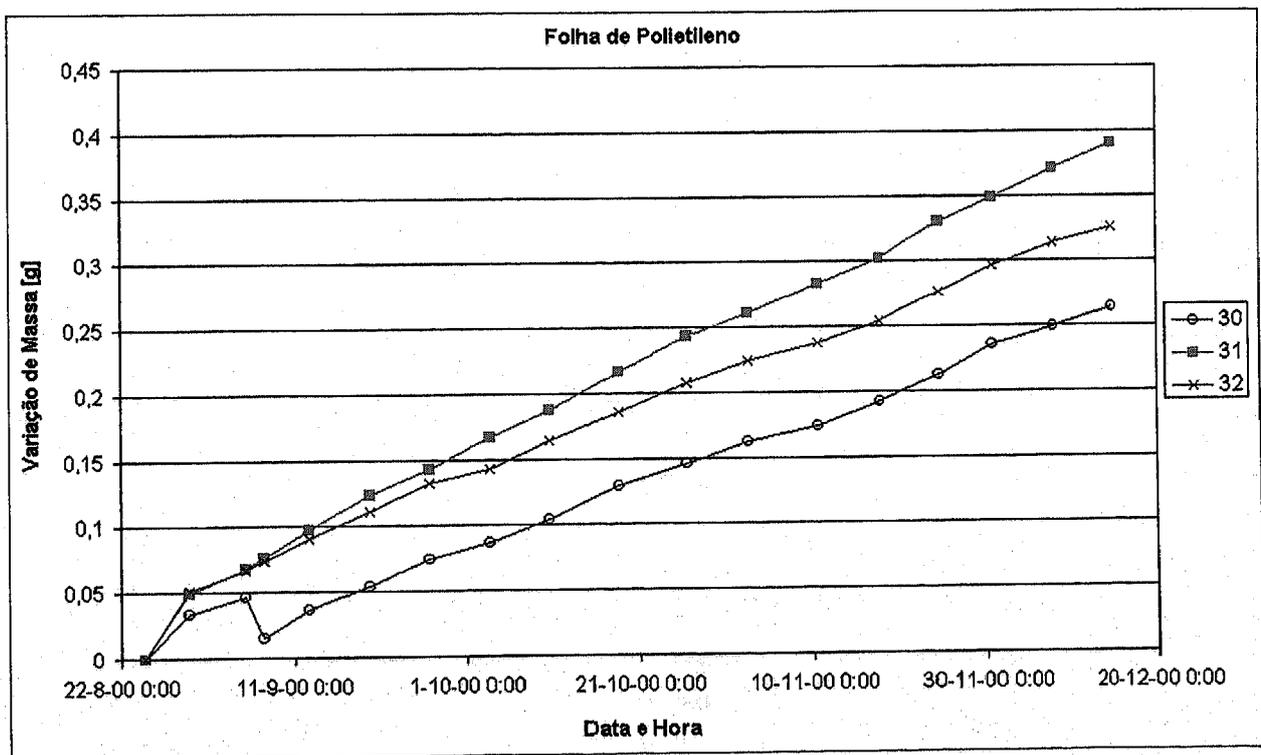


Figura 4.20 – Variação de massa dos provetes de folha de polietileno ao longo dos ensaios

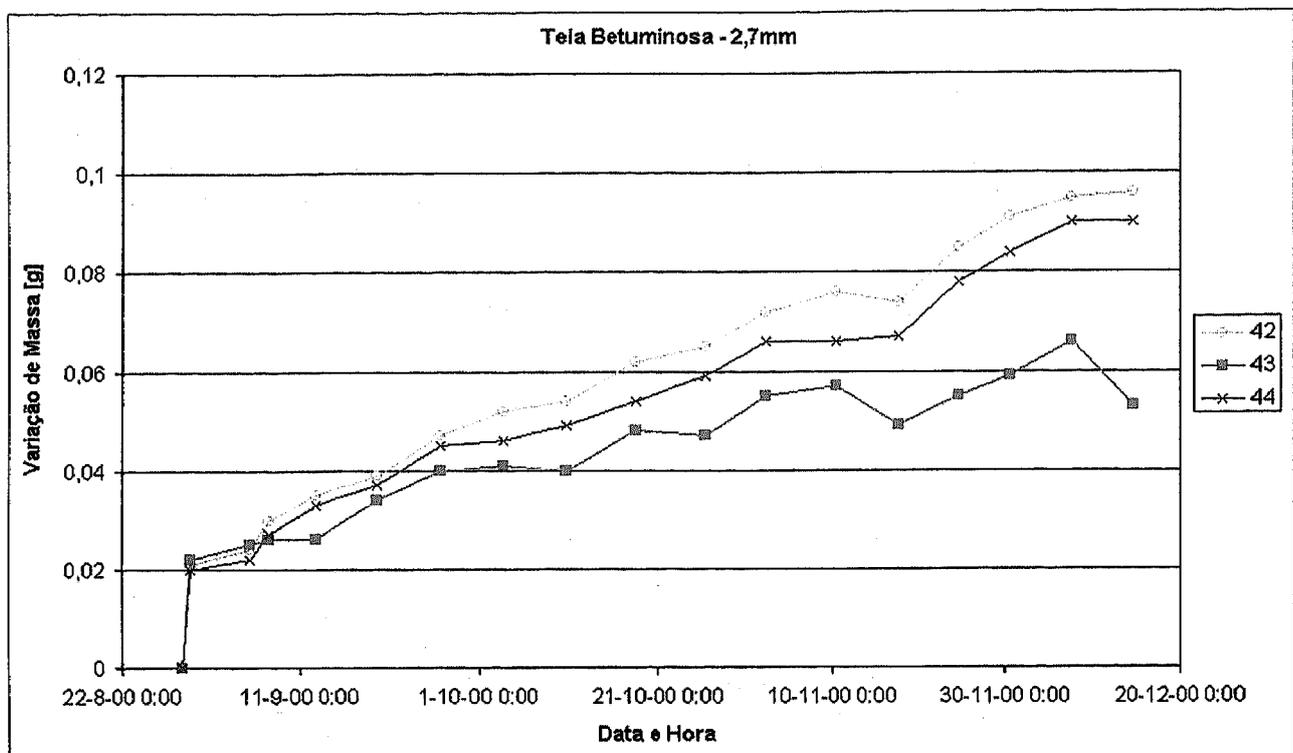


Figura 4.21 – Variação de massa dos provetes de tela betuminosa com 2,7 mm de espessura ao longo dos ensaios

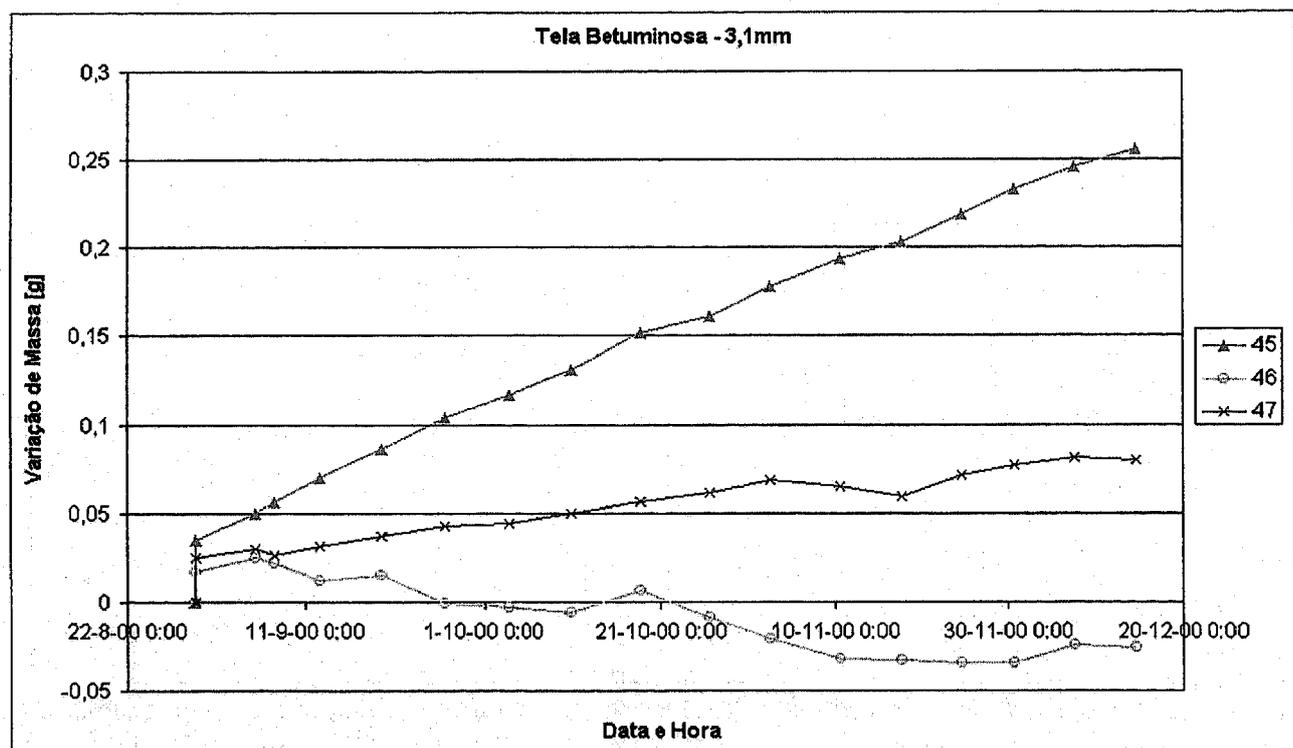


Figura 4.22 – Variação de massa dos provetes de tela betuminosa com 3,1 mm de espessura ao longo dos ensaios

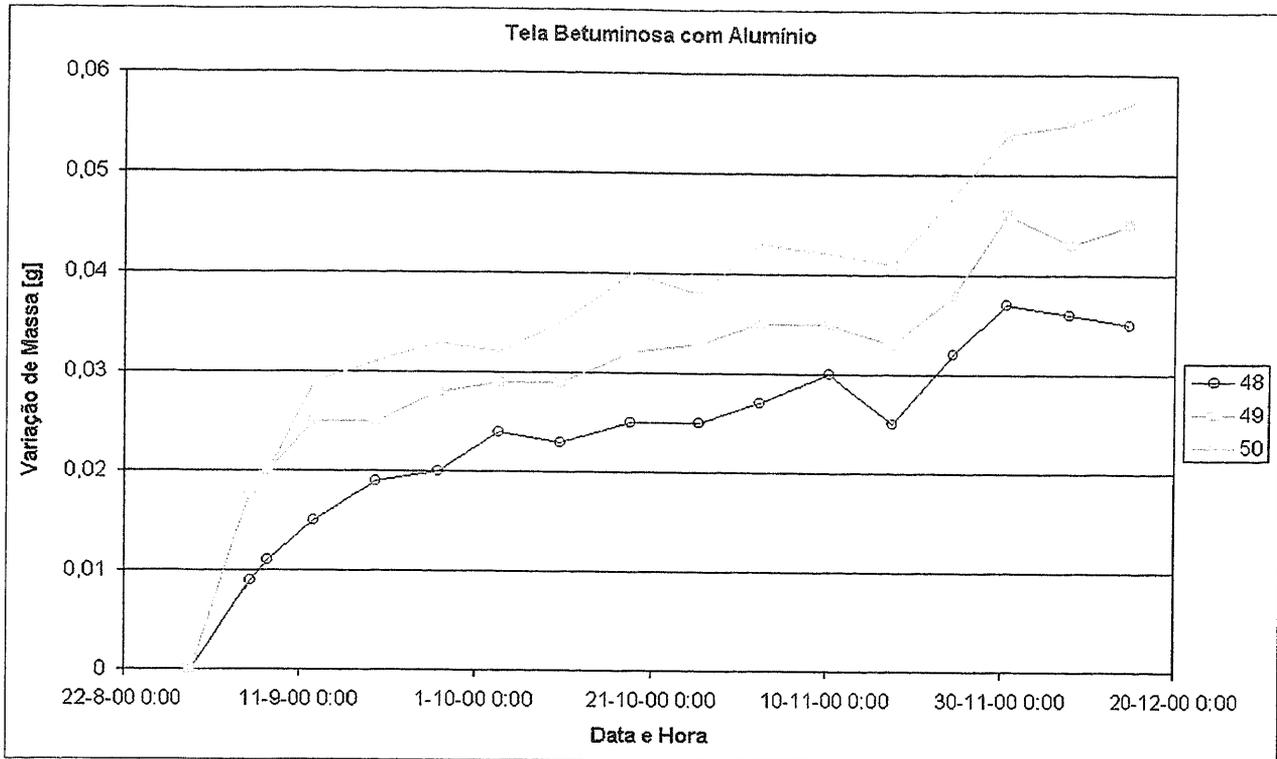


Figura 4.23 – Variação de massa dos provetes de tela betuminosa com alumínio ao longo dos ensaios

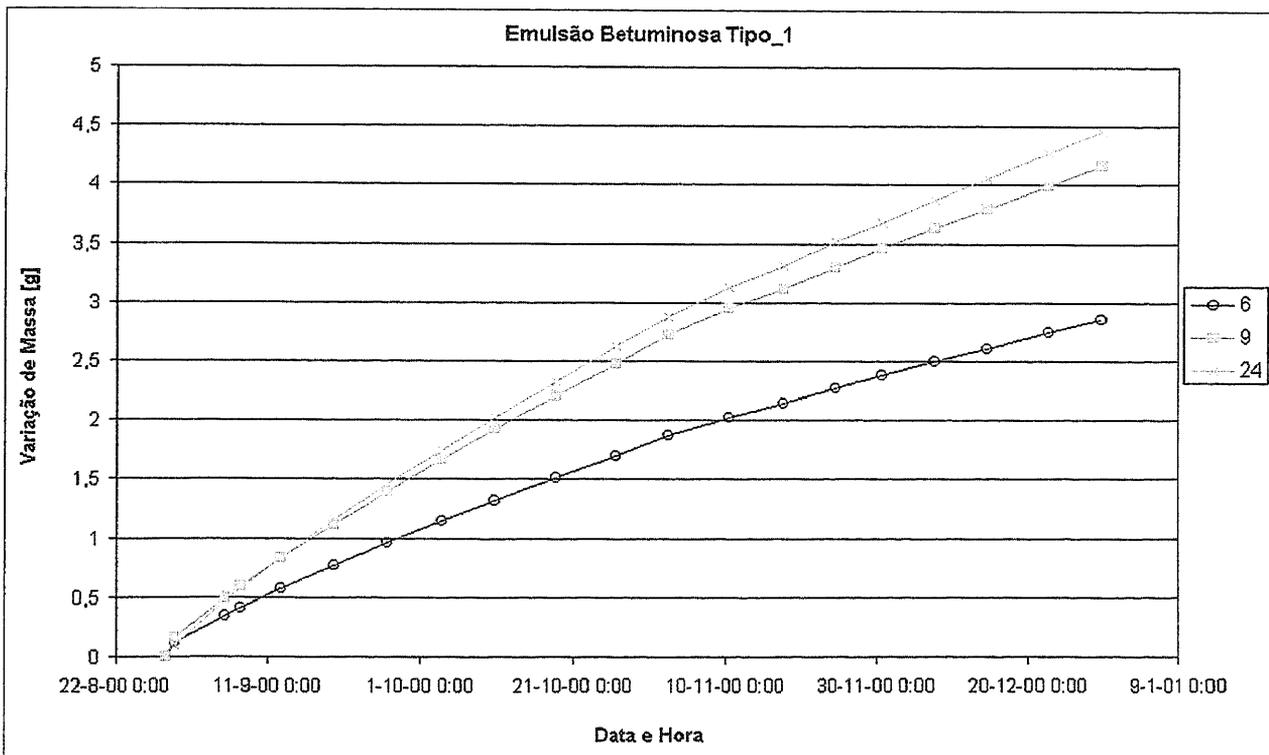


Figura 4.24 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com emulsão betuminosa do tipo_1

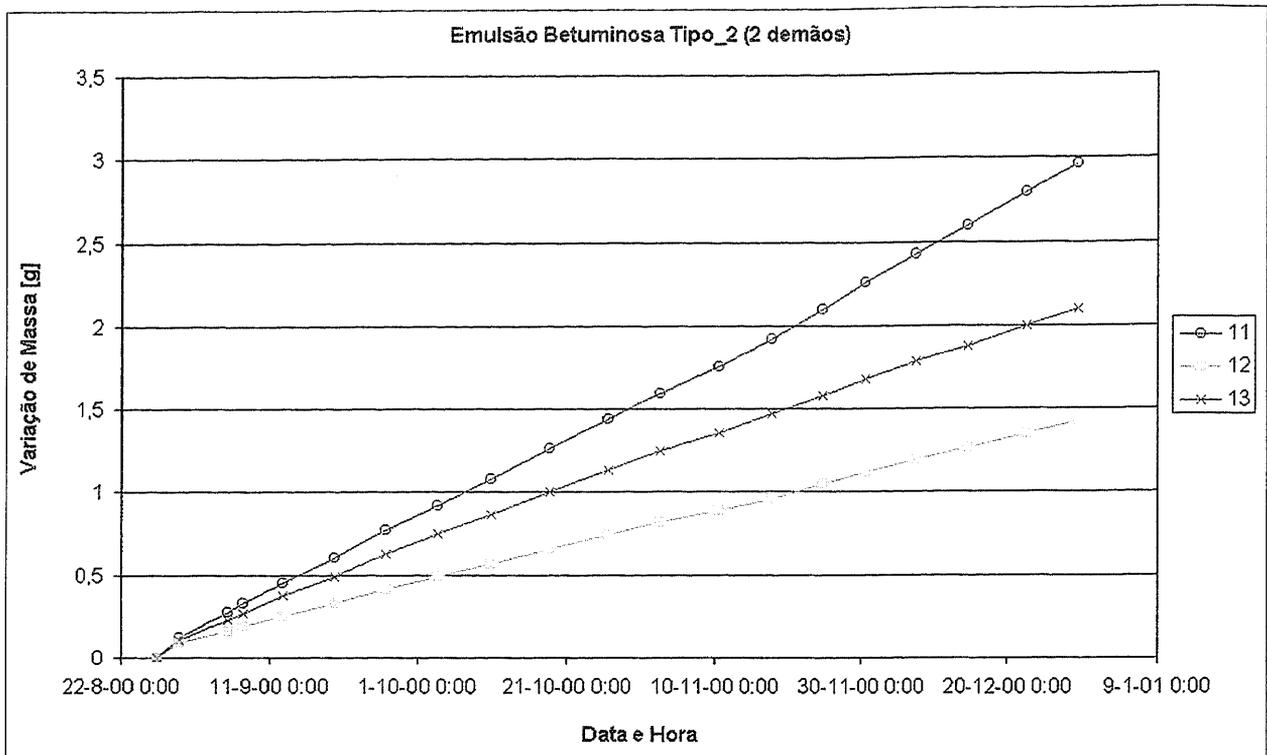


Figura 4.25 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 2 demãos de emulsão betuminosa do tipo_2

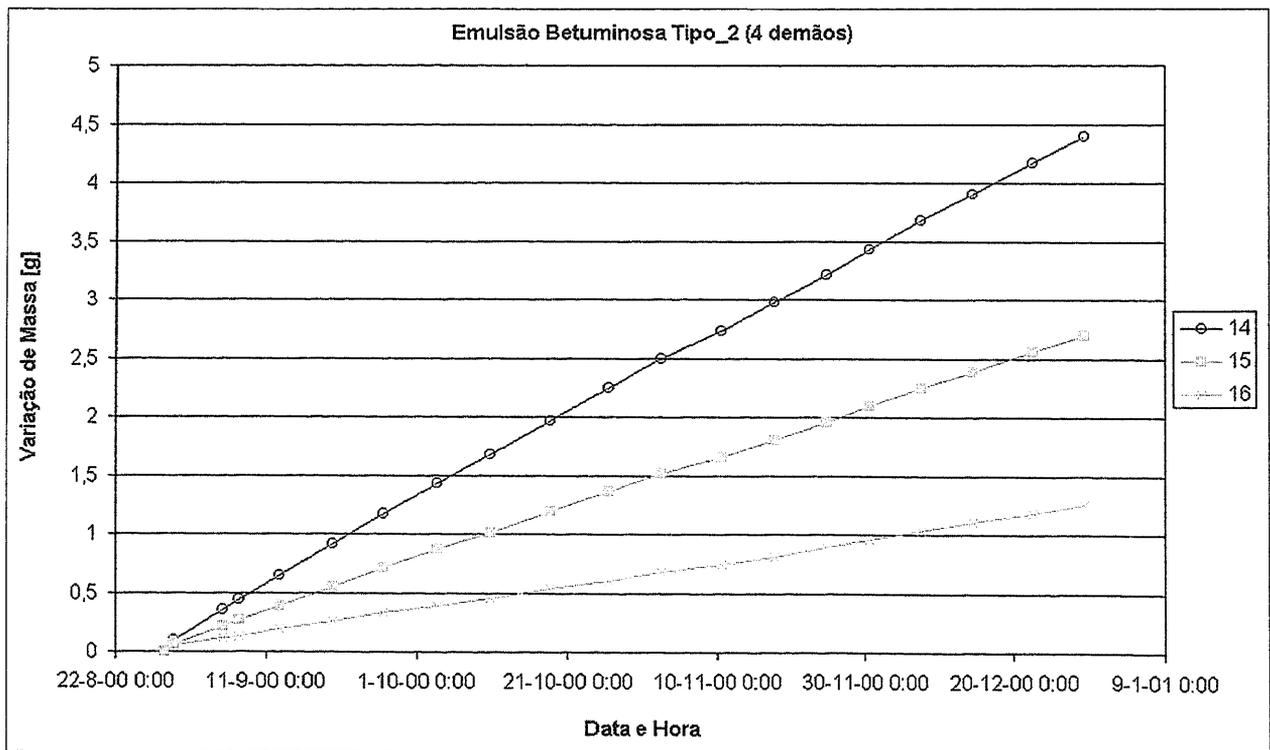


Figura 4.26 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 4 demãos de emulsão betuminosa do tipo_2

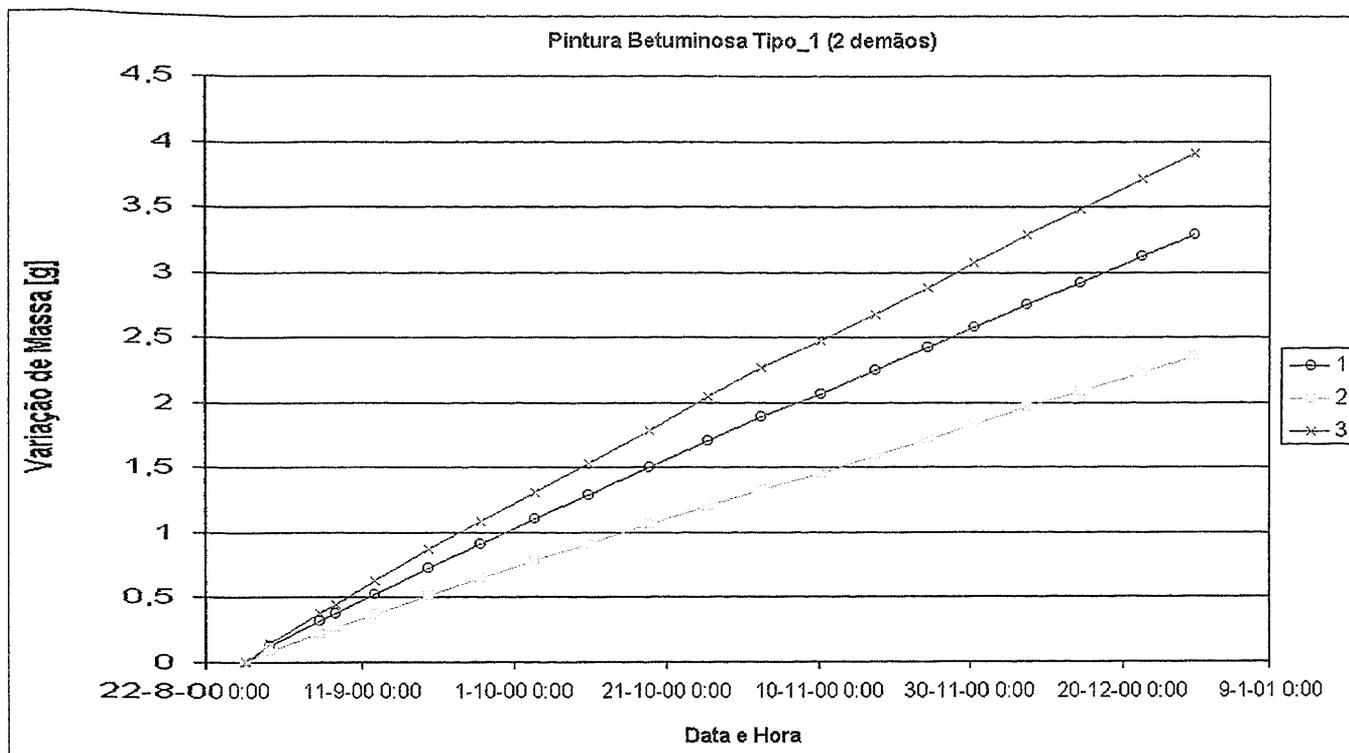


Figura 4.27 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 2 demãos de pintura betuminosa do tipo_1

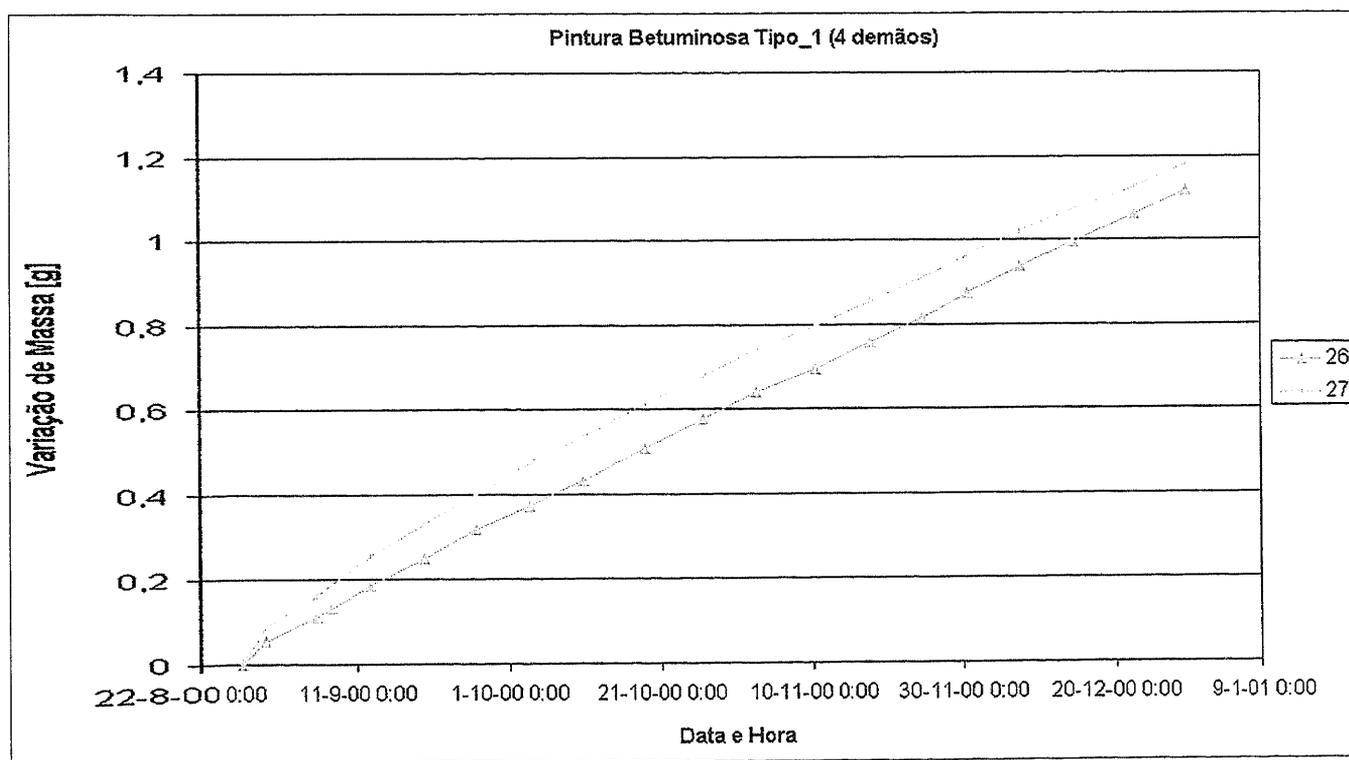


Figura 4.28 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 4 demãos de pintura betuminosa do tipo_1

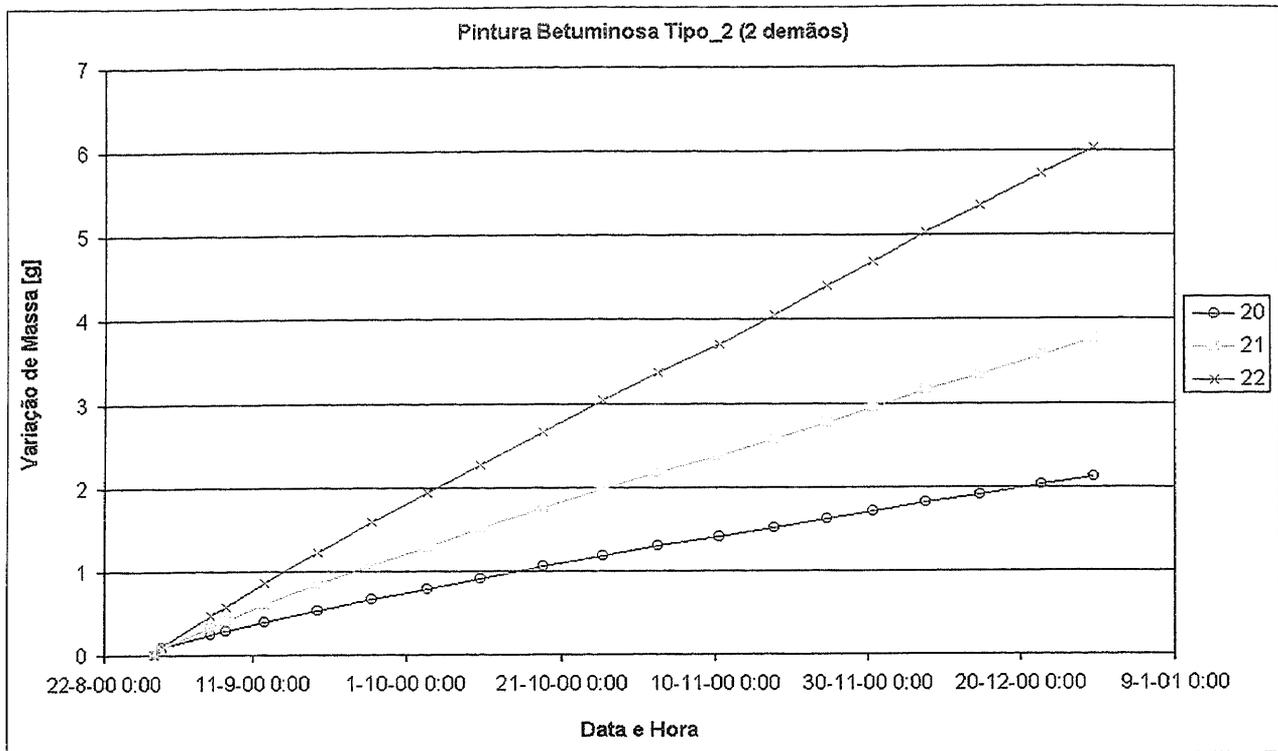


Figura 4.29 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 2 demãos de pintura betuminosa do tipo_2

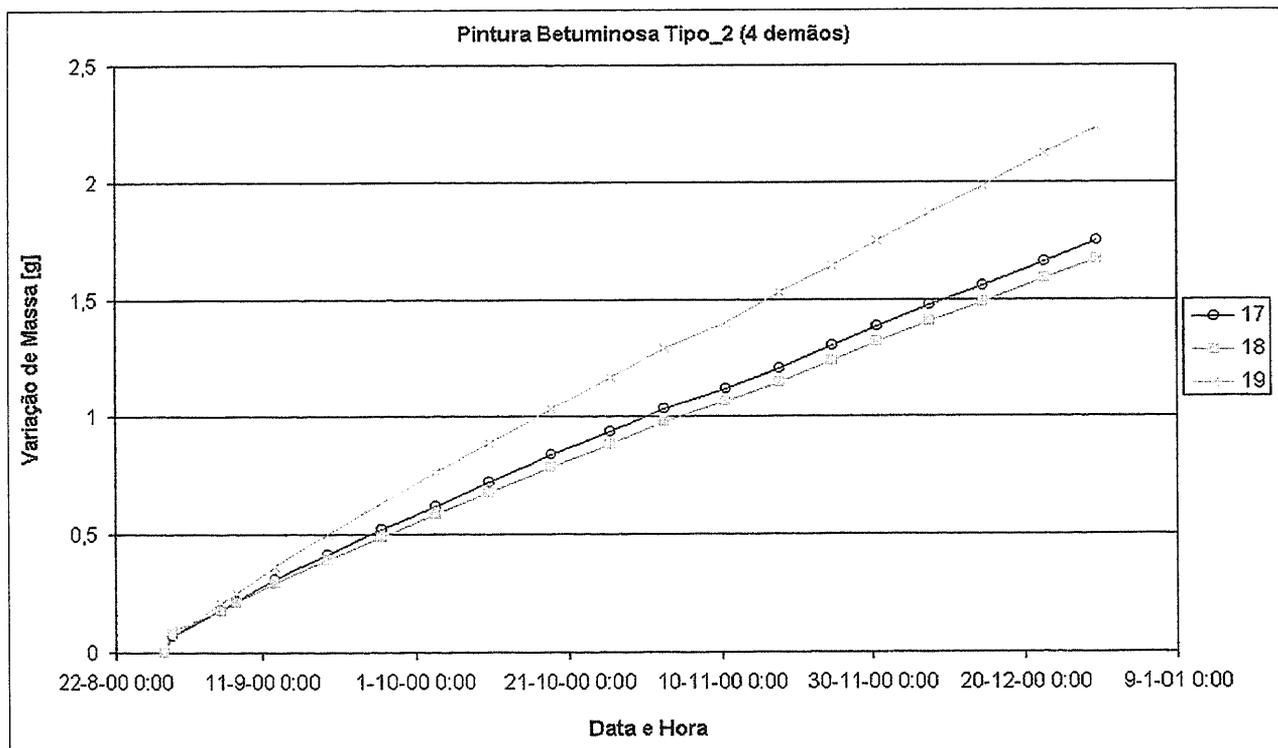


Figura 4.30 – Variação de massa, ao longo dos ensaios, dos provetes de betão celular revestidos com 4 demãos de pintura betuminosa do tipo_2

Os dois primeiros gráficos apresentados referem-se aos provetes com valores mais elevados de permeância ao vapor – os provetes de betão celular e os provetes de papel kraft com asfalto. Como se pode observar, nestes casos a variação de massa das tinas foi muito acentuada logo nas primeiras pesagens, pelo que rapidamente se atingiram os limites apresentado anteriormente no § 4.3.4. Facilmente se compreenderá que esta variação foi superior à esperada, pelo que apenas ao fim de duas semanas se reduziu o intervalo entre pesagens, quando já era tarde para obter resultados válidos.

Em quase todos os gráficos apresentados é possível identificar uma quebra nas linhas de variação de massa dos provetes em função do tempo, por volta do dia 08/11/2000, altura em que a câmara de ensaio parou por falta de energia, durante a noite, tendo o seu funcionamento ficado interrompido por várias horas.

4.7.2 VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS

4.7.2.1 ASPECTOS GERAIS

Para cada um dos provetes ensaiados indicam-se, de seguida, as características de permeabilidade ao vapor obtidas, de acordo com os princípios anteriormente referidos. Excepção para as amostras de telas betuminosas, pois como se pode observar nos gráficos anteriormente apresentados não foi possível estabelecer um regime estacionário de difusão de vapor, provavelmente devido à reduzida dimensão das tinas de ensaio, ao curto intervalo de tempo entre pesagens e às variações da pressão barométrica.

Assim, para cada material ou elemento apresentado, indica-se o período de medições considerado, o valor médio da pressão barométrica registada pela estação meteorológica da FEUP nesse período, a área útil de ensaio, o fluxo de difusão de vapor através dos provetes, com as eventuais correcções, e as características de permeabilidade ao vapor dos provetes, calculadas em função de todos estes parâmetros.

Tentou-se seleccionar o período de medições de modo a respeitar o critério da prEN ISO 12572 [53], já mencionado no § 4.4.1.1, que impõe que os ensaios sobre um provete só terminem quando em 5 pesagens consecutivas a variação de massa em função do tempo, excluindo a pesagem inicial, se mantiver num intervalo de $\pm 5\%$ relativamente ao valor médio. Contudo, não foi possível respeitar este critério para todos os provetes, quer porque se atingiu prematuramente o limite de adsorção de água permitido (como foi o caso dos provetes de betão celular e de papel kraft com asfalto), quer devido ao problema da paragem da câmara de ensaio, que se registou no dia 08/11/2000.

Face a estas dificuldades, fizeram-se as seguintes opções:

- Provetes com elevada permeância, nomeadamente os provetes de betão celular sem revestimento e os provetes de papel kraft com asfalto: nestes casos consideraram-se

apenas as medições efectuadas até se atingirem, aproximadamente, os limites de adsorção de humidade referidos no § 4.3.4 – 9,5 g e 6,6 g, respectivamente, com excepção da pesagem inicial. Determinaram-se os valores do fluxo de difusão de vapor de água (G) entre pesagens consecutivas, para o intervalo estabelecido, e calculou-se o correspondente valor médio, a partir do qual se determinaram as características de permeabilidade ao vapor do provete.

- Provetes em que, apesar de se estabelecer uma corrente de difusão de vapor mais ou menos estacionária, as perturbações provocadas pela paragem da câmara de ensaios não permitiram obter 5 pesagens consecutivas em que a variação de massa em função do tempo, excluindo a pesagem inicial, se mantivesse num intervalo de $\pm 5\%$ relativamente ao valor médio: para estes casos consideraram-se apenas as medições efectuadas até ao dia 08/11/2000, com excepção das pesagens iniciais, antes de se instalar a corrente estacionária de difusão. Com estes valores determinaram-se os valores do fluxo de difusão de vapor de água (G) entre pesagens consecutivas, para o intervalo estabelecido, e calculou-se também o correspondente valor médio, a partir do qual se determinaram os restantes parâmetros.
- Provetes em que foi possível obter 5 pesagens consecutivas em que a variação de massa em função do tempo, excluindo a pesagem inicial, se mantivesse num intervalo de $\pm 5\%$ relativamente ao valor médio, antes do dia 08/11/2000: nestes casos o valor médio do fluxo de difusão de vapor (G) foi apenas determinado com as 5 pesagens referidas.

A influência da resistência das camadas de ar (ver § 4.6.2) apenas foi determinada nos provetes de betão celular, pois foram os únicos cuja espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) foi inferior a 0,2 m.

O efeito da área de selagem (ver § 4.6.3) apenas é significativo no caso dos provetes de betão celular com ou sem revestimento, uma vez que para a generalidade dos restantes provetes a espessura é muito reduzida. De qualquer modo apresenta-se também este efeito nos provetes de membranas e folhas, utilizando valores de espessura aproximados, cuja determinação não foi possível de efectuar com grande precisão. Refira-se que para os provetes do tipo folha ou membrana, o efeito da área de selagem não ultrapassou os 0,3% em nenhum caso.

Nos provetes de betão celular revestidos desprezou-se a espessura do revestimento, tendo-se considerado apenas a espessura do suporte em betão, na determinação do efeito da área de selagem.

Nos casos em que se considerou este efeito da área de selagem, uma vez que a área útil superior é diferente da área útil inferior, utilizaram-se os parâmetros relativos à média entre estes dois valores, nomeadamente a espessura (b) da área de selagem e o diâmetro hidráulico (S), a utilizar na expressão (4.13).

Em alguns casos, não se dispõem de valores da pressão barométrica durante o período de medições considerado na obtenção dos resultados, tendo-se optado por considerar o valor médio da semana mais próxima. Com estes valores médios da pressão barométrica determinaram-se os respectivos valores do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar (π_{ar}), através das expressões apresentadas no § 2.2.5.1 e considerando uma temperatura de 23 °C.

O gradiente de pressão de vapor a que todos os provetes foram submetidos é dado por:

$$\Delta P = \left(\frac{HR_2 - HR_1}{100} \right) \times P_s = \left(\frac{50 - 0}{100} \right) \times 610,5 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \times 23}{237,3 + 23} \right)} = 1403,9 \text{ Pa} \quad (4.14)$$

4.7.2.2 RESULTADOS DOS PROVETES DE BETÃO CELULAR

- Período de medições considerado: 29/08/2000 a 10/09/2000
- Valor médio da pressão barométrica: 101 053 Pa. Este valor corresponde à média dos valores horários registados entre as 10 horas do dia 12/09/2000 e as 9 horas do dia 19/09/2000, inclusive (relativos à semana mais próxima).
- $\pi_{ar} = 195,83 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- Diâmetro útil de ensaio: 77,7 mm = (76,2+79,2)/2
- Área útil de ensaio: 47,4 cm²
- Diâmetro hidráulico: S = 0,0777 m
- Face à acentuada variação de peso inicial do provete n.º 4, não se consideraram os seus resultados. Admite-se que tenha havido algum erro na pesagem inicial.

Quadro 4.8 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular

Provete		G	g	Espessura	Diâmetro	b	g _{me} /g	g _{me}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]
Betão Celular	5	6,248E-09	1,318E-06	12,7125	92,49	0,007395	1,1391	1,501E-06
	8	6,121E-09	1,291E-06	14,885	93,905	0,008103	1,1612	1,499E-06
Provete		Pe		S _d	R _d - R _{d,ar}	π		μ
		[kg/(m ² ·s·Pa)]		[m]	[m ² ·s·Pa/kg]	[kg/(m·s·Pa)]		[-]
Betão Celular	5	1,0690E-09		0,183181	874139013,3	14,543E-12		13,47
	8	1,0678E-09		0,18339	875202501,5	17,007E-12		11,51
Média=						15,775E-12		12,49

O valor médio do coeficiente de permeabilidade ao vapor (π) será utilizado na determinação das características de permeabilidade ao vapor das películas de revestimento, em que o betão celular serviu de suporte.

Se atendermos aos valores que são apresentados no Anexo II, os valores obtidos nos ensaios situam-se no limite inferior dos valores indicados em bibliografia da especialidade para o betão celular.

4.7.2.3 RESULTADOS DOS PROVETES DE EMULSÃO BETUMINOSA TIPO_1

- Período de medições considerado: 26/09/2000 a 02/11/2000
- Valor médio da pressão barométrica: 101 277 Pa. Este valor corresponde à média dos valores horários registados entre as 16 horas do dia 26/09/2000 e as 24 horas do dia 03/10/2000, inclusive.
- $\pi_{ar} = 195,39 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
- Diâmetro útil de ensaio: 77,7 mm = (76,2+79,2)/2
- Área útil de ensaio: 47,4 cm²
- Diâmetro hidráulico: S = 0,0777 m

Quadro 4.9 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com emulsão betuminosa tipo_1

Provete	G	g	Espessura	Diâmetro	b	g _{me} /g	g _{me}	
	[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]	
Emulsão_1	6	2,891E-10	6,096E-08	12,520	93,910	0,008105	1,1387	6,942E-08
	9	4,193E-10	8,844E-08	13,298	93,740	0,008020	1,1462	1,014E-07
	24	4,481E-10	9,449E-08	13,055	93,845	0,008073	1,1439	1,081E-07
Provete	P _e total	S _d total	R _d suporte	P _e revestimento	S _d revestimento	P _e média	S _d média	
	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[m ² ·s·Pa/kg]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	
Emulsão_1	6	4,945E-11	3,952	793651449,6	51,468E-12	3,796	70,194E-12	2,90
	9	7,220E-11	2,706	842937711,7	76,879E-12	2,542		
	24	7,700E-11	2,538	827565469,2	82,235E-12	2,376		

Os valores do provete n.º 6 são significativamente diferentes dos valores dos outros 2 provetes, o que seria de esperar pois a massa de revestimento aplicada também foi significativamente superior no provete n.º 6, conforme se mostrou no Quadro 4.3.

4.7.2.4 RESULTADOS DOS PROJETOS DE EMULSÃO BETUMINOSA TIPO_2

- Período de medições considerado: 12/09/2000 a 26/10/2000 – para os provetes n.ºs 11, 12 e 13
12/09/2000 a 18/10/2000 – para os provetes n.ºs 14 e 15
12/09/2000 a 02/11/2000 – para o provete n.º 16
- Valor médio da pressão barométrica: 101 148 Pa. Este valor corresponde à média dos valores horários registados entre as 16 horas do dia 12/09/2000 e as 24 horas do dia 03/10/2000, inclusive.
- $\pi_{ar} = 195,64 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
- Diâmetro útil de ensaio: 77,7 mm = $(76,2+79,2)/2$
- Área útil de ensaio: 47,4 cm²
- Diâmetro hidráulico: S = 0,0777 m

Quadro 4.10 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com emulsão betuminosa tipo_2

Provete		G	g	Espessura	Diâmetro	b	g _{me} /g	g _{me}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]
Emulsão_2 (x 2)	11	2,608E-10	5,501E-08	12,793	93,850	0,008075	1,1414	6,279E-08
	12	1,293E-10	2,727E-08	12,753	93,850	0,008075	1,1410	3,112E-08
	13	2,024E-10	4,269E-08	12,513	93,760	0,008030	1,1385	4,860E-08
Emulsão_2 (x 4)	14	4,271E-10	9,008E-08	13,055	93,815	0,008058	1,1439	1,030E-07
	15	2,586E-10	5,455E-08	13,078	93,785	0,008043	1,1441	6,241E-08
	16	1,086E-10	2,291E-08	12,908	93,735	0,008018	1,1424	2,617E-08
Provete		P _e total	S _d total	R _d suporte	P _e revestimento	S _d revestimento	P _e média	S _d média
		[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[m ² ·s·Pa/kg]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]
Emulsão_2 (x 2)	11	4,472E-11	4,375	810925412,8	46,406E-12	4,216	34,857E-12	6,13
	12	2,217E-11	8,827	808389785,2	22,570E-12	8,668		
	13	3,462E-11	5,651	793176019,4	35,596E-12	5,496		
Emulsão_2 (x 4)	14	7,340E-11	2,666	827565469,2	78,141E-12	2,504	47,741E-12	5,69
	15	4,445E-11	4,401	828991759,7	46,154E-12	4,239		
	16	1,864E-11	10,496	818215342,3	18,929E-12	10,335		

As diferenças de resultados entre os diferentes provetes são bastante acentuadas, em particular nos provetes em que a quantidade de revestimento aplicada foi mais elevada.

4.7.2.5 RESULTADOS DOS PROVETES DE PINTURA BETUMINOSA TIPO_1

- Período de medições considerado: 29/08/2000 a 26/09/2000 – para os provetes n.ºs 1 e 2
19/09/2000 a 26/10/2000 – para o provete n.º 3
12/09/2000 a 02/11/2000 – para os provetes n.ºs 26 e 27
- Valores médios da pressão barométrica: para cada provete indicam-se, no Quadro 4.11, os respectivos valores, que foram determinados de acordo com os princípios referidos anteriormente.
- Diâmetro útil de ensaio: $77,7 \text{ mm} = (76,2+79,2)/2$
- Área útil de ensaio: $47,4 \text{ cm}^2$
- Diâmetro hidráulico: $S = 0,0777 \text{ m}$

Quadro 4.11 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com pintura betuminosa tipo_1

Provete		G	g	Esp.	Ø	b	g _{me} /g	g _{me}	P _t	π _{ar}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]	[Pa]	[kg/(m·s·Pa)]
Pintura_1 (x 2)	1	3,285E-10	6,928E-08	11,955	93,955	0,008128	1,1331	7,850E-08	101086	1,9576E-10
	2	2,324E-10	4,902E-08	14,043	93,715	0,008008	1,1532	5,653E-08	101086	1,9576E-10
	3	3,704E-10	7,812E-08	12,600	93,915	0,008107	1,1395	8,902E-08	101272	1,9540E-10
Pintura_1 (x 4)	26	1,032E-10	2,176E-08	12,930	93,745	0,008023	1,1426	2,486E-08	101148	1,9564E-10
	27	1,103E-10	2,325E-08	13,378	93,770	0,008035	1,1470	2,667E-08	101148	1,9564E-10
Provete		Pe _{total}	S _{d_{total}}	R _{d_{suporte}}	Pe _{revestimento}	S _{d_{revestimento}}	Pe _{média}	S _{d_{média}}		
		[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[m ² ·s·Pa/kg]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]		
Pintura_1 (x 2)	1	5,592E-11	3,501	757835709,2	58,389E-12	3,353	55,648E-12	3,66		
	2	4,027E-11	4,862	890163776,4	41,764E-12	4,687				
	3	6,341E-11	3,082	798722704,8	66,791E-12	2,926				
Pintura_1 (x 4)	26	1,771E-11	11,049	819641632,8	17,968E-12	10,889	18,638E-12	10,5		
	27	1,900E-11	10,299	848008967,0	19,308E-12	10,133				

4.7.2.6 RESULTADOS DOS PROVETES DE PINTURA BETUMINOSA TIPO_2

- Período de medições considerado: 26/09/2000 a 02/11/2000 – para os provetes n.ºs 19, 20 e 21
12/09/2000 a 18/10/2000 – para os provetes n.ºs 17, 18 e 22

- Valores médios da pressão barométrica: para cada provete indicam-se, no Quadro 4.12, os respectivos valores, que foram determinados de acordo com os princípios referidos anteriormente.
- Diâmetro útil de ensaio: $77,7 \text{ mm} = (76,2+79,2)/2$
- Área útil de ensaio: $47,4 \text{ cm}^2$
- Diâmetro hidráulico: $S = 0,0777 \text{ m}$

Quadro 4.12 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de betão celular revestidos com pintura betuminosa tipo_2

Provete		G	g	Esp.	Ø	b	g _{me} /g	g _{me}	P _t	π _{ar}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]	[Pa]	[kg/(m·s·Pa)]
Pintura_2 (x 2)	20	2,028E-10	4,277E-08	12,883	93,635	0,007967	1,1420	4,885E-08	101277	1,9539E-10
	21	3,476E-10	7,331E-08	13,053	93,915	0,008107	1,1440	8,386E-08	101277	1,9539E-10
	22	5,792E-10	1,221E-07	12,198	93,840	0,008070	1,1354	1,387E-07	101148	1,9564E-10
Pintura_2 (x 4)	17	1,693E-10	3,571E-08	12,683	93,885	0,008092	1,1403	4,072E-08	101148	1,9564E-10
	18	1,586E-10	3,345E-08	11,848	93,940	0,008120	1,1320	3,787E-08	101148	1,9564E-10
	19	2,071E-10	4,367E-08	12,908	93,855	0,008078	1,1425	4,990E-08	101277	1,9539E-10
Provete		Pe _{total}	S _d _{total}	R _d _{suporte}	Pe _{revestimento}	S _d _{revestimento}	Pe _{média}	S _d _{média}		
		[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[m ² ·s·Pa/kg]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]		
Pintura_2 (x 2)	20	3,480E-11	5,616	816630575,0	35,813E-12	5,456	68,537E-12	3,46		
	21	5,974E-11	3,271	827406992,4	62,841E-12	3,109				
	22	9,879E-11	1,980	773207951,8	106,96E-12	1,829				
Pintura_2 (x 4)	17	2,900E-11	6,746	803952436,8	29,694E-12	6,589	31,278E-12	6,34		
	18	2,697E-11	7,253	751021210,0	27,532E-12	7,106				
	19	3,554E-11	5,498	818215342,3	36,606E-12	5,338				

4.7.2.7 RESULTADOS DOS PROVETES DE PAPEL KRAFT COM ASFALTO

- Período de medições considerado: 29/08/2000 a 26/09/2000
- Valor médio da pressão barométrica: 101 088 Pa. Este valor corresponde à média dos valores horários registados entre as 10 horas do dia 12/09/2000 e as 18 horas do dia 26/09/2000, inclusive.
- $\pi_{ar} = 195,76 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- Diâmetro útil de ensaio: 71,9 mm

- Área útil de ensaio: 40,6 cm²
- Diâmetro hidráulico: S = 0,0719 m

Quadro 4.13 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de papel kraft com asfalto

Provete		G	g	Espessura	Diâmetro	b	g _{me} /g	g _{me}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]
Papel kraft com asfalto	33	2,338E-09	5,759E-07	0,100	108,615	0,018358	1,0012	5,766E-07
	34	2,547E-09	6,272E-07	0,100	107,570	0,017835	1,0012	6,280E-07
	35	2,394E-09	5,897E-07	0,100	108,095	0,018098	1,0012	5,904E-07
Provete		Pe	S _d	Pe _{média}		S _{d_média}		
		[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]		[m]		
Papel kraft com asfalto	33	410,71E-12	0,477	426,19E-12		0,45992		
	34	447,30E-12	0,438					
	35	420,57E-12	0,465					

Estes valores devem ser analisados com alguma reserva, pois como foi já referido não foram determinados com um conjunto de medições adequado.

4.7.2.8 RESULTADOS DOS PROVETES DE PAPEL KRAFT COM ALUMÍNIO

- Período de medições considerado: 07/09/2000 a 10/10/2000 – para o provete n.º 36
26/09/2000 a 02/11/2000 – para o provete n.º 37
12/09/2000 a 18/10/2000 – para o provete n.º 38
- Valores médios da pressão barométrica: para cada provete indicam-se, no Quadro 4.14, os respectivos valores, que foram determinados de acordo com os princípios referidos anteriormente.
- Diâmetro útil de ensaio: 71,9 mm
- Área útil de ensaio: 40,6 cm²
- Diâmetro hidráulico: S = 0,0719 m

Quadro 4.14 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de papel kraft com alumínio

Provete		G	g	Espessura	Diâmetro	b	g_{me}/g	g_{me}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]
Papel kraft com alumínio	36	1,013E-10	2,495E-08	0,100	108,020	0,018060	1,0012	2,499E-08
	37	9,628E-11	2,371E-08	0,100	108,125	0,018113	1,0012	2,374E-08
	38	6,180E-11	1,522E-08	0,100	108,005	0,018053	1,0012	1,524E-08
Provete		P_t	π_{ar}	P_e	S_d	$P_{e,média}$	$S_{d,média}$	
		[Pa]	[kg/(m·s·Pa)]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	
Papel kraft com alumínio	36	101146	1,9565E-10	17,79722E-12	10,993	15,188E-12	13,524	
	37	101276	1,9540E-10	16,91104E-12	11,554			
	38	101149	1,9564E-10	10,85448E-12	18,024			

4.7.2.9 RESULTADOS DOS PROVETES DE FOLHA DE ALUMÍNIO

- Período de medições considerado: 12/09/2000 a 02/11/2000 – para os provetes n.ºs 39 e 40
26/09/2000 a 02/11/2000 – para o provete n.º 41
- Valores médios da pressão barométrica: para cada provete indicam-se, no Quadro 4.15, os respectivos valores, que foram determinados de acordo com os princípios referidos anteriormente.
- Diâmetro útil de ensaio: 71,9 mm
- Área útil de ensaio: 40,6 cm²
- Diâmetro hidráulico: $S = 0,0719$ m

Quadro 4.15 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de folha de alumínio

Provete		G	g	Espessura	Diâmetro	b	g_{me}/g	g_{me}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]
Folha de Alumínio	39	6,173E-11	1,520E-08	0,120	108,020	0,018060	1,0015	1,522E-08
	40	6,085E-11	1,499E-08	0,120	107,625	0,017863	1,0015	1,501E-08
	41	7,229E-11	1,780E-08	0,120	107,450	0,017775	1,0015	1,783E-08
Provete		P_t	π_{ar}	P_e	S_d	$P_{e,média}$	$S_{d,média}$	
		[Pa]	[kg/(m·s·Pa)]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	
Folha de Alumínio	39	101149	1,9564E-10	10,84E-12	18,040	11,412E-12	17,242	
	40	101149	1,9564E-10	10,69E-12	18,301			
	41	101276	1,9540E-10	12,70E-12	15,385			

4.7.2.10 RESULTADOS DOS PROVETES DE FOLHA DE POLIETILENO

- Período de medições considerado: 12/09/2000 a 02/11/2000
- Valor médio da pressão barométrica: 101 149 Pa. Este valor corresponde à média dos valores horários registados entre as 17 horas do dia 12/09/2000 e as 24 horas do dia 03/10/2000, inclusive.
- $\pi_{ar} = 195,64 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
- Diâmetro útil de ensaio: 71,9 mm
- Área útil de ensaio: 40,6 cm²
- Diâmetro hidráulico: $S = 0,0719 \text{ m}$

Quadro 4.16 – Características de permeabilidade ao vapor dos provetes de folha de polietileno

Provete		G	g	Espessura	Diâmetro	b	g _{me} /g	g _{me}
		[kg/s]	[kg/(m ² ·s)]	[mm]	[mm]	[m]	-	[kg/(m ² ·s)]
Folha de Polietileno	30	2,839E-11	6,991E-09	0,230	107,705	0,017903	1,0028	7,011E-09
	31	3,700E-11	9,112E-09	0,240	107,110	0,017605	1,0029	9,139E-09
	32	3,025E-11	7,450E-09	0,230	108,260	0,018180	1,0028	7,471E-09
Provete		Pe		S _d	Pe _{média}		S _{d_média}	
		[kg/(m ² ·s·Pa)]		[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]		[m]	
Folha de Polietileno	30	4,994E-12		39,175	5,6084E-12		35,331	
	31	6,510E-12		30,054				
	32	5,322E-12		36,764				

4.7.2.11 RESUMO DOS RESULTADOS FINAIS

Nos quadros seguintes apresentam-se os resultados finais das características de permeabilidade ao vapor dos materiais que foram ensaiados e que podem desempenhar a função de barreira pára-vapor. Refira-se contudo que, apesar de também se apresentarem os resultados obtidos nos ensaios dos provetes de papel kraft com asfalto, nenhum deles se enquadra na classificação de barreiras pára-vapor que foi apresentada no § 3.4.

Para cada um dos materiais ensaiados, referem-se os valores da permeância ao vapor (Pe) e da espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d), para cada um dos provetes ensaiados e os

valores médios correspondentes. Apresenta-se também a classe de barreiras pára-vapor a que pertence cada um desses materiais, determinada com base na classificação que se apresentou no § 3.4, para os valores médios dos diferentes provetes de cada material. Refira-se, no entanto, que em alguns casos a classificação apresentada não foi obtida por todos os provetes ensaiados.

Quadro 4.17 – Características de permeabilidade ao vapor das películas de revestimento ensaiadas

Provete	Pe [kg/(m ² ·s·Pa)]	S _d [m]	Pe _{média} [kg/(m ² ·s·Pa)]	S _{d,média} [m]	Classificação (ver § 3.4)	
Emulsão_1	6	51,468×10 ⁻¹²	3,796	70,194×10 ⁻¹²	2,90	E1
	9	76,879×10 ⁻¹²	2,542			
	24	82,235×10 ⁻¹²	2,376			
Emulsão_2 (x 2)	11	46,406×10 ⁻¹²	4,216	34,857×10 ⁻¹²	6,13	E2 ^{a)}
	12	22,570×10 ⁻¹²	8,668			
	13	35,596×10 ⁻¹²	5,496			
Emulsão_2 (x 4)	14	78,141×10 ⁻¹²	2,504	47,741×10 ⁻¹²	5,69	E2 ^{b)}
	15	46,154×10 ⁻¹²	4,239			
	16	18,929×10 ⁻¹²	10,335			
Pintura_1 (x 2)	1	58,389×10 ⁻¹²	3,353	55,648×10 ⁻¹²	3,66	E1
	2	41,764×10 ⁻¹²	4,687			
	3	66,791×10 ⁻¹²	2,926			
Pintura_1 (x 4)	26	17,968×10 ⁻¹²	10,889	18,638×10 ⁻¹²	10,5	E2
	27	19,308×10 ⁻¹²	10,133			
Pintura_2 (x 2)	20	35,813×10 ⁻¹²	5,456	68,537×10 ⁻¹²	3,46	E1 ^{c)}
	21	62,841×10 ⁻¹²	3,109			
	22	106,96×10 ⁻¹²	1,829			
Pintura_2 (x 4)	17	29,694×10 ⁻¹²	6,589	31,278×10 ⁻¹²	6,34	E2
	18	27,532×10 ⁻¹²	7,106			
	19	36,606×10 ⁻¹²	5,338			

a) O provete n.º 11 apenas obteve a classificação E1;

b) Apenas o provete n.º 16 obteve a classificação E2, enquanto que os restantes pertencem à classe E1;

c) O provete n.º 20 obteve a classificação E2.

Quadro 4.18 – Características de permeabilidade ao vapor das folhas e membranas ensaiadas

Provete		Pe	S _d	Pe _{média}	S _{d,média}	Classificação (ver § 3.4)
		[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	[kg/(m ² ·s·Pa)]	[m]	
Papel kraft com asfalto	33	410,71×10 ⁻¹²	0,477	426,19×10 ⁻¹²	0,460	-
	34	447,30×10 ⁻¹²	0,438			
	35	420,57×10 ⁻¹²	0,465			
Papel kraft com alumínio	36	17,80×10 ⁻¹²	10,993	15,188×10 ⁻¹²	13,524	E2
	37	16,91×10 ⁻¹²	11,554			
	38	10,85×10 ⁻¹²	18,024			
Folha de Alumínio	39	10,84×10 ⁻¹²	18,040	11,412×10 ⁻¹²	17,242	E2
	40	10,69×10 ⁻¹²	18,301			
	41	12,70×10 ⁻¹²	15,385			
Folha de Polietileno	30	4,994×10 ⁻¹²	39,175	5,6084×10 ⁻¹²	35,331	E3
	31	6,510×10 ⁻¹²	30,054			
	32	5,322×10 ⁻¹²	36,764			

5. REGRAS DE CONCEPÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS FACE AO PROBLEMA DAS CONDENSAÇÕES INTERNAS

5.1 CRITÉRIOS GERAIS DE CONCEPÇÃO

5.1.1 INFLUÊNCIA DO CLIMA

Tal como se referiu no § 2, o clima interior dos edifícios e as condições climáticas exteriores determinam os gradientes de pressão de vapor de água a que se encontra submetida a sua envolvente, que por sua vez condicionam o fluxo de difusão de vapor através dos elementos que a compõem. As diferenças de pressão de vapor de água entre o ambiente interior dos edifícios e o exterior variam em função do tipo de utilização dos edifícios, existindo um parâmetro designado de higrometria (ver § 2.2.4.3) que permite a sua caracterização.

Os cuidados a ter na concepção dos edifícios face à difusão de vapor de água e às condensações internas dependerão da higrometria dos locais. De uma forma geral, pode afirmar-se que:

- Para edifícios com **fraca higrometria** não é necessário tomar grandes precauções relativamente ao problema da difusão de vapor, pois a probabilidade de ocorrência de condensações internas é reduzida;
- Para edifícios com **média ou forte higrometria** existem regras de concepção para diferentes tipos de elementos construtivos, em função da resistência térmica e da resistência à difusão de vapor de água das diferentes camadas que os compõem;
- Para edifícios com **muito forte higrometria**, ou para elementos construtivos não tradicionais, é necessário proceder a um estudo aprofundado para avaliar os riscos de ocorrência de condensações, recorrendo, para tal, a modelos de simulação e à experimentação. Este tipo de estudos é também recomendado para edifícios com higrometria média ou forte.

Refira-se que em zonas particulares dos edifícios onde haja elevada produção de humidade, como por exemplo nas cozinhas ou instalações sanitárias, essa humidade deverá ser extraída na fonte, através de meios de ventilação adequados, para evitar a sua transferência para áreas mais sensíveis da construção.

5.1.2 IMPORTÂNCIA DO POSICIONAMENTO DAS CAMADAS

A resistência à difusão de vapor de água das camadas deverá diminuir progressivamente do interior para o exterior de um elemento construtivo (admitindo que o fluxo de vapor se verifica do interior para o exterior – situação de Inverno). Mais especificamente, os componentes com elevada resistência à difusão de vapor (como é o caso das barreiras pára-vapor) deverão ser aplicados pelo interior das

camadas de isolamento térmico (o “lado quente” do elemento construtivo), enquanto que pelo exterior (o “lado frio” do elemento construtivo) se deverão aplicar componentes de reduzida resistência à difusão de vapor. Uma regra referida pela BSI [17] como primeira aproximação para a concepção de paredes, mas que se adapta a outros elementos construtivos, consiste em garantir que o somatório da resistência à difusão de vapor das camadas situadas pelo interior da camada de isolamento térmico seja, pelo menos, 5 vezes superior ao das camadas que se situam pelo exterior.

Para exemplificar, considere-se um elemento composto por apenas duas camadas (camada 1 e camada 2) com a mesma resistência térmica, tendo a camada 1 uma resistência à difusão de vapor mais elevada que a camada 2. Se a camada 1 for colocada pelo interior da camada 2 (Figura 5.1 à esquerda), a “curva” das pressões de saturação terá “tendência a afastar-se” da “curva” das pressões instaladas. Se, pelo contrário, a camada 1 for colocada pelo exterior da camada 2 (Figura 5.1 à direita), a “curva” das pressões de saturação “terá tendência a aproximar-se e a intersectar” a “curva” das pressões instaladas, originando condensações.

É também vantajoso, do ponto de vista da difusão de vapor, que as camadas com maior resistência térmica sejam colocadas pelo exterior das camadas menos isolantes, pois a “curva” das pressões de saturação (que acompanha o desenvolvimento da “curva” das temperaturas instaladas) ficará mais afastada da “curva” das pressões instaladas.

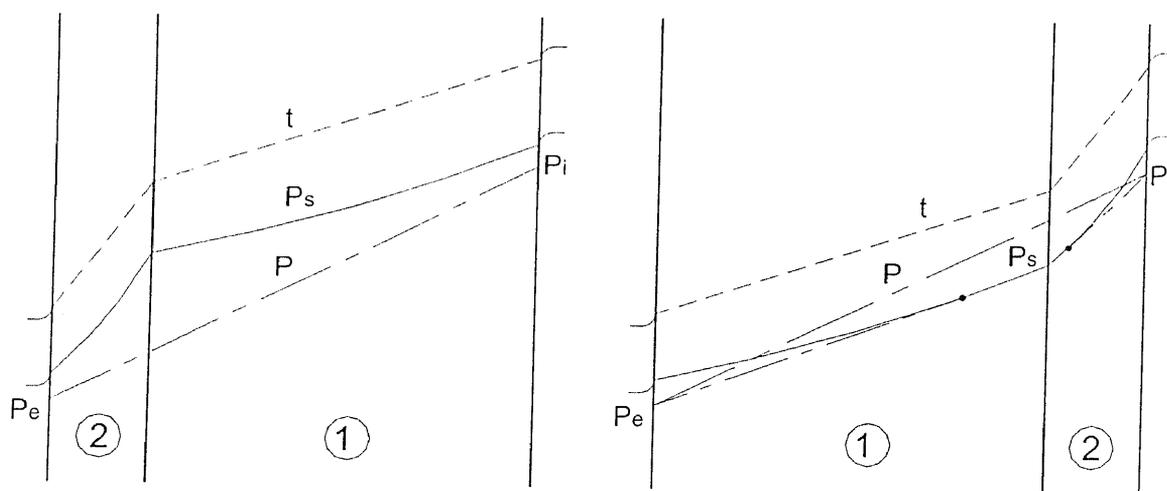
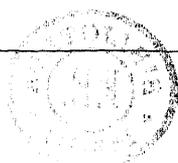


Figura 5.1 – Importância das propriedades higrotérmicas das camadas e do seu posicionamento, face ao problema das condensações internas

Refira-se que, nas situações em que o fluxo de difusão de vapor pode ocorrer em sentido contrário ao normal, o problema do posicionamento relativo das camadas assume uma importância acrescida, uma vez que a situação mais vantajosa para o fluxo num determinado sentido acaba por ser a menos adequada quando o fluxo se verifica em sentido contrário.



A título de exemplo, uma barreira pára-vapor colocada pelo interior da camada de isolamento térmico de uma parede reduz os riscos de ocorrência de condensações internas quando o fluxo de vapor se dá do interior para o exterior, pois está colocada do “lado quente” do elemento construtivo. No entanto, quando o sentido do fluxo se inverte esta barreira passa a encontrar-se do “lado frio” do elemento construtivo, aumentando os riscos de ocorrência de “condensações de Verão” (já explicadas no § 2.1), o que poderá inclusivamente tornar não aconselhável a sua utilização, do ponto de vista do comportamento global do elemento.

Uma situação em que são comuns os fluxos de vapor de água em sentido inverso ao normal verifica-se durante a secagem da humidade de construção. Por esta razão, a aplicação de camadas com muito pouca permeabilidade apenas se deverá efectuar após estarem reunidas as condições para a secagem do elemento.

Outra recomendação importante referente ao posicionamento relativo das camadas dos elementos construtivos face à difusão de vapor de água é a de que deve evitar-se a aplicação de componentes pouco permeáveis em planos distintos do elemento construtivo, na medida em que a humidade que possa atingir o espaço intermédio tem muitas dificuldades de secagem.

Uma situação deste tipo verifica-se nas coberturas em terraço tradicionais (Figura 5.2), em que a camada de isolamento térmico é aplicada sob a impermeabilização, exigindo normalmente a aplicação de uma barreira pára-vapor sob o isolamento térmico, barreira essa que dificulta a secagem de qualquer humidade das camadas sobrejacentes (superiores).

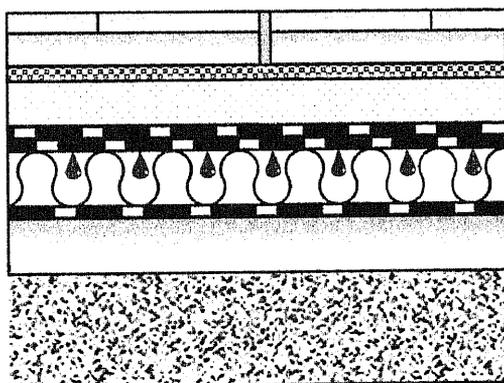


Figura 5.2 – Cobertura em terraço tradicional

Refira-se que as barreiras “inteligentes” permitem contornar este problema, na medida em que permitem a secagem da humidade que se deposite na camada de isolamento, assim que as condições climáticas sejam propícias, conforme foi já explicado no § 3.3.

5.1.3 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS COM ESPAÇOS DE AR

5.1.3.1 ESPAÇO DE AR NÃO VENTILADO

Os espaços de ar não ventilados de elementos construtivos constituem uma camada com uma elevada permeabilidade ao vapor e com uma resistência térmica que, tal como se pode constatar no Anexo VI do RCCTE [93], varia entre os 0,14 e os 0,17 $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$, no caso das paredes (fluxo horizontal), e entre os 0,13 e os 0,21 $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$, no caso de coberturas e pavimentos (fluxo vertical), em função da sua espessura.

Deste modo, e tal como foi já analisado no § 5.1.2, para diminuir os riscos de ocorrência de condensações internas é necessário que estes espaços de ar se situem do lado da ambiência mais fria relativamente às camadas de isolamento térmico, uma vez que a sua resistência à difusão de vapor de água é bastante baixa.

5.1.3.2 ESPAÇO DE AR ABERTO PARA O AMBIENTE INTERIOR

Apesar de não ser uma situação muito corrente, existem elementos construtivos com aberturas do espaço de ar para o ambiente interior ou com o pano interior bastante permeável ao ar (por exemplo devido a perfurações), em que a camada de isolamento térmico se situa pelo exterior do espaço de ar.

Nestas situações, a análise do risco de ocorrência de condensações internas deverá ser efectuada de modo a que o espaço de ar e as camadas mais interiores sejam consideradas no cálculo das temperaturas instaladas e das respectivas pressões de saturação (contabilizando a sua resistência térmica), e sejam ignoradas na determinação das pressões instaladas, resultando numa pressão parcial de vapor de água no espaço de ar igual à do ambiente interior.

5.1.3.3 ESPAÇO DE AR ABERTO PARA O AMBIENTE EXTERIOR

Nos elementos construtivos em que as camadas situadas pelo exterior do isolamento térmico são pouco permeáveis ao vapor, recomenda-se a criação de espaços de ar ventilados, por forma a permitir a rápida secagem da humidade de condensação que se possa acumular nessa zona.

Os espaços de ar no interior dos elementos construtivos onde se possa verificar a acumulação de humidade (não só resultado de condensações internas mas também com outras origens) deverão ser ventilados para o ambiente exterior. Assim, estes espaços deverão situar-se pelo exterior das camadas de isolamento térmico, por forma a não comprometer o seu desempenho devido à redução da resistência térmica do elemento construtivo, que seria originada pela entrada de ar exterior na face interior da camada de isolamento.

de entrada e saída de ar deverão estar afastadas e posicionadas de forma a que o ar seja obrigado a percorrer a totalidade do espaço (ventilação cruzada). Assim, é vantajoso que as aberturas sejam realizadas ao longo do maior lado da superfície do elemento construtivo e de uma forma o mais contínua possível, de modo a evitar a existência de bolsas de ar estagnado.

Deve garantir-se que as aberturas de ventilação não venham a ser bloqueadas por pó, tinta, gelo, etc., e que não é permitida a entrada de pássaros, grandes insectos, chuva ou neve. Uma rede com malha nominal de 4 mm permite cumprir estes requisitos sem oferecer uma grande resistência à passagem de ar [17].

É ainda necessário prestar particular atenção aos pontos singulares do elemento construtivo, verificando se as secções mínimas de ventilação são asseguradas em todos os pontos do elemento.

5.1.4 CONDENSAÇÕES DESPREZÁVEIS

Apesar dos efeitos prejudiciais que as condensações internas têm nos elementos construtivos, é válido aceitar que em determinadas circunstâncias estas possam ocorrer, desde que não afectem a durabilidade e, de forma significativa, o desempenho dos materiais e que possam ser facilmente eliminadas pelo processo natural de secagem (ver § 2.3.5). Por exemplo, uma parede em alvenaria de blocos de betão tem capacidade para armazenar uma quantidade significativa de humidade. Se um pano deste tipo for utilizado numa parede exterior, admite-se que possa ocorrer alguma condensação na sua espessura, desde que não existam entraves à sua secagem normal.

Deste ponto de vista é extremamente importante atender à temperatura da zona de ocorrência de condensações, pois se o seu valor for negativo as condensações ocorrem na forma de gelo, não podendo ser absorvidas pelo elemento construtivo, o que acarreta dificuldades acrescidas de secagem, em particular se os períodos de temperaturas negativas forem prolongados.

Um outro critério referido em alguma bibliografia consiste em limitar as condensações a valores que não provoquem uma redução da resistência térmica da camada de isolamento superior a 10%, isto é:

$$R_{t_{\text{hum}}} > 0,9 R_{t_{\text{seco}}} \quad (5.1)$$

Em resumo, pode referir-se que:

- Nas situações em que a presença de humidade origina degradação no elemento construtivo, deve garantir-se que a sua constituição permite evitar a ocorrência de condensações internas;

- Nas situações em que a eventual ocorrência de condensações internas não põe em causa a durabilidade do elemento construtivo e seus componentes e não afecta de forma significativa o desempenho dos materiais, então admite-se que possam ocorrer condensações, desde que se mantenham em valores limitados e que seja assegurada a sua secagem ao longo de um ciclo climático.

5.2 REGRAS DE CONCEPÇÃO DE PAREDES

5.2.1 PAREDES DUPLAS

Tal como se havia referido no § 5.1.2, a BSI [17] indica, como primeira aproximação para a concepção de paredes, que o somatório da resistência à difusão de vapor das camadas situadas pelo interior da camada de isolamento térmico deve ser, pelo menos, 5 vezes superior ao das camadas que se situam pelo exterior.

Na bibliografia francesa, nomeadamente do CSTB ([15], [23] e [39]), existe um conjunto de regras para concepção de paredes face à difusão de vapor, que dependem fundamentalmente da resistência térmica (R_T) e da resistência à difusão de vapor (R_D) das camadas constituintes das paredes, que serão assim designadas (Figura 5.3 e Figura 5.4):

- R_{TM} : Resistência térmica do pano exterior de parede. No caso de painéis nervurados será calculada na zona corrente, de menor espessura e onde se verifica menor resistência;
- R_{TI} : Resistência térmica da camada de isolamento térmico, incluindo eventuais espaços de ar;
- R_{TP} : Resistência térmica do pano interior de parede, excluindo eventuais barreiras pára-vapor;
- R_{DI} : Resistência à difusão de vapor da camada de isolamento térmico, excluindo eventuais barreiras pára-vapor;
- R_{DP} : Resistência à difusão de vapor do pano interior de parede, incluindo eventuais barreiras pára-vapor, desde que não se encontrem directamente aplicadas sobre o paramento interior de parede, uma vez que existem riscos de essa barreira ser posteriormente danificada ou retirada.

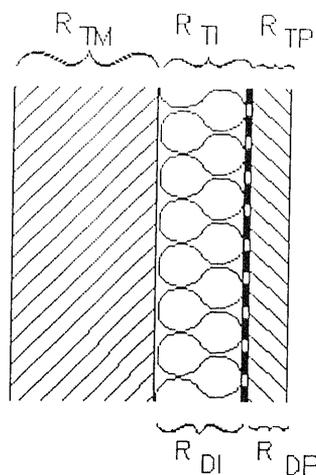


Figura 5.3 – Paredes duplas sem espaço de ar [39]

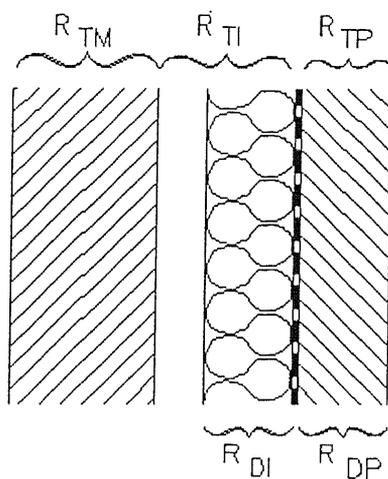


Figura 5.4 – Paredes duplas com espaço de ar [39]

Para evitar a ocorrência de condensações na face interior da camada de isolamento térmico deve verificar-se a seguinte condição:

$$R_{TI} > 3 \cdot R_{TP} \quad (5.2)$$

Para as situações correntes de panos interiores de parede em alvenaria, e com base nos valores de resistência térmica de paredes simples apresentados no ITE 28 [94] do LNEC, encontram-se no Quadro 5.1 os valores mínimos da resistência térmica do conjunto formado pela camada de isolamento térmico e eventual espaço de ar adjacente, de paredes duplas, de modo a respeitar a condição anterior.

Quadro 5.1 – Valores mínimos da resistência térmica (em [m²·°C/W]) do conjunto formado pela camada de isolamento térmico e eventual espaço de ar adjacente, de paredes duplas, de modo a evitar a ocorrência de condensações na face interior desse isolamento

Pano Interior de Parede		Espessura (e) do Pano Interior em Alvenaria [m]					
		0,045	0,07	0,10	0,11 0,12	0,15	
		Resistência térmica mínima do isolamento [m ² ·°C/W]					
Tijolo	Vazado (furado normal)	-	0,45	-	0,63	0,93	
	Perfurado	-		-	0,45	-	
	Maciço	-	0,33	-	0,42	-	
Blocos de Betão	Betão Normal	(1)	0,18	0,42	0,39	0,45	0,66
		(2)		0,24	0,21		0,60
	Betão Leve		0,36	0,72	0,72	0,78	1,08

(1) Blocos de betão normal com: 0,50×0,20×e

(2) Blocos de betão normal com: 0,40×0,20×e

Nos locais de forte higrometria, de modo a evitar a ocorrência de condensações na camada de isolamento térmico, a resistência à difusão de vapor do pano interior de parede (R_{DP}) deverá ser tal que:

$$\frac{1}{R_{DP}} < 0,06 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) \Leftrightarrow \frac{1}{R_{DP}} < 125 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \quad (5.3)$$

Apenas conhecemos alguns valores da permeância de paredes de alvenaria, que se apresentam no Anexo II. Contudo, fazendo uma proporção desses valores em função da espessura, verificamos que as paredes de alvenaria de tijolo vazado ou de blocos de betão (situações correntes em Portugal) com espessuras não inferiores a cerca de 11 cm de espessura permitem respeitar a condição anterior.

Na face interior do pano exterior de parede é difícil evitar por completo a ocorrência de condensações, que são particularmente preocupantes em zonas muito frias, devido aos riscos de congelamento da água que normalmente é absorvida pelo pano exterior de parede. Nestas situações,

desde que se verifique a condição que se apresenta de seguida, não será necessária nenhuma medida complementar:

$$3 \cdot R_{TM} \geq R_{TI} + R_{TP} \quad (5.4)$$

Caso contrário, deve respeitar-se uma das seguintes regras:

- Proceder à recolha e evacuação convenientes da água de condensação, ou;
- Limitar o fluxo de vapor, obedecendo às seguintes condições:

$$\frac{1}{R_{DP} + R_{DI}} < 625 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}), \text{ nos casos em que } R_{TM} > 0,086 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$$

$$\frac{1}{R_{DP} + R_{DI}} < 125 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}), \text{ nos casos em que } R_{TM} < 0,086 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$$

$$\frac{1}{R_{DP} + R_{DI}} < 31 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}), \text{ em zonas muito frias}$$

A evacuação da água de condensação deve ser efectuada através de orifícios colocados na base dos panos de fachada, permitindo o contacto do espaço de ar das paredes com o ambiente exterior. Esses orifícios podem ser realizados com tubos de 20 mm de diâmetro interior espaçados de 1 m ou com 30 mm de diâmetro interior e espaçados de 1,5 m (Figura 5.5). Em fachadas com tijolo à vista (Figura 5.6) estes orifícios podem ser materializados deixando juntas verticais não guarnecidas até uma altura de 50 mm, espaçadas de 1 m, nas fiadas de tijolo da base dos panos de parede [39].

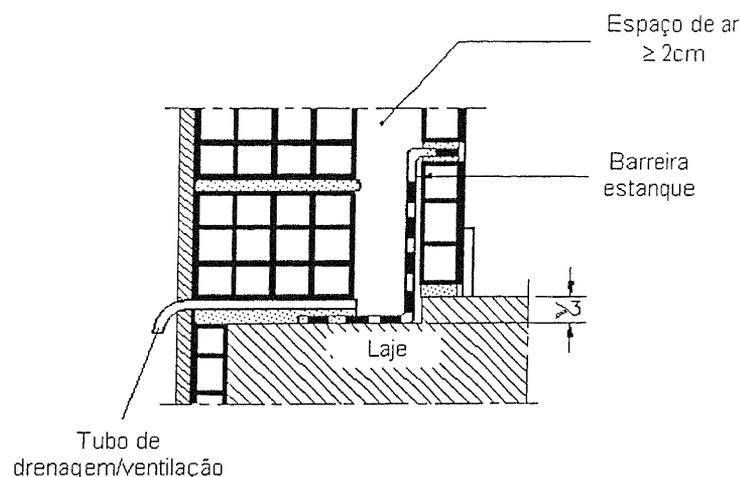


Figura 5.5 – Exemplos de orifícios de drenagem/ventilação de espaços de ar de paredes duplas com reboco exterior [39]

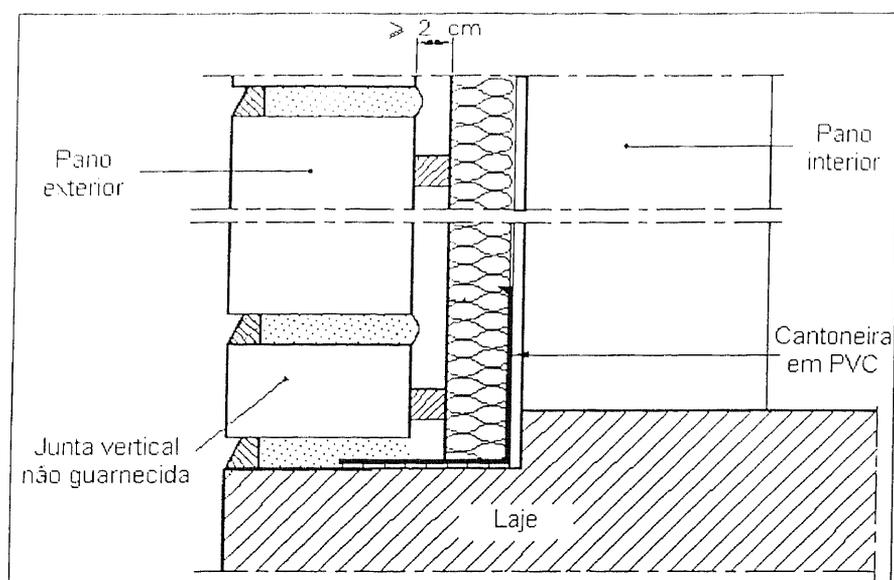


Figura 5.6 – Exemplos de orifícios de drenagem/ventilação de espaços de ar de paredes duplas com o pano exterior em tijolo à vista [39]

A BSI [17] apresenta valores ligeiramente diferentes para este tipo de orifícios de ventilação, referindo que a sua secção deverá ser de, pelo menos, 500 mm^2 por metro de desenvolvimento da parede, e a sua menor dimensão não deverá ser inferior a 10 mm, o que equivale a ter tubos com 20 mm de diâmetro interior espaçados de 0,6 m ou com 30 mm de diâmetro interior e espaçados de 1,4 m.

Refira-se que as situações mais correntes de paredes duplas entre nós, normalmente, não apresentam problemas de condensações internas.

5.2.2 PAREDES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

5.2.2.1 PAREDES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR E REVESTIMENTO POR PLACAGEM

Este tipo de paredes deve incluir um espaço de ar ventilado entre a camada de isolamento e o revestimento exterior, uma vez que este revestimento é normalmente pouco permeável ao vapor de água. Este espaço de ar deverá permitir a evacuação da humidade que possa surgir por eventual infiltração através do revestimento exterior ou de eventuais condensações que ocorram no seio do elemento construtivo. Para que estes pressupostos sejam garantidos, o espaço de ar deverá ter uma espessura mínima de 2 cm, mesmo nas zonas mais estranguladas, e a sua ventilação deverá ser assegurada por aberturas na base e topo da fachada, cujas secções deverão estar de acordo com a expressão (5.5), que se apresenta de seguida [49].

$$S = \left(\frac{H}{3} \right)^{0.4} \times 50 \quad (5.5)$$

em que:

S: secção de cada uma das aberturas de ventilação, expressa em cm² por cada metro de largura da fachada.

H: Altura do espaço de ar a ventilar, expressa em metros.

o que corresponde a:

50 cm²/m para uma altura não superior a 3 m;

65 cm²/m para uma altura de 3 m a 6 m;

80 cm²/m para uma altura de 6 m a 10 m;

100 cm²/m para uma altura de 10 m a 18 m.

Nos casos em que o sistema de revestimento seja permeável ao ar (por exemplo devido à existência de juntas abertas), estas secções poderão ser reduzidas.

Para alturas superiores a 18 m convém proceder ao fraccionamento do espaço de ar, por forma a evitar velocidades excessivas de circulação de ar. Contudo, admite-se que para fachadas cujo revestimento exterior seja bastante permeável ao ar ou que apresentem aberturas de ventilação reduzidas, não se efectue esse fraccionamento [24].

As regras de ventilação apresentadas anteriormente resultam da seguinte condição [15]:

$$\frac{Q}{H} > \frac{P_i - P_s(\theta_0)}{W_s(\theta_0) - W_e} \times (Pe)_i \quad (5.6)$$

em que:

Q: Caudal de ventilação do espaço de ar - [m³/h]

H: Altura do espaço de ar a ventilar - [m]

P_i: Pressão parcial de vapor de água do ambiente interior - [mmHg]

P_s(θ₀): Pressão de saturação na face interior da camada exterior de parede (face em contacto com o espaço de ar ventilado) - [mmHg]

$W_s(\theta_0)$: Teor de humidade de saturação na face interior da camada exterior de parede (face em contacto com o espaço de ar ventilado) – [g/m³]

W_e : Teor de humidade do ambiente exterior – [g/m³]

$(Pe)_i$: Permeância ao vapor acumulada das camadas situadas pelo interior do espaço de ar ventilado – [g/(m²·h·mmHg)]

Por seu lado, o caudal de ventilação é dado pela expressão [15]:

$$Q = 0,005 \cdot S \cdot (\Delta T \times H)^{0,6} \quad (5.7)$$

em que:

S: Secção de cada uma das aberturas de ventilação, expressa em cm² por cada metro de largura da fachada

ΔT : Diferença de temperatura entre a face interior da camada exterior de parede (face em contacto com o espaço de ar ventilado) e o ambiente exterior – [°C]

Conjugando as duas expressões anteriores resulta [15]:

$$S > 200 \times \frac{H^{0,4}}{\Delta T^{0,6}} \times \frac{P_i - P_s(\theta_0)}{W_s(\theta_0) - W_e} \times (Pe)_i \quad (5.8)$$

Para fachadas leves que incorporam uma camada de isolamento térmico e um espaço de ar ventilado que assegura a evacuação do vapor de água essencialmente por tiragem térmica, é possível determinar a secção das aberturas de ventilação através das expressões anteriores. De acordo com Berthier [15], para as alturas correntes de pisos de habitação essa secção pode ser aproximadamente determinada através da expressão:

$$S > 800 \times (Pe)_i \quad (5.9)$$

Contudo, uma secção mínima de 10 cm²/m é indispensável para um bom funcionamento da ventilação do espaço de ar, exigindo também que a permeância acumulada das camadas interiores ao espaço de ar seja inferior a 0,015 g/(m²·h·mmHg) = 31×10⁻¹² kg/(m²·s·Pa).

5.2.2.2 PAREDES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR E REVESTIMENTO DELGADO

Se o sistema de isolamento térmico pelo exterior da parede apresentar um revestimento exterior delgado, aplicado directamente sobre o isolamento térmico, a permeância do revestimento

deverá ser, pelo menos, 50 vezes superior ao coeficiente de permeabilidade ao vapor (π) da camada de isolamento térmico [15]:

$$\frac{(P_e)_{\text{revestimento exterior}}}{(\pi)_{\text{isolamento térmico}}} \geq 50 \text{ m}^{-1} \quad (5.10)$$

Como se percebe pela expressão anterior, nestas situações é vantajoso utilizar materiais de isolamento pouco permeáveis ao vapor, como por exemplo o poliestireno extrudido (ver Anexo II). Contudo, devido a outras exigências funcionais, o material mais utilizado é o poliestireno expandido, que, sendo mais permeável ao vapor, obriga à utilização de revestimentos exteriores mais permeáveis. Refira-se que esta exigência é de difícil compatibilização com as exigências de impermeabilização à água líquida proveniente do exterior, nomeadamente a água da chuva. Em alternativa, pode também equacionar-se a aplicação de uma barreira pára-vapor pelo interior da camada de isolamento térmico.

Refira-se que a DIN 4108 [51], de acordo com Couasnet [49], recomenda que em paredes de alvenaria com este sistema de isolamento, o revestimento exterior deverá apresentar uma espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) tal que:

$$S_d \leq 4 \text{ m} \Leftrightarrow P_e \geq 49 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

5.2.3 PAREDES COM ISOLAMENTO PELO INTERIOR

As paredes com isolamento pelo interior deverão respeitar as mesmas regras que as paredes duplas, já apresentadas no § 5.2.1. Nestes casos não há o risco de ocorrência de condensações na face interior do isolamento, uma vez que a resistência térmica das camadas interiores a esse isolamento (R_{TP}) é normalmente muito baixa.

Segundo Couasnet [49], a DIN 4108 [51] recomenda que, nas paredes de alvenaria ou betão com isolamento pelo interior, o conjunto formado pela camada de isolamento e pelo revestimento interior deverá ter uma espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) tal que:

$$S_d \geq 0,50 \text{ m} \Leftrightarrow P_e \leq 390 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

Estas paredes são particularmente preocupantes nas situações em que o suporte é pouco permeável ao vapor, como por exemplo uma parede de betão ou de alvenaria de granito, e a camada de isolamento térmico é bastante permeável ao vapor, como é o caso da lã mineral.

5.3 REGRAS DE CONCEPÇÃO DE COBERTURAS

5.3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Na bibliografia estrangeira, nomeadamente de origem francesa, belga, britânica e alemã, existe um vasto número de regras de concepção de coberturas face à difusão de vapor, em particular para coberturas em desvão ventilado e coberturas inclinadas (coberturas em que a própria vertente constitui o tecto dos compartimentos interiores, pelo que a camada de isolamento térmico é aplicada na vertente e não na esteira).

Por forma a dar uma ideia o mais completa possível do estado de conhecimento deste tema nesses países, em seguida apresentam-se as regras BSI, DIN, CSTB e CSTC, seguindo a terminologia indicada nos textos consultados.

Refira-se que os cuidados na aplicação de eventuais barreiras pára-vapor são particularmente importantes nas coberturas, uma vez que é mais frequente a existência de zonas de atravessamento de tubagens ou outros pontos singulares que necessitam de uma selagem cuidada.

Os eventuais vãos abertos nas coberturas deverão ficar afastados das áreas de maior produção de vapor, deverão ser bem selados e o seu sistema de fecho deverá garantir estanquidade ao ar adequada. Além disso, nas soluções em que se prevê a existência de espaços de ar ventilados, as aberturas de passagem de ar nunca deverão estar exclusivamente localizadas no topo da cobertura, pois as depressões que daí resultariam dariam origem a um aumento do fluxo de vapor de água para a cobertura.

Nas coberturas em que a estrutura de suporte do revestimento é à base de madeira e/ou derivados, a sua durabilidade deverá ser adequada, eventualmente por recurso a tratamentos de preservação, em particular nas soluções em que os riscos de ocorrência de condensações internas são mais elevados.

5.3.2 COBERTURAS EM TERRAÇO

5.3.2.1 TERRAÇOS TRADICIONAIS

As coberturas em terraço do tipo tradicional, em que a camada de impermeabilização é colocada sobre a camada de isolamento térmico (Figura 5.2), normalmente obrigam à colocação de uma barreira pára-vapor sob a camada de isolamento, na medida em que os produtos de impermeabilização são normalmente bastante resistentes à difusão de vapor de água e estão colocados em contacto com o ambiente exterior, sendo elevados os riscos de ocorrência de condensações no Inverno, em que o fluxo de difusão se verifica no sentido ascendente. Uma tal

barreira pára-vapor deverá ter uma permeância inferior a $0,001 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$ [15], que equivale a $2,1 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

No entanto, existem situações em que, segundo Berthier [15], se poderá evitar a aplicação de qualquer barreira pára-vapor, desde que o volume de condensações se mantenha em valores que não comprometam o desempenho da cobertura, em particular da camada de isolamento térmico, o que corresponderá a um limite de $e \times 200 \text{ g}/\text{m}^2$, sendo e a espessura da camada de isolamento, em cm. As referidas situações são:

- As coberturas em que a camada de forma se situa entre o isolamento térmico e a camada de impermeabilização (Figura 5.2);
- As coberturas em que, apesar de a impermeabilização se encontrar directamente aplicada sobre a camada de isolamento térmico, a permeância ao vapor dessa camada não ultrapassa os $e \times 0,004 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ (sendo e a sua espessura, em cm) e não existe qualquer camada que impeça a normal absorção capilar de humidade por parte do suporte.

As recomendações do CSTC [45] também apontam neste sentido, conforme se pode constatar pelo Quadro 5.2, cuja consulta deverá ser efectuada atendendo aos seguintes aspectos:

- A designação dos diferentes componentes segue a terminologia que se apresenta mais à frente no § 5.3.3.5.2.
- Se a composição da cobertura inclui um tecto falso, é necessário garantir que a espessura da camada de isolamento térmico é suficiente para evitar a formação de condensações superficiais na estrutura de suporte;
- Nos casos em que o revestimento de estanquidade é aplicado sobre espuma de poliuretano (PUR) ou de polisocianurato (PIR), o material isolante deve ser revestido com uma tela de fibra de vidro com betume em ambas as faces. A massa volúmica da espuma não deverá ser inferior a $32 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- A camada de forma não é realizada em betão leve;
- Se a estrutura de suporte for constituída por painéis derivados de madeira, a sua constituição deverá ser adequada para este fim.

Quadro 5.2 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas em terraço tradicionais

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento de estanquidade 2- Estrutura de suporte 3- Isolamento térmico 4- Eventual acabamento interior E- Barreira pára-vapor, se necessária	Tipo de estrutura de suporte	Material de isolamento térmico O: significa que a cobertura não inclui camada de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior.		
			I	II	III
	T4	O	N	N	N
	T1	K-MW-S-FF-P CG	E3 N	E3 N	E3 N
	T2-T3-T4	K-MW-FF-P S CG	E3 N N	E3 N N	E3 N N
	T1-T2-T3-T4	K-MW-S-FF-P CG	E2 N	E2 N	E2 N
	T5-T6	K-MW-FF-P S CG	N N N	E2 N N	E2 E2 N
	T7	K-MW-FF-P S CG	N N N	E2 N N	E2 N N
	estrutura de suporte combinada T5 ou T6	MW-S-PSE	N	N	N ⁽¹⁾

(1) Para edifícios da classe de higrometria III (higrometria forte), a resistência à difusão de vapor de água do pano interior do painel sandwich deve satisfazer as exigências da classe E2 das barreiras pára-vapor (ver § 3.4).

5.3.2.2 COBERTURAS EM TERRAÇO INVERTIDAS

Nas coberturas em terraço do tipo invertida, a colocação da camada de impermeabilização sob a camada de isolamento elimina os riscos de ocorrência de condensações internas, na medida em que a impermeabilização funciona como pára-vapor colocado do “lado quente” do elemento construtivo.

Refira-se contudo que existem situações especiais que deverão ser analisadas com maior precaução, em particular em elementos sujeitos a elevados gradientes de pressão de vapor de água, como acontece nos edifícios de muito forte higrometria. Estas situações mais problemáticas correspondem a casos em que a camada de forma aplicada sob a impermeabilização apresenta espessuras elevadas. De facto, a elevada resistência térmica que normalmente caracteriza estas camadas e o facto de serem aplicadas sob a camada de impermeabilização, correspondem a situações idênticas às de barreiras pára-vapor situadas pelo exterior das camadas de isolamento térmico, ou seja, no “lado frio” do elemento construtivo.

5.3.3 COBERTURAS NÃO PLANAS

5.3.3.1 GENERALIDADES

Tal como foi referido anteriormente, para as coberturas em desvão ventilado e coberturas inclinadas existem várias regras na bibliografia francesa, britânica e alemã que indicam os valores mínimos das respectivas secções de ventilação. Em primeiro lugar são apresentadas as regras da BS 5250 [17] e da DIN 4108 [51], de fácil utilização, e depois as regras do CSTB, mais elaboradas e com diferenças entre as coberturas com diferentes tipos de revestimento.

Nas coberturas com espaços de ar ventilados, as aberturas de ventilação deverão ser realizadas de forma o mais contínua possível, ao longo dos beirados ou beirais e das cumeeiras. A dimensão mínima dos orifícios de passagem de ar não deverá ser inferior a 1 cm e se for superior a 2 cm este deverá ser protegido com uma rede, conforme foi já referido no § 5.1.3.3.

Finalmente, apresentam-se as regras do CSTC elaboradas para coberturas inclinadas, mas que podem ser facilmente adaptadas a coberturas em desvão. Estas regras não indicam critérios de ventilação de espaços de ar das coberturas, mas sim as características de permeabilidade ao vapor recomendáveis para os seus componentes, nomeadamente os que se situam pelo interior das camadas de isolamento térmico, indicando também a necessidade ou não de aplicação de barreiras pára-vapor e respectivas classes mínimas de permeância ao vapor.

5.3.3.2 REGRAS DIN

Segundo Couasnet [49], a DIN 4108 [51] separa as coberturas não planas em dois grupos, consoante a sua inclinação é ou não inferior a 10° .

Nas coberturas com inclinação inferior a 10° (Figura 5.7), a norma apenas prevê a realização de aberturas de ventilação ao longo do seu perímetro, colocando as seguintes exigências:

- A relação entre a secção das aberturas de ventilação e a superfície total da cobertura deverá ser igual a $2/1000$;
- A espessura do espaço de ar ventilado não deverá ser inferior a 5 cm;
- A espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) das camadas situadas pelo interior do espaço de ar ventilado, no seu conjunto, deverá ser tal que:

$$S_d \geq 10 \text{ m} \Leftrightarrow P_e \leq 20 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$



Figura 5.7 – Princípio de ventilação de coberturas com inclinação inferior a 10° , segundo a DIN 4108 [51]

Nas coberturas com inclinação igual ou superior a 10° , apenas previstas nas soluções de cobertura inclinada (Figura 5.8), devem respeitar-se os seguintes aspectos:

- A secção das entradas de ar, a realizar na base das vertentes, deverá ser igual a, pelo menos, $2/1000$ da área da cobertura inclinada, com o mínimo de 200 cm^2 por metro de desenvolvimento;
- A relação entre a secção total das aberturas de ventilação e a superfície da cobertura deverá ser igual a $0,5/1000$, pelo menos;
- A espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) das camadas situadas pelo interior do espaço de ar ventilado, no seu conjunto, deverá respeitar os seguintes valores, em função da largura (L) da vertente:

$$S_d \geq 2 \text{ m} \Leftrightarrow P_e \leq 98 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}), \text{ para } L \leq 10 \text{ m}$$

$$S_d \geq 5 \text{ m} \Leftrightarrow P_e \leq 39 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}), \text{ para } L \leq 15 \text{ m}$$

$$S_d \geq 10 \text{ m} \Leftrightarrow P_e \leq 20 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}), \text{ para } L > 15 \text{ m}$$

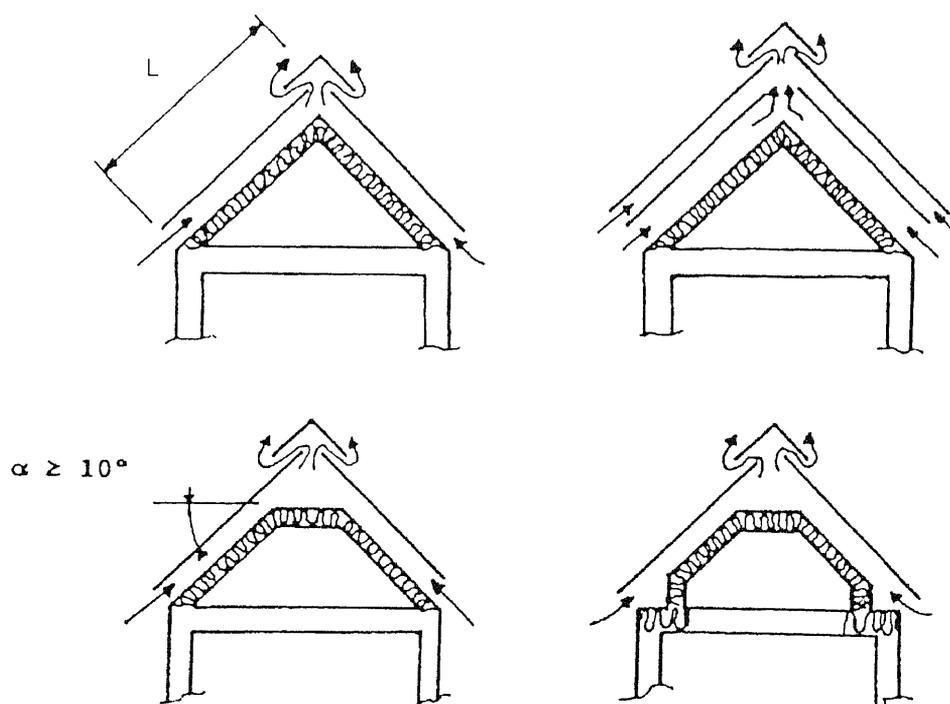


Figura 5.8 – Princípio de ventilação de coberturas com inclinação igual ou superior a 10° , segundo a DIN 4108 [51]

5.3.3.3 REGRAS BSI

5.3.3.3.1 Coberturas em Desvão Ventilado

Nas coberturas em desvão consideradas na BSI (Figura 5.9) os riscos de ocorrência de condensações internas são reduzidos, desde que se garanta a adequada ventilação do desvão.

As aberturas de ventilação do desvão são normalmente realizadas ao nível da base das coberturas (beirais e beirados), em lados opostos do edifício. Em função da inclinação dos telhados, as aberturas de ventilação deverão ter uma secção mínima equivalente aos seguintes valores (Figura 5.10):

- 25 mm × Comprimento (C) da vertente, para telhados com inclinação inferior ou igual a 15° ;
- 10 mm × Comprimento (C) da vertente, para telhados com inclinação superior a 15° .

Para melhorar a ventilação do desvão é possível criar aberturas de extracção de ar no topo do telhado (cumeeira ...), com uma secção equivalente a 5 mm × Comprimento da cobertura, o que é

particularmente recomendado para telhados com inclinação igual ou superior a 35° ou com vertentes de largura superior a 10 m.

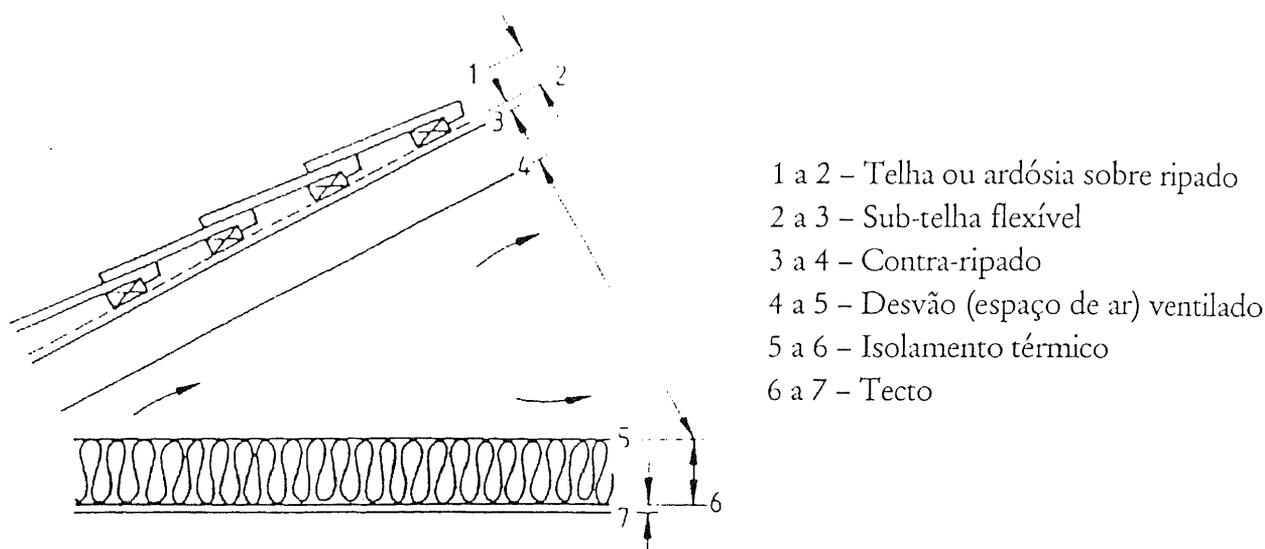


Figura 5.9 - Constituição das coberturas em desvão consideradas pela BSI [17]

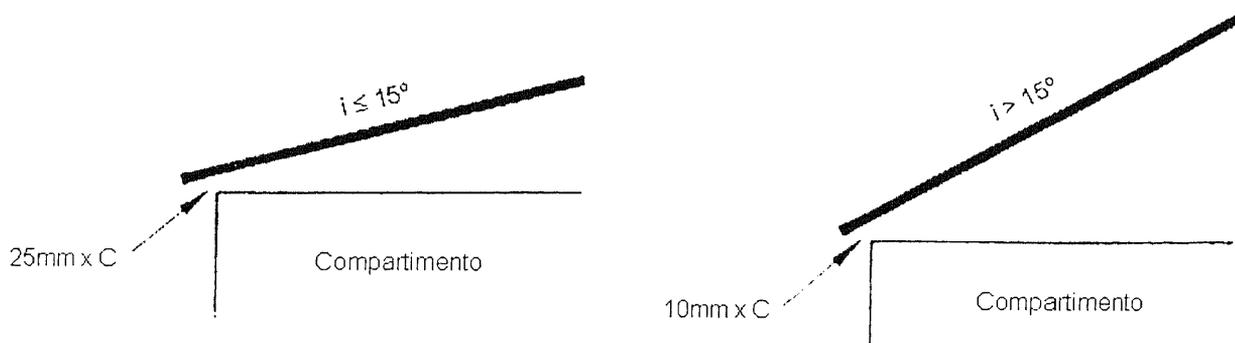


Figura 5.10 - Secção equivalente das aberturas de ventilação em coberturas em desvão com mais de uma vertente, segundo a BSI [17]

Para coberturas sem beirais ou beirados opostos, como é o caso das coberturas com apenas uma água (ou vertente), para além das aberturas de admissão de ar na base da cobertura, com as secções indicadas anteriormente para as coberturas com mais de uma vertente, é necessário criar aberturas de extracção de ar no topo do telhado (Figura 5.11), com uma secção equivalente a $5 \text{ mm} \times \text{Comprimento da vertente (C)}$.

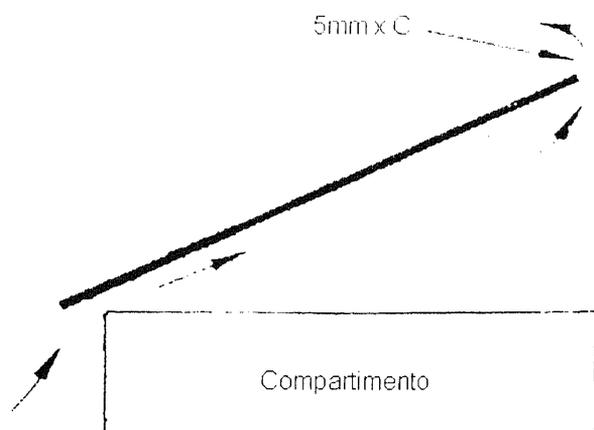
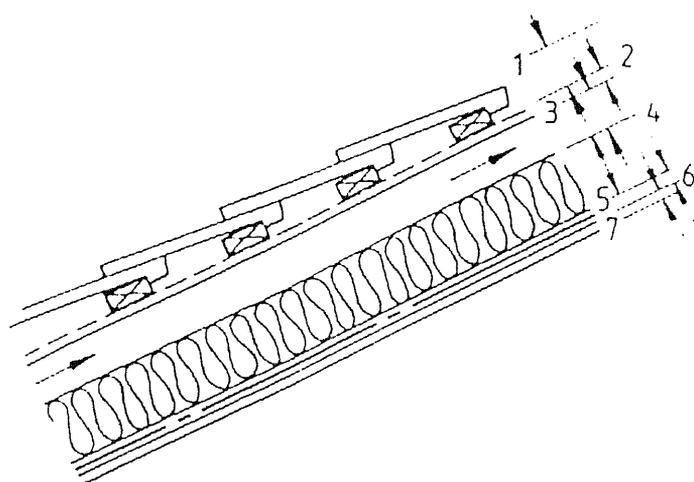


Figura 5.11 – Seção equivalente das aberturas de extração de ar em coberturas em desvão com apenas uma vertente, segundo a BSI [17]

5.3.3.3.2 Coberturas Inclinadas

Nas coberturas inclinadas consideradas na BSI (Figura 5.12) os riscos de ocorrência de condensações são elevados, ocorrendo normalmente na face inferior da sub-telha. Por esta razão, recomenda a aplicação de uma barreira pára-vapor com uma permeância não superior a cerca de $4 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, pelo interior da camada de isolamento térmico, e a ventilação do espaço de ar entre o isolamento e o sub-telha.



- 1 a 2 – Telha ou ardósia sobre ripado
- 2 a 3 – Sub-telha flexível
- 3 a 4 – Espaço de ar ventilado entre o Contra-ripado
- 4 a 5 – Isolamento térmico
- 5 a 6 – Barreira pára-vapor
- 6 a 7 – Tecto

Figura 5.12 – Constituição das coberturas inclinadas consideradas pela BSI [17]

O espaço de ar ventilado deverá ter uma espessura de, pelo menos, 5 cm e as aberturas de ventilação deverão ter uma secção mínima equivalente aos seguintes valores (Figura 5.13):

- 25 mm × Comprimento (C) da vertente, nas aberturas de admissão de ar a praticar na base do telhado;
- 5 mm × Comprimento (C) da vertente, nas aberturas de exaustão de ar a praticar na cumeeira. Caso não seja possível realizar as aberturas na cumeeira, para cada uma das vertentes principais devem ser criadas aberturas de exaustão no seu topo, com esta secção.

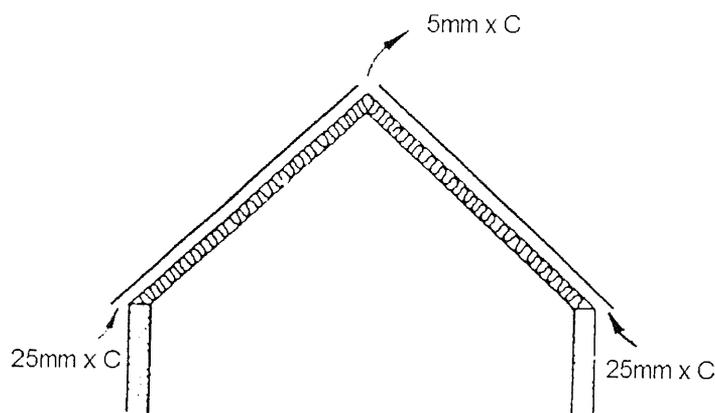


Figura 5.13 – Secção equivalente das aberturas de ventilação em coberturas inclinadas, segundo a BSI [17]

Caso exista algum obstáculo que impeça a normal circulação de ar entre as aberturas de admissão e de exaustão, deve ventilar-se separadamente cada uma das parcelas (Figura 5.14), abaixo e acima do obstáculo, de acordo com os critérios definidos anteriormente.

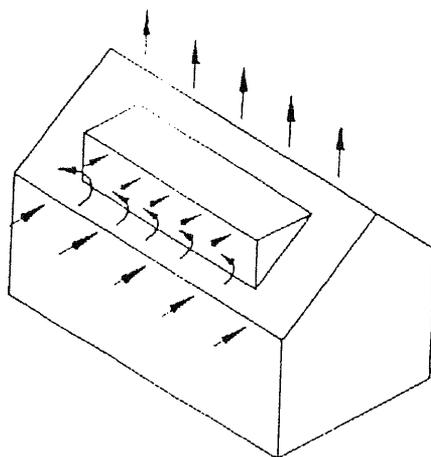


Figura 5.14 – Ventilação de coberturas inclinadas por troços [17]

Para coberturas cuja camada de isolamento térmico apresente elevada resistência à difusão de vapor, eventualmente associada a uma barreira pára-vapor, a BSI [17] admite a possibilidade de não ventilar o espaço de ar, desde que devidamente justificado por simulação.

5.3.3.4 REGRAS DO CSTB

5.3.3.4.1 Aspectos Gerais

As regras de concepção apresentadas pelo CSTB fornecem, de um modo geral, os limites que devem ser respeitados pelas camadas interiores das coberturas no que toca às suas características de permeabilidade ao vapor de água, e/ou os valores mínimos da secção (S) dos orifícios de ventilação das coberturas (Figura 5.15), nomeadamente as coberturas em desvão e as coberturas inclinadas, para as quais se apresenta um vasto número de recomendações. Refira-se, no entanto, que estas recomendações geralmente são apenas válidas para coberturas de edifícios com higrometria fraca ou média $\left(\frac{\omega}{n \cdot V} \leq 5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3\right)$, não localizados em regiões com clima de montanha, que normalmente correspondem às zonas de altitude superior a 900 m.

Para as coberturas em desvão ou inclinadas, existem soluções em que, devido à existência de um ecrã de estanquidade complementar, é exigida a ventilação do espaço compreendido entre o ecrã e o revestimento exterior da cobertura (S1) e entre o ecrã e a camada de isolamento térmico (S2), como se representa esquematicamente na Figura 5.16. Refira-se que, em qualquer dos casos, a espessura dos espaços de ar ventilados não deverá ser inferior a 2 cm, existindo alguns tipos de coberturas em que a espessura mínima exigida para esses espaços é superior. Ao determinar a espessura dos espaços de ar que deve ser assegurada na execução da obra, é importante ter em consideração as eventuais deformações e variações dimensionais da camada de isolamento térmico.

As secções de ventilação anteriormente mencionadas são apresentadas na forma de uma relação entre a área total dos orifícios de ventilação (a repartir igualmente entre aberturas de admissão e aberturas de exaustão) e a área da cobertura limitada pelos compartimentos cobertos (os beirais, beirados e remates laterais não são contabilizados). Em alguns casos, a área da cobertura é determinada pela projecção horizontal (A) e noutros pela área do tecto da cobertura¹² (A').

¹² O tecto da cobertura corresponde às camadas situadas entre o(s) compartimento(s) coberto(s) e o espaço de ar a ventilar, incluindo a camada de isolamento térmico e eventual barreira pára-vapor. Nas coberturas em desvão ventilado o tecto corresponde à esteira, enquanto que nas coberturas inclinadas é materializado pela(s) vertente(s).

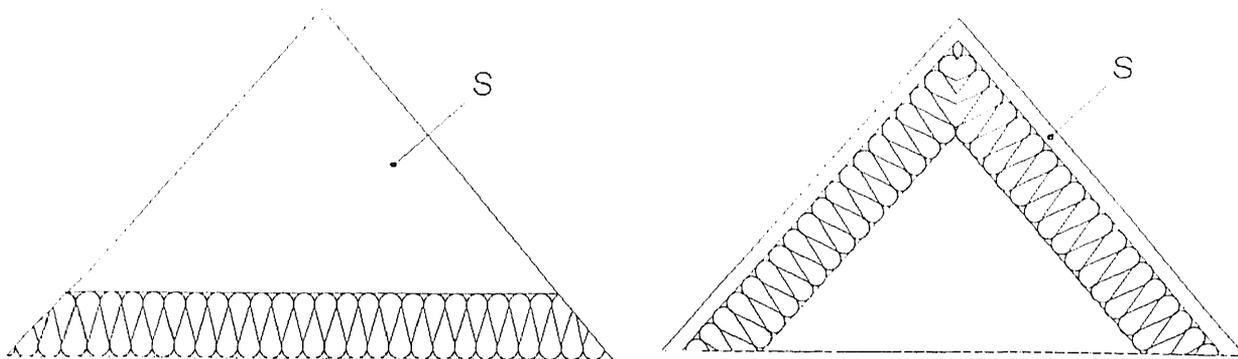


Figura 5.15 – Secção de ventilação de coberturas em desvão e coberturas inclinadas, sem ecrã de estanquidade complementar [42]

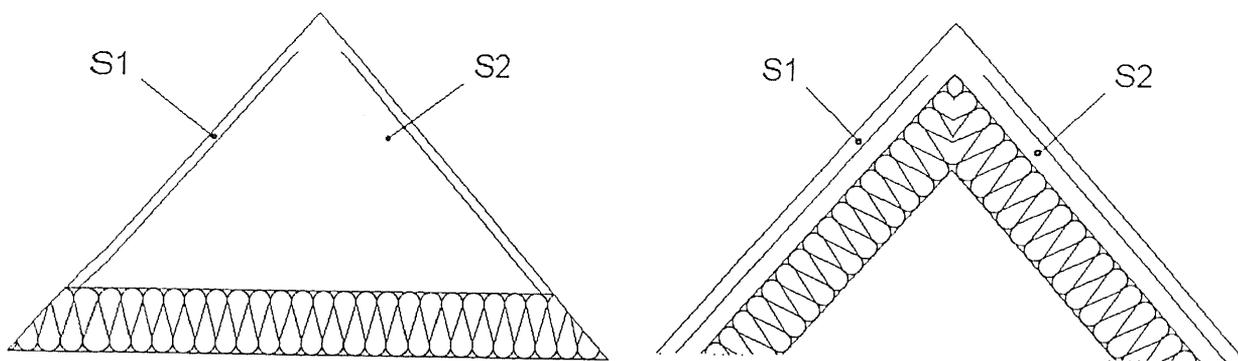


Figura 5.16 – Secções de ventilação de coberturas em desvão e coberturas inclinadas, com ecrã de estanquidade [42]

Tal como acontece com as regras de ventilação das paredes (ver § 5.2.2.1), Berthier [15] apresenta as fórmulas que permitem a determinação aproximada das secções de ventilação. Assim, o caudal de ventilação Q (em m^3/h , por cada metro de desenvolvimento da cobertura) é dado por:

$$Q = 0,2 \cdot \sigma \cdot \Delta P^{0,6} \quad (5.11)$$

em que:

- Q : Caudal de ventilação por cada metro de desenvolvimento da cobertura – [m^3/h]
- σ : Secção das entradas de ar (admitindo que a secção das aberturas de saída de ar é igual) por cada metro de desenvolvimento da cobertura – [cm^2]
- ΔP : Diferença de pressão parcial de vapor de água entre o ar exterior e o espaço de ar a ventilar – [Pa]

Atendendo à aleatoriedade dos ventos e ao pequeno caudal que se consegue por tiragem térmica, devido às pequenas diferenças de temperatura entre o ambiente exterior e o espaço de ar a ventilar,

pode-se considerar que uma diferença de pressão de 0,3 Pa é, grosso modo, frequente na estação fria (em que o problema das condensações se coloca), pelo que o caudal de ventilação corresponde a:

$$Q = 0,1 \cdot \sigma \quad (5.12)$$

Por seu lado, a secção total das aberturas de ventilação (a repartir igualmente entre as aberturas de admissão de ar e as aberturas de exaustão) pode-se determinar através da expressão:

$$\frac{S}{A} = 0,0055 \cdot (Pe)_i \cdot \left(1,4 \frac{\omega}{n \cdot V} + 0,2 \right) \quad (5.13)$$

em que:

S: Secção total das aberturas de ventilação – [m²]

A: Área do tecto da cobertura – [m²]

(Pe)_i: Permeância ao vapor acumulada das camadas situadas pelo interior do espaço de ar ventilado – [g/(m²·h·mmHg)]

$\frac{\omega}{n \cdot V}$: Higrometria do local subjacente – [kg/m³]

Para alguns tipos de coberturas com revestimento em chapas metálicas, é prevista a utilização de produtos designados como “reguladores de condensação” [43], aplicados na face inferior das chapas.

O princípio de funcionamento destes produtos assenta no seu comportamento higroscópico, já explicado no § 2.2.5.4.3. Assim, têm capacidade para absorver uma determinada quantidade de humidade de condensação, que é restituída ao ambiente logo que as condições climáticas o permitem. Isto implica que estes produtos estejam em contacto com uma lâmina ou volume de ar ventilado, em contacto com uma atmosfera despoluída, sem emanação de poeiras, vapores, gases corrosivos, etc., que comprometam o seu comportamento a longo prazo.

Na escolha deste tipo de produtos é necessário atender, não só à sua capacidade de armazenamento de humidade e à rapidez com que se dão as trocas de humidade com o ambiente, mas também à sua compatibilidade com os materiais e ambientes com que estará em contacto e às condições de exploração dos espaços adjacentes, de forma a não comprometer a durabilidade do seu comportamento.

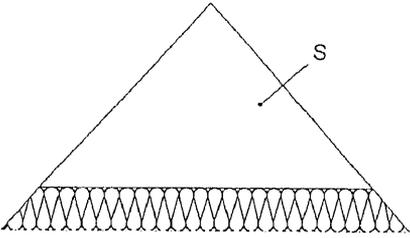
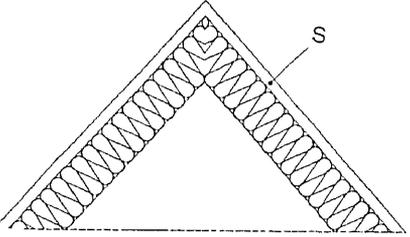
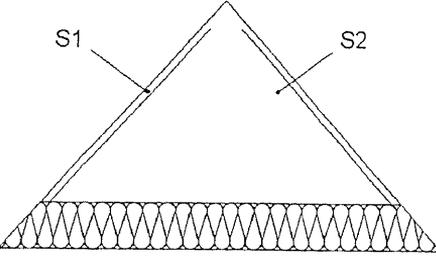
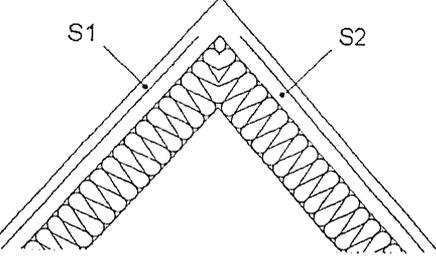
Por último, refira-se que algumas recomendações apresentadas são questionáveis, como é o caso de algumas coberturas com revestimentos metálicos, uma vez que para constituições idênticas, do ponto de vista do seu comportamento face à difusão de vapor de água, são feitas recomendações bastante distintas, nomeadamente nas secções de ventilação de espaços de ar, na sua localização, etc..

5.3.3.4.2 Regras Básicas Comuns aos Diferentes Tipos de Coberturas

Face ao vasto leque de recomendações construtivas que são apresentadas na bibliografia do CSTB para a concepção de coberturas não planas, optou-se por compilar um conjunto de regras mais ou menos comuns aos diferentes tipos de coberturas, referindo-se apenas as diferenças mais significativas em capítulos próprios. Recomenda-se, contudo, a consulta dos documentos específicos de um dado tipo de cobertura, para que se possam atender aos diferentes princípios de concepção aí referidos.

No Quadro 5.3 encontram-se os valores mínimos recomendados em algumas publicações do CSTB para as secções dos orifícios de ventilação de coberturas não planas.

Quadro 5.3 – Secção total mínima dos orifícios de ventilação de coberturas não planas, segundo o CSTB

Tipo de Cobertura	Secção de Ventilação
	$\frac{S}{A} \geq \frac{1}{5000}$
	$\frac{S}{A} \geq \frac{1}{3000}$
	$\frac{S1}{A} \geq \frac{1}{5000}$ $\frac{S2}{A} \geq \frac{1}{3000}$
	$\frac{S1}{A} \geq \frac{1}{5000}$ $\frac{S2}{A} \geq \frac{1}{3000}$

A espessura dos espaços de ar ventilados não deverá ser inferior a 2 cm em nenhum ponto, tendo em conta as eventuais deformações e variações dimensionais da camada de isolamento. Em alguns casos, para coberturas inclinadas ou com estrutura de suporte contínua, a espessura mínima recomendada é igual a 4 ou 6 cm, consoante a largura da vertente é ou não inferior a 12 m, respectivamente.

As aberturas de extracção de ar das coberturas podem ser realizadas no topo das paredes de empena (Figura 5.17), desde que estas não distem entre si mais de 12 m. Em alguns documentos, este limite é ligeiramente diferente.

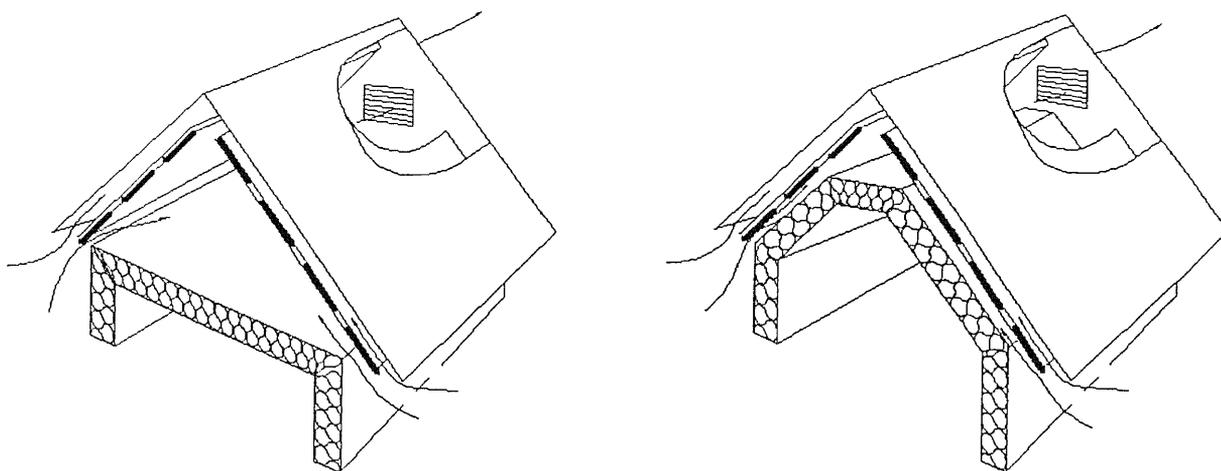


Figura 5.17 – Aberturas de extracção de ar para ventilação de coberturas aplicadas em paredes de empena [42]

5.3.3.4.3 Aspectos Complementares para Coberturas com Revestimento em Telha Cerâmica

Nas coberturas com revestimento em telha canudo, o espaço de ar sob a face inferior das telhas, quando colocadas normalmente, é suficiente para garantir a sua adequada ventilação, desde que não existam obstáculos à normal circulação de ar, como por exemplo devido à fixação com argamassa de um elevado número de telhas. É no entanto exigido que a permeância do tecto da cobertura¹² não ultrapasse $0,3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) = 625 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Além disso, nas coberturas com estrutura de suporte contínua, essa espessura mínima deverá ser de 4 cm [31].

5.3.3.4.4 Aspectos Complementares para Coberturas com Revestimento em Telha de Betão

Telha de encaixe:

Neste tipo de coberturas, e para vertentes com mais de 8 m de largura (medida entre a base e topo da vertente, na área limitada pelos compartimentos cobertos), as perdas de carga do caudal de ventilação são consideráveis, pelo que se deverá optar por uma das seguintes soluções ([29] e [32]):

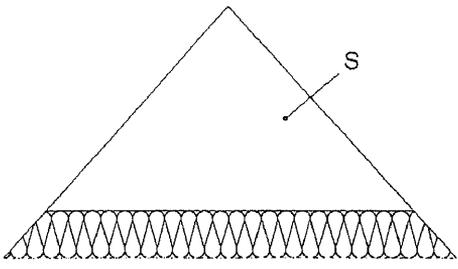
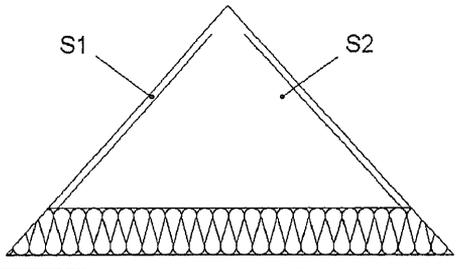
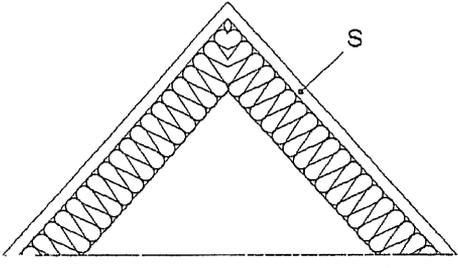
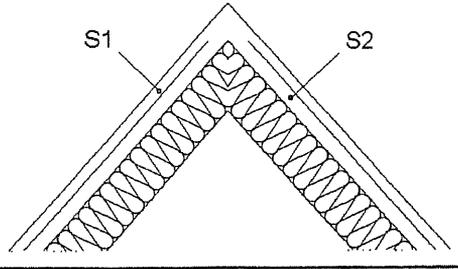
- Aumentar a espessura mínima do espaço de ar para um valor superior aos 2 cm que são exigidos nos casos correntes;
- Criar aberturas de ventilação complementares, sensivelmente a meio da vertente.

Telha plana:

No Quadro 5.4 encontram-se os valores mínimos recomendados pelo DTU 40.25 [25] para as secções dos orifícios de ventilação de coberturas com revestimento em telha de betão plana, em função da permeância (P) do tecto da cobertura¹² e do clima característico do local.

Relativamente ao Quadro 5.4, refira-se que, em França, as zonas muito frias correspondem a zonas em que a temperatura de base para os cálculos das necessidades de aquecimento dos edifícios, de acordo com a respectiva legislação, é inferior a -15 °C , ou os locais situados a mais de 600 m de altitude, numa zona climática com elevadas necessidades de aquecimento (como acontece com as zonas I₃, consideradas pelo RCCTE [93], para o território português).

Quadro 5.4 - Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A') do tecto da cobertura¹², previstas no DTU 40.25 [25] para coberturas com revestimento em telha plana de betão

Tipo de Cobertura	Permeância (P) do Tecto [g/(m ² ·h·mmHg)]		Secção de Ventilação	
	Locais em Geral	Zonas Muito Frias	Locais em Geral	Zonas Muito Frias
	$P \leq 0,3$		$\frac{S}{A'} \geq \frac{1}{5000}$	
	$P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$	$\frac{S1}{A'} \geq \frac{1}{5000}$	
			$\frac{S2}{A'} \geq \frac{1}{500}$	$\frac{S2}{A'} \geq \frac{1}{1200}$
	$P \leq 0,05$	$P \leq 0,02$	$\frac{S}{A'} \geq \frac{1}{1250}$	$\frac{S}{A'} \geq \frac{1}{3000}$
	$P \leq 0,02$		$\frac{S1}{A'} \geq \frac{1}{5000}$	
			$\frac{S2}{A'} \geq \frac{1}{1200}$	

5.3.3.4.5 Coberturas com Revestimento em “Telha Asfáltica”

Caso geral

Nas coberturas com revestimento em “telha asfáltica” (Figura 5.18), o valor mínimo da relação entre a secção total (S) das aberturas de ventilação e a área (A') do tecto da cobertura é de [30]:

$$\frac{S}{A'} \geq \frac{1}{500}$$

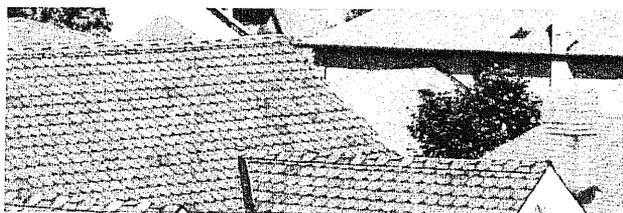


Figura 5.18 – Exemplos de coberturas com revestimento em “telha asfáltica”

Neste tipo de coberturas é extremamente importante assegurar a estanquidade ao ar do tecto¹².

Nas coberturas inclinadas, para além da secção dos orifícios de ventilação, é necessário respeitar as seguintes exigências [30]:

- A espessura do espaço de ar ventilado (a garantir entre a camada de isolamento térmico e o suporte do revestimento exterior) não deverá ser inferior a 4 cm, para vertentes com menos de 12 m de largura (medida entre a base e topo da vertente, na área limitada pelos compartimentos cobertos), ou a 6 cm, para vertentes de largura superior a 12 m;
- A permeância do tecto da cobertura¹² não deverá ser superior a 0,06 g/(m²·h·mmHg), (125 × 10⁻¹² kg/(m²·s·Pa)).

Coberturas situadas em região de montanha

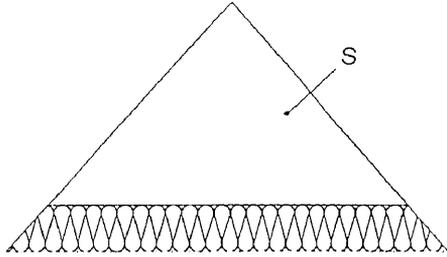
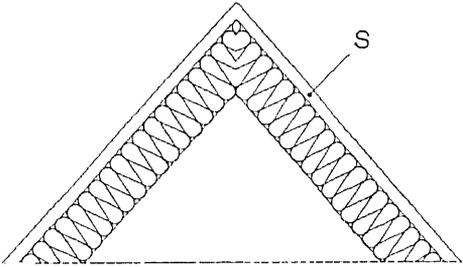
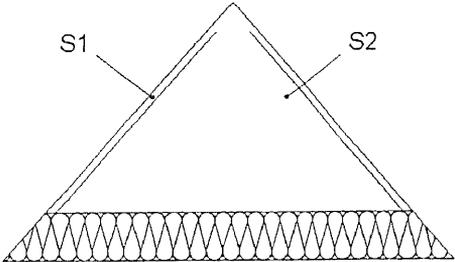
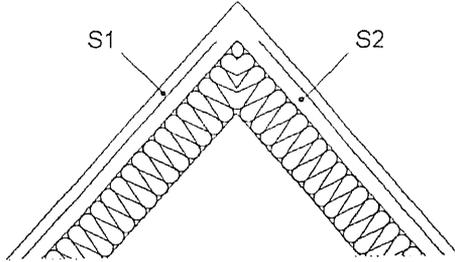
Para coberturas situadas a uma altitude superior a 900 m (válido para o território francês), ou expostas a um clima idêntico ao destas zonas, o DTU 40.14 [30] refere as seguintes exigências complementares relativamente às coberturas situadas noutras zonas:

- Pelo interior da camada de isolamento térmico da cobertura deverá ser colocada uma barreira pára-vapor com permeância não superior a 0,02 g/(m²·h·mmHg), que equivale

a $42 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, aplicada com os cuidados necessários para assegurar a continuidade da sua estanquidade ao ar;

- A espessura mínima dos espaços de ar ventilados deverá ser de 6 cm, em qualquer ponto;
- As secções de ventilação deverão respeitar os valores mínimos indicados no Quadro 5.5. Refira-se que as coberturas com ecrã de estanquidade complementar são designadas no documento como coberturas duplas com ventilação, enquanto que as restantes se designam por coberturas simples com ventilação.

Quadro 5.5 – Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A') do tecto da cobertura¹², segundo o CSTB [30], para coberturas com revestimento em “telha asfáltica” situadas em região de montanha

Tipo de Cobertura	Secção de Ventilação
	$\frac{S}{A'} \geq \frac{1}{250}$
	$\frac{S}{A'} \geq \frac{1}{250}$
	$\frac{S1}{A'} \geq \frac{1}{600}$ $\frac{S2}{A'} \geq \frac{1}{600}$
	$\frac{S1}{A'} \geq \frac{1}{600}$ $\frac{S2}{A'} \geq \frac{1}{600}$

5.3.3.4.6 Coberturas com Revestimento em Placas Metálicas Onduladas

Para as coberturas com revestimento em placas metálicas onduladas, o DTU 40.32 [22] apenas refere que o valor mínimo da relação entre a secção total (S) das aberturas de ventilação e a área (A) da cobertura é de:

$$\frac{S}{A} \geq \frac{1}{500}$$

5.3.3.4.7 Coberturas com Revestimento em Placas Nervuradas de Aço Revestido

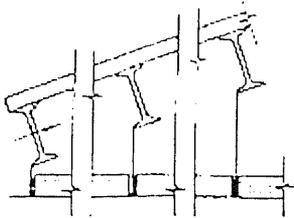
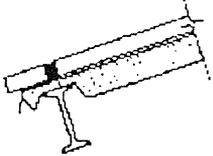
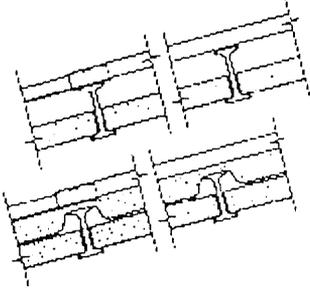
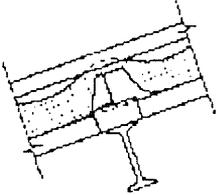
Para coberturas com este tipo de revestimento, o DTU 40.35 [43] considera diferentes situações em função do tipo de isolamento térmico previsto:

- Coberturas sem isolamento térmico;
- Coberturas com isolamento térmico aplicado sob as madres, isto é, sobre o tecto da cobertura¹²;
- Coberturas com isolamento térmico aplicado sobre as madres;
- Coberturas com isolamento térmico aplicado entre as madres, sem espaço de ar ou com espaço de ar não ventilado;
- Coberturas com revestimento em painéis sandwich, em que o isolamento térmico é aplicado entre duas placas paralelas.

Para qualquer destes tipos de coberturas, são por vezes utilizadas placas translúcidas, para entrada de luz, não sendo possível eliminar os riscos de condensações na face interior dessas placas.

No Quadro 5.6 encontram-se as constituições admitidas pelo DTU 40.35 [43] para coberturas com este tipo de revestimento e isoladas termicamente.

Quadro 5.6 – Tipologias admitidas pelo DTU 40.35 [43] para coberturas com revestimento em placas nervuradas de aço revestido, isoladas termicamente

Tipo de isolamento	Higrometria dos locais (ver § 2.2.4.3)	
	Fraca	Média
Sob as Madres ⁽¹⁾ 	Sim	Sim
Sobre as Madres 	Sim ⁽²⁾	Sim ⁽²⁾
Entre as Madres 	Sim	Não
Painéis Sandwich 	Sim	Sim

- (1) Necessita da aplicação de um “regulador de condensações” ou de um feltro absorvente de humidade, tal como se indica de seguida para as coberturas sem isolamento térmico. A camada de isolamento pode ser colocada na horizontal, conforme se encontra representado na figura, ou inclinada.
- (2) Esta solução necessita de parecer favorável nos documentos de homologação.

Coberturas sem isolamento térmico:

Neste tipo de coberturas, são elevados os riscos de ocorrência de condensações na face inferior das placas de revestimento, que podem ser minimizados através da utilização de um “regulador de condensações” (que foi já descrito no § 5.3.3.4.1) ou de um feltro absorvente, aplicado sobre as madres e bem esticado [43]. O feltro absorvente, normalmente, consiste numa camada de isolamento térmico absorvente (geralmente lã mineral) de pequena espessura, associado a uma barreira pára-vapor, e necessita de homologação para este fim.

Nos edifícios abertos, não há necessidade de prever dispositivos específicos para ventilação da face inferior da cobertura, o que não acontece com os edifícios fechados, para os quais o valor mínimo da relação entre a secção total (S) das aberturas de ventilação e a área (A) da cobertura em projecção horizontal é de [43]:

$$\frac{S}{A} \geq \frac{1}{500}, \text{ sem contudo ultrapassar } 400 \text{ cm}^2 \text{ por cada metro de desenvolvimento da cobertura.}$$

Coberturas com isolamento térmico aplicado sob as madres:

No Quadro 5.7 encontram-se os valores mínimos recomendados pelo DTU 40.35 [43] para as secções dos orifícios de ventilação de coberturas com revestimento em placas nervuradas de aço revestido e isolamento térmico aplicado sob as madres, em função da higrometria dos locais cobertos (ver § 2.2.4.3).

Quadro 5.7 – Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A) da cobertura em projecção horizontal, previstas no DTU 40.35 [43] para coberturas com revestimento em placas nervuradas de aço revestido e isolamento térmico aplicado sob as madres

Higrometria dos Locais (ver § 2.2.4.3)	S/A
Fraca	1/1000
Média	1/500

A secção (S) dos orifícios de ventilação não deve ultrapassar os 400 cm² por cada metro de desenvolvimento da cobertura. A espessura dos espaços de ar ventilados não deverá ser inferior a 4 cm em nenhum ponto, tendo em conta as eventuais deformações e variações dimensionais da camada de isolamento.

Relembra-se que, para este tipo de coberturas, o DTU 40.35 [43] prevê a aplicação de um “regulador de condensações” ou de um feltro absorvente de humidade, tal como se indicou anteriormente para as coberturas sem isolamento térmico. Além disso, refere que deve ser aplicada uma barreira pára-vapor, pelo interior da camada de isolamento térmico, tal que a permeância ao vapor do conjunto não ultrapasse $0,02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) = 42 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Coberturas com isolamento térmico aplicado sobre as madres:

Tal como foi já referido anteriormente no Quadro 5.6, estas soluções necessitam de homologação, na qual devem ser definidas as exigências de aplicação. Contudo, referem-se de seguida alguns aspectos a respeitar.

Os materiais de isolamento térmico normalmente aplicados neste tipo de coberturas são flexíveis, necessitando de ser esticados durante a aplicação, que deverá ser realizada com tempo seco. Pelo interior da camada de isolamento térmico deverá ser aplicada uma barreira pára-vapor, que normalmente já vem acoplada ao isolamento.

Nestas coberturas é extremamente importante assegurar a continuidade da barreira pára-vapor, pelo que as suas juntas deverão ficar bem seladas, assim como qualquer ponto singular, como atravessamento de tubagens, etc.. Ao longo do contorno da cobertura deve também ser aplicada uma espuma que garanta a sua estanquidade ao ar (Figura 5.19).

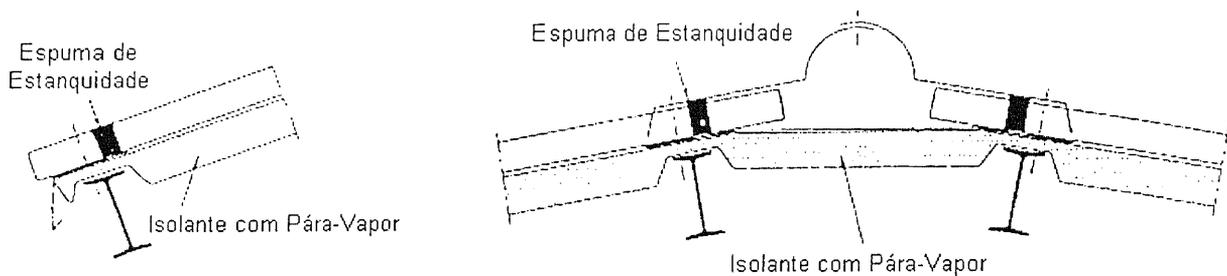


Figura 5.19 – Exemplos de aplicação de espumas de estanquidade ao longo do contorno de coberturas com revestimento em chapas metálicas nervuradas [43]

Coberturas com isolamento térmico aplicado entre as madres:

Estas coberturas deverão respeitar os mesmos princípios referidos anteriormente para as coberturas com isolamento térmico sobre as madres, nomeadamente quanto à necessidade de uma barreira pára-vapor pelo interior da camada de isolamento térmico, aos cuidados para assegurar a sua continuidade, com uma adequada selagem das juntas e pontos singulares, e à necessidade de garantir a estanquidade ao ar ao longo do contorno da cobertura.

Neste tipo de coberturas, o conjunto isolante térmico e barreira pára-vapor deverá apresentar uma permeância não superior a $0,02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) = 42 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ e, nas soluções em que a camada de isolamento térmico é aplicada sem deixar um espaço de separação relativamente às placas de revestimento, o isolante térmico a utilizar deverá ser não hidrófilo.

Coberturas com painéis sandwich:

Tal como nos casos anteriores, nas coberturas com este tipo de revestimento é muito importante evitar entradas de ar no espaço entre as duas placas metálicas, sendo necessário garantir uma adequada selagem ao longo do contorno, dos pontos singulares, etc..

A camada de isolamento térmico deverá ser não hidrófila, podendo eventualmente incorporar uma barreira pára-vapor na sua face inferior.

É necessário tomar precauções para permitir que a humidade proveniente de eventuais condensações que possam ocorrer no espaço entre placas possa ser eliminada. Esta exigência é um pouco contraditória com a necessidade de estanquidade ao ar, na medida em que a eliminação da humidade obriga à existência de aberturas de drenagem, que também permitirão a entrada de ar, pelo que deverão ser reduzidas ao mínimo possível.

5.3.3.4.8 Coberturas com Revestimento em Placas Nervuradas de Alumínio (pré-lacado ou não)

Coberturas sem isolamento térmico:

Tal como acontece com as coberturas com revestimento em placas nervuradas de aço revestido, também nas coberturas com revestimento em placas nervuradas de alumínio (pré-lacado ou não) sem isolamento térmico é necessário prever dispositivos específicos para ventilação da face inferior da cobertura, nos edifícios fechados, enquanto que nos edifícios abertos tal pode ser dispensado.

O valor mínimo da relação entre a secção total (S) das aberturas de ventilação e a área (A) da cobertura em projecção horizontal é de [33]:

$$\frac{S}{A} \geq \frac{1}{500}, \text{ sem contudo ultrapassar } 400 \text{ cm}^2 \text{ por cada metro de desenvolvimento da cobertura.}$$

Mesmo com esta ventilação, ainda existem riscos de ocorrência de condensações na face inferior das placas de revestimento, em particular durante uma parte da noite, pois o ar exterior encontra-se com

teores de humidade elevados. Este aspecto pode ser minimizado através da utilização de um “regulador de condensações” (já descrito no § 5.3.3.4.1) ou de um feltro absorvente (também já mencionado no § 5.3.3.4.7).

Coberturas com isolamento térmico aplicado sob as madres:

No Quadro 5.8 encontram-se os valores mínimos recomendados pelo DTU 40.36 [33] para as secções dos orifícios de ventilação de coberturas com revestimento em placas nervuradas de alumínio (pré-lacado ou não), com isolamento térmico sob as madres, em função da higrometria dos locais cobertos (ver § 2.2.4.3) e da permeância (P) do conjunto formado pela camada de isolamento térmico e pela eventual barreira pára-vapor subjacente.

Quadro 5.8 – Relação entre a área total mínima dos orifícios de ventilação e a área (A) da cobertura em projecção horizontal, previstas no DTU 40.36 [33] para coberturas com revestimento em placas nervuradas de alumínio (pré-lacado ou não), com isolamento térmico sob as madres

Higrometria dos Locais (ver § 2.2.4.3)	Permeância (P) do Conjunto Isolante Térmico + Barreira Pára-Vapor [g/(m ² ·h·mmHg)]	S/A
Fraca	0,05 ≤ P < 0,10	1/1000
	P < 0,05	1/2000
Média	0,05 ≤ P < 0,10	1/1000
	P < 0,05	1/500

A secção (S) dos orifícios de ventilação não deve ultrapassar os 400 cm² por cada metro de desenvolvimento da cobertura. A espessura dos espaços de ar ventilados não deverá ser inferior a 4 cm em nenhum ponto, tendo em conta as eventuais deformações e variações dimensionais da camada de isolamento.

Como se pode constatar pelo Quadro anterior, o conjunto formado pela camada de isolamento térmico e pela eventual barreira pára-vapor subjacente deverá apresentar uma permeância inferior a 0,10 g/(m²·h·mmHg) = 208 × 10⁻¹² kg/(m²·s·Pa).

Tal como acontece com as coberturas não isoladas termicamente, mesmo com esta ventilação ainda existem riscos de ocorrência de condensações na face inferior das placas de revestimento, em particular durante uma parte da noite, o que pode ser minimizado através da utilização de um “regulador de condensações” (descrito no § 5.3.3.4.1) ou de um feltro absorvente (mencionado no § 5.3.3.4.7).

São também necessários bastantes cuidados para assegurar a continuidade das eventuais barreiras pára-vapor, em particular nos edifícios de média higrometria, com uma adequada selagem das juntas e pontos singulares.

Coberturas com isolamento térmico aplicado sobre as madres:

Estas soluções apenas estão previstas para edifícios de fraca higrometria $\left(\frac{\omega}{n \cdot V} \leq 2,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3\right)$ e necessitam de homologação, na qual são definidas as exigências de aplicação. Contudo, referem-se aqui alguns aspectos a respeitar.

Os materiais de isolamento térmico normalmente aplicados neste tipo de coberturas são semi-rígidos ou flexíveis, necessitando estes últimos de ser esticados durante a aplicação, que em qualquer dos casos deverá ser realizada com tempo seco.

Pelo interior da camada de isolamento térmico deverá ser aplicada uma barreira pára-vapor, de modo que a permeância do conjunto não ultrapasse $0,02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) = 42 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Nestas coberturas é extremamente importante assegurar a continuidade da barreira pára-vapor, pelo que as suas juntas deverão ficar bem seladas, assim como qualquer ponto singular, como atravessamento de tubagens, etc..

Coberturas com isolamento térmico aplicado entre as madres:

Estas coberturas deverão respeitar os mesmos princípios referidos anteriormente para as coberturas com isolamento térmico sobre as madres, nomeadamente quanto ao domínio de aplicação, à necessidade de uma barreira pára-vapor pelo interior da camada de isolamento térmico e suas características de permeabilidade ao vapor de água, aos cuidados para assegurar a sua continuidade, com uma adequada selagem das juntas e pontos singulares, etc..

Nestas coberturas é extremamente importante assegurar a estanquidade ao ar do espaço entre a camada de isolamento térmico e as placas de revestimento exterior.

5.3.3.4.9 Coberturas com Revestimento em Folha de Zinco

Caso geral

As regras ventilação de coberturas com revestimento em folha de zinco, sem ecrã de estanquidade complementar, são idênticas às que se apresentaram já no § 5.3.3.4.2, a menos dos aspectos que se referem de seguida.

Neste tipo de coberturas, a espessura dos espaços de ar ventilados não deverá ser inferior, em nenhum ponto, a 6 cm ou a 4 cm, consoante a largura da vertente é ou não superior a 12 m, respectivamente.

Coberturas situadas em região de montanha:

Para coberturas situadas a uma altitude superior a 900 m (válido para o território francês), ou expostas a um clima idêntico ao destas zonas, o DTU 40.41 [28] apenas prevê a realização de coberturas duplas com ventilação, em que é aplicado um ecrã de estanquidade complementar entre a camada de isolamento térmico e o revestimento exterior, separando dois espaços de ar ventilados (Figura 5.20).

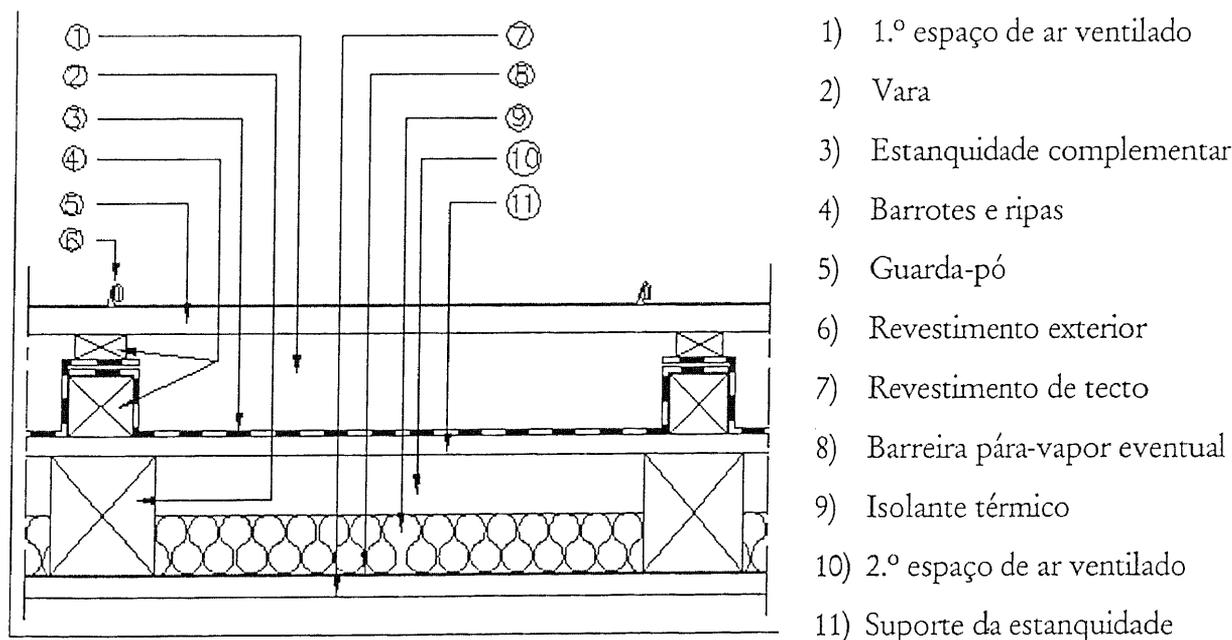


Figura 5.20 – Princípio de realização de uma cobertura dupla com ventilação [28]

Relativamente às coberturas situadas noutras zonas, as coberturas de edifícios situados em região de montanha deverão respeitar as seguintes exigências complementares [28]:

- As camadas adjacentes ao isolamento térmico e situadas pelo seu interior deverão, no seu conjunto, apresentar uma permeância ao vapor de água não superior a $0,02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) = 42 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$;
- Os valores mínimos das secções de ventilação e das espessuras dos espaços de ar ventilados estão indicados na Figura 5.21 para edifícios de média higrometria (ver § 2.2.4.3).

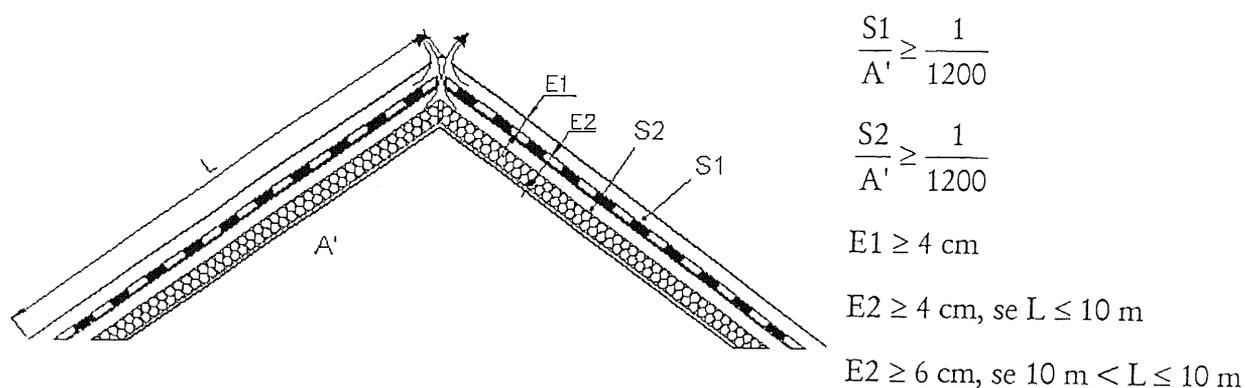


Figura 5.21 – Critérios de ventilação de coberturas duplas com revestimento em folha de zinco, em edifícios de média higrometria [28]

5.3.3.4.10 Coberturas com Revestimento em Grandes Elementos de Folhas e Bandas de Alumínio ou Aço Galvanizado

No DTU 40.42 e no DTU 40.43 ([20] e [21]), as coberturas com revestimento em grandes elementos metálicos de folhas e bandas de alumínio ou aço galvanizado apenas estão previstas para as tipologias de coberturas em desvão ventilado. Este documento refere que o valor mínimo da relação entre a secção total (S) das aberturas de ventilação e a área (A) da cobertura é de:

$$\frac{S}{A} \geq \frac{1}{2000}$$

5.3.3.4.11 Coberturas com Revestimento em Grandes Elementos de Folhas e Bandas de Aço Inoxidável

Caso geral

Os princípios de ventilação deste tipo de coberturas são idênticos aos que se referiram anteriormente para as coberturas com revestimento em folha de zinco (ver § 5.3.3.4.9), com exceção das coberturas situadas em região de montanha.

Coberturas situadas em região de montanha:

Para coberturas situadas a uma altitude superior a 900 m (válido para o território francês), ou expostas a um clima idêntico ao destas zonas, o DTU 40.44 [35] apenas prevê a realização de coberturas duplas com ventilação, de acordo com os princípios definidos na Figura 5.20.

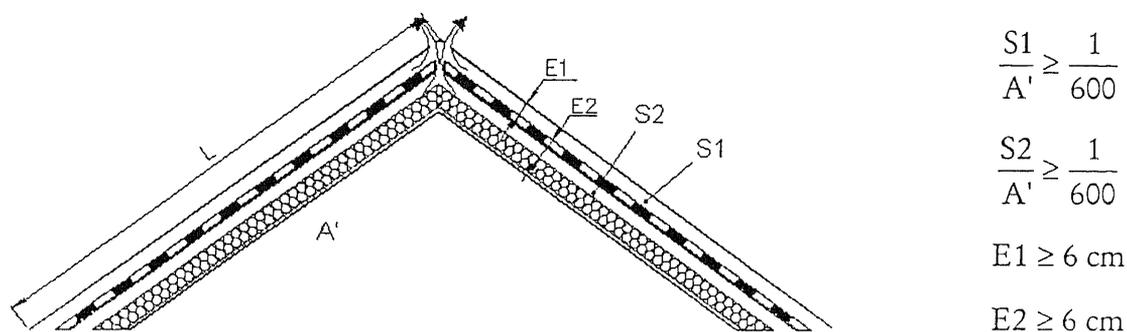


Figura 5.22 – Critérios de ventilação de coberturas duplas com revestimento em grandes elementos de folhas e bandas de aço inoxidável [35]

Estranhamente, para coberturas situadas em região de montanha, as regras de ventilação de coberturas com revestimento em grandes elementos de folhas e bandas de aço inoxidável são bastante diferentes das que são apresentadas para as coberturas com revestimento em folha de zinco, quando à partida deveriam apresentar um comportamento idêntico face à difusão de vapor.

5.3.3.4.12 Coberturas com Revestimento em Folha de Cobre

Os princípios de ventilação deste tipo de coberturas são idênticos aos que se referiram anteriormente para as coberturas com revestimento em grandes elementos de folhas e bandas de aço inoxidável (ver § 5.3.3.4.11).

5.3.3.4.13 Coberturas com Revestimento em Chumbo e Suporte Contínuo

Os princípios de ventilação deste tipo de coberturas são idênticos aos que se referiram anteriormente para as coberturas com revestimento em folha de zinco (ver § 5.3.3.4.9), não estando prevista a realização deste tipo de coberturas em região de montanha.

5.3.3.5 REGRAS DO CSTC

5.3.3.5.1 Generalidades

Tal como acontece com as coberturas em terraço, o CSTC [45] também apresenta uma série de regras para coberturas inclinadas, na forma de quadros que devem ser consultados de acordo com a terminologia definida no § 5.3.3.5.2.

Deve realçar-se o facto de os exemplos apresentados estarem relacionados com a prática construtiva belga dos anos 80, que não corresponde totalmente à nossa realidade. Contudo, constituem uma excelente base de consulta para situações semelhantes, necessitando obviamente das adaptações apropriadas.

Os quadros que se seguem apresentam-se separados em função do tipo de revestimento da cobertura (telha, ardósia, fibrocimento, etc.) e da existência ou não de guarda-pó (Figura 5.24) ou estrutura de suporte em painéis.

5.3.3.5.2 Terminologia

As regras do CSTC são apresentadas sob a forma de quadros, em que o significado das siglas aí presentes é o que se explica de seguida.

Estrutura de suporte:

- T1: estrutura monolítica de betão
- T2: laje aligeirada com elementos vazados prefabricados em betão ou cerâmica, com camada de compressão
- T3: laje aligeirada com elementos vazados prefabricados em betão ou cerâmica, sem camada de compressão
- T4: estrutura em betão leve (betão celular, etc.)

- T5: estrutura em matérias vegetais (madeira ou materiais aparentes)
- T6: estrutura em fibras orgânicas e minerais ligadas por intermédio de um ligante mineral
- T7: estrutura em metal perfilado

Existem ainda elementos auto-portantes de coberturas compostas (elemento + isolante, etc.), que normalmente são do tipo T5, T6 ou T7.

Revestimento exterior:

- R1: telhas cerâmicas ou de betão
- R2: ardósias naturais ou em fibrocimento
placas perfiladas de fibrocimento sem estanquidade das juntas
- R3: placas perfiladas de fibrocimento com estanquidade das juntas
placas perfiladas em materiais sintéticos ou em metal sem estanquidade das juntas
telhas metálicas
- R4: placas perfiladas em materiais sintéticos ou em metal com estanquidade das juntas
telha asfáltica fixada mecanicamente com ou sem colagem
- R5: chapas metálicas planas com ou sem juntas soldadas
revestimentos de estanquidade à base de betume ou em folhas de material sintético
revestimentos de estanquidade em betume com armadura metálica

Esta classificação apresenta-se em ordem crescente relativamente à resistência à difusão de vapor de água equivalente, tendo em conta a presença das juntas e a estanquidade ao ar do revestimento.

Sub-telha:

- ST1: papel forte, painéis de celulose-cimento, painéis de fibras de madeira;
- ST2: papel betuminoso ou revestido de folha de alumínio, de materiais sintéticos, etc.
folhas de material sintético, eventualmente com microperfurações
membranas betuminosas

Materiais de isolamento térmico:

Materiais de origem vegetal:

K: cortiça

Materiais inorgânicos:

MW: lã mineral

CG: vidro celular

Espumas sintéticas:

S: espumas expandidas de células maioritariamente fechadas, como o poliestireno expandido (PS), o poliuretano (PUR) e o polisocianurato (PIR)

PSE: espuma de poliestireno extrudido

FF: espuma de fenolformaldeído

Outros materiais:

P: placas de perlite expandida, vermiculite expandida, etc.

Refira-se que as espumas de poliestireno (expandido ou extrudido) não podem ser colocadas directamente sob um revestimento de estanquidade betuminoso (tipo R5).

Barreiras pára-vapor:

As barreiras pára-vapor encontram-se agrupadas em quatro classes (E1, E2, E3 e E4) de acordo com as suas características de permeabilidade ao vapor de água, conforme foi já descrito no § 3.4. De qualquer forma apresentam-se os exemplos de soluções que o texto em questão considera como pertencentes a uma determinada classe.

E1 - $2 \text{ m} < S_d \leq 5 \text{ m}$:

- Papel betuminoso
- Tela de fibra de vidro com betume
- Papel de tapeçaria plastificado
- Certas pinturas (pintura de óleo, de borracha clorada, etc.)

Refira-se que as placas de isolamento térmico com barreira pára-vapor acoplada que são aplicadas sem que se garanta o recobrimento da barreira nas juntas entre placas, não satisfazem esta classificação.

E2 – $5 \text{ m} < S_d \leq 25 \text{ m}$:

- Gesso cartonado recoberto com folha de alumínio e aplicado com juntas estanques
- Folhas de material sintético ou membranas betuminosas aplicadas com juntas fechadas mecanicamente (por exemplo, por agrafagem, pregagem, etc.)

E3 – $25 \text{ m} < S_d \leq 200 \text{ m}$:

- Betumes armados com armadura de fibra de vidro, com juntas coladas ou soldadas

E4 – $S_d > 200 \text{ m}$:

- Betumes com armadura metálica e juntas coladas ou soldadas

5.3.3.5.3 Classificação do Clima Interior dos Edifícios

A publicação consultada apresenta uma classificação do clima interior dos locais ligeiramente diferente da que foi já descrita no § 2.2.4.3. Esta classificação define quatro escalões de pressão parcial de vapor no interior dos edifícios (P_i), que se encontram definidos na Figura 5.23, em função das médias anuais de temperatura e humidade relativa do ambiente interior dos edifícios.

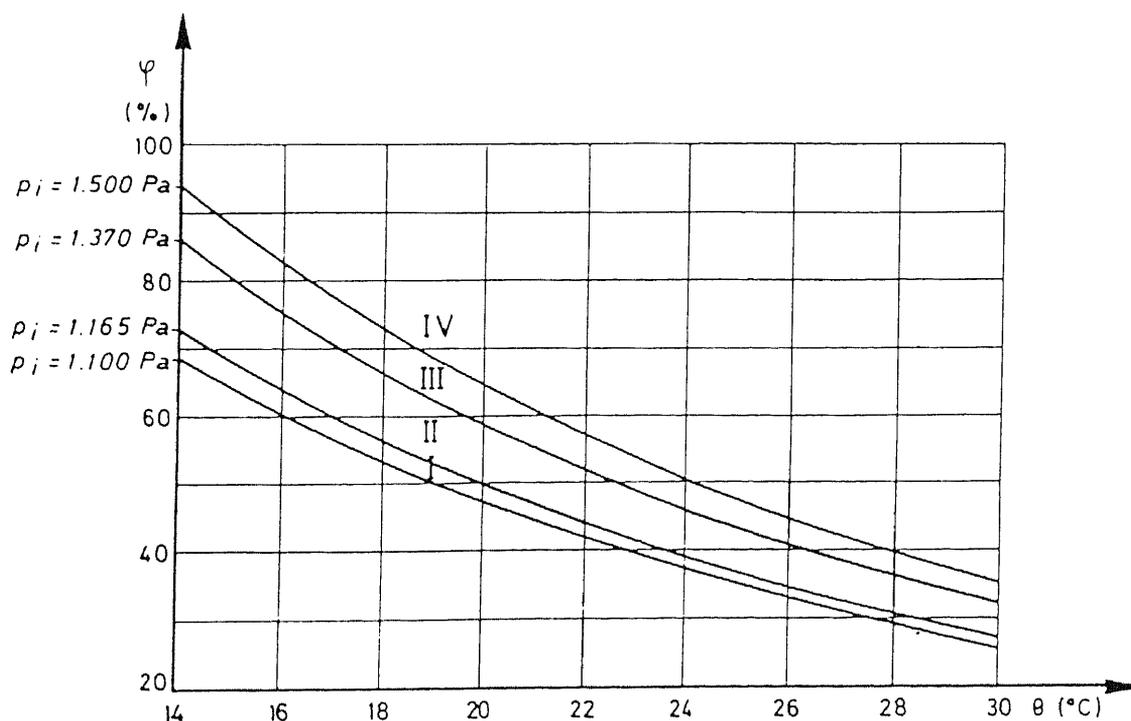


Figura 5.23 – Classes de clima interior dos edifícios segundo o CSTC [45]

Pelos valores apresentados e pelos exemplos que são fornecidos de edifícios que pertencem a cada uma das classes, pode estabelecer-se um paralelismo com as classes de higrometria definidas no § 2.2.4.3.

5.3.3.5.4 Combinações Previstas

Nas recomendações apresentadas são consideradas as seguintes combinações possíveis dos elementos anteriormente mencionados:

Para coberturas com revestimento do tipo R1, R2, R3 e R4 distinguem-se as seguintes composições:

- Estrutura de suporte do tipo descontínuo (armação ligeira, madres, ripado e contra-ripado, etc.). A inclinação da vertente e a habitabilidade ou não do espaço subjacente (sótão) determinam a necessidade ou não de uma sub-telha;
- Estrutura de suporte do tipo contínuo. A estrutura de suporte é dos tipos T5 ou T6, excepcionalmente dos tipos T1, T2, T3 ou T4.

Para coberturas com revestimento do tipo R5 distinguem-se as seguintes composições:

- Cobertura “quente” (cobertura massiva ou não ventilada = cobertura sem “espaço de cobertura”) com:
 - Estrutura de suporte ligeira, dos tipos T5, T6 ou T7;
 - Estrutura de suporte “semi-pesada” do tipo T4;
 - Estrutura de suporte pesada, dos tipos T1, T2 ou T3.
- Cobertura “fria” (cobertura ventilada = cobertura com “espaço de cobertura”) com:
 - Estrutura de suporte ligeira, dos tipos T5 ou T6;
 - Estrutura de suporte “semi-pesada” do tipo T4;
 - Estrutura de suporte pesada, dos tipos T1, T2 ou T3.

Devido às dificuldades em realizar correctamente uma cobertura plana do tipo “frio”, não é aconselhável a sua utilização em construções novas.

- Cobertura invertida com:
 - Estrutura de suporte ligeira, dos tipos T5 ou T6;
 - Estrutura de suporte “semi-pesada” do tipo T4;
 - Estrutura de suporte pesada, dos tipos T1, T2 ou T3.

A escolha de uma estrutura de suporte do tipo T7 não é aconselhável, devido à possibilidade de ocorrência de condensações superficiais sobre o metal perfilado e à dificuldade das técnicas de execução.

Quando se utilizam estruturas de suporte dos tipos T5 ou T6 em coberturas ventiladas ou invertidas, a espessura mínima do elemento auto-portante de cobertura deverá ser suficiente para garantir uma resistência térmica de, pelo menos, $0,2 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Na consulta dos Quadros que se seguem deve ainda atender-se aos seguintes aspectos:

Coberturas sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis:

- A ventilação do eventual espaço de ar entre a sub-telha e o material de isolamento térmico não é exigida;
- Deve assegurar-se a estanquidade ao ar da camada de isolamento térmico, o que requer a utilização de um material de isolamento estanque e a realização de juntas convenientemente estanques. Caso se pretenda utilizar um material de isolamento não estanque ao ar, é necessário aplicar sob a camada de isolamento térmico uma folha ou outro componente que assegure a estanquidade ao ar necessária. Refira-se que o acabamento interior do tecto pode eventualmente preencher este requisito;
- As placas perfiladas de metal ou material sintético não são utilizadas em edifícios das classes de higrometria III e IV.

NOTAS:

- (1) Para que seja eficaz, a execução da barreira pára-vapor exige bastantes cuidados.
- (2) Se a resistência à difusão de vapor de água do acabamento interior respeitar as exigências relativas às classes E1 e E2, não é necessária a colocação de uma barreira pára-vapor complementar.

Coberturas com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis:

- Nas situações em que, devido aos detalhes de remate das coberturas, devido à pequena inclinação das vertentes ou devido às exigências de estanquidade ao ar, se preveja a utilização de uma sub-telha complementar, é indispensável a realização de um estudo higrotérmico detalhado para os edifícios das classes de higrometria III e IV em que se pretendam executar coberturas com as composições apresentadas nos Quadros seguintes.
- Deve prestar-se particular atenção ao acabamento estanque ao ar das juntas da estrutura de suporte e ao acabamento dos larós e remates de cobertura.

- Se a estrutura de suporte for constituída por painéis derivados de madeira, a sua constituição deverá ser adequada para este fim.

NOTAS:

- (1) Para que seja eficaz, a execução da barreira pára-vapor exige bastantes cuidados.
- (2) Se a resistência à difusão de vapor de água do acabamento interior respeitar as exigências relativas às classes E1 e E2, não é necessária a colocação de uma barreira pára-vapor complementar.

5.3.3.5.5 Coberturas com Revestimento em Telha Cerâmica ou de Betão

No Quadro 5.9 indicam-se as regras apresentadas pelo CSTC [45] para a concepção de coberturas com revestimento em telha cerâmica ou de betão sem guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis, enquanto que no Quadro 5.10 se indicam as regras para o mesmo tipo de coberturas mas com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis.

Para dar uma ideia do que pode ser um guarda-pó, mostra-se na Figura 5.24 uma representação esquemática apresentada pelo Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV) para este tipo de componentes.

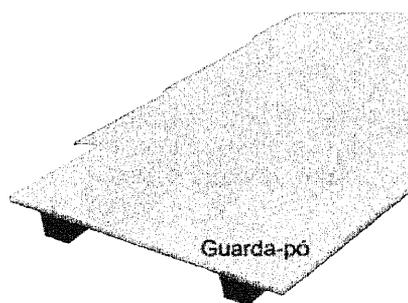
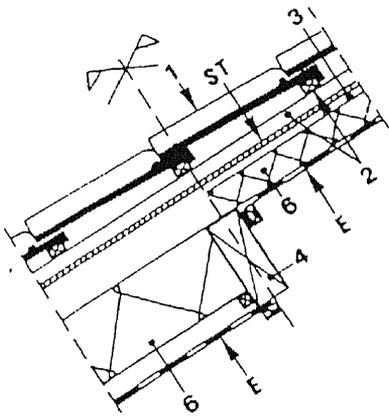
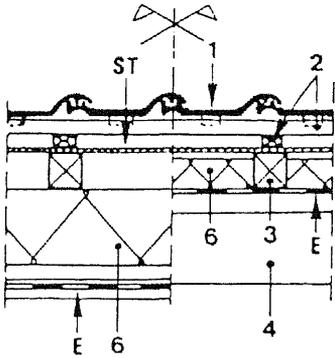
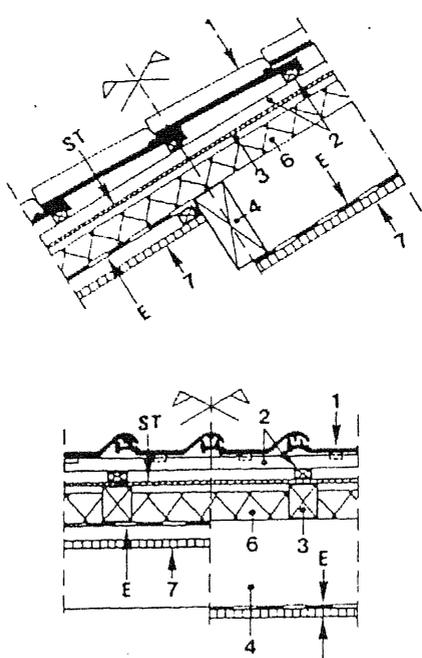


Figura 5.24 – Representação esquemática de um guarda-pó [12]

Quadro 5.9 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Isolamento entre varas ou painéis ou entre elementos de estruturas ligeiras - Sub-telha, se previsto, colocado sobre o material de isolamento térmico 	sem sub-telha	MW S-PSE-FF	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E1 ⁽¹⁾ N
	ST1	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E1 ⁽¹⁾ N
	ST2	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E2 ⁽¹⁾
					

Quadro 5.9 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Isolamento entre varas ou painéis ou entre elementos de estruturas ligeiras - Acabamento interior aplicado sob as varas ou painéis ou sob elementos de estruturas ligeiras 	ST1	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E1 ⁽²⁾ N
	ST2	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾

Quadro 5.9 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

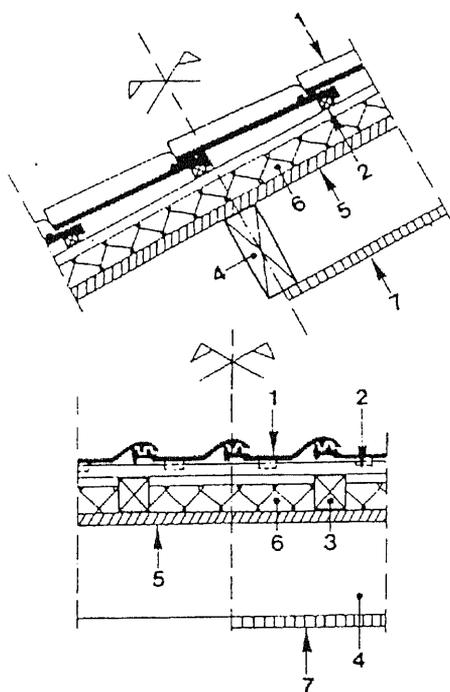
Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
<ul style="list-style-type: none"> - Isolamento aplicado sobre varas ou sobre elementos de estruturas ligeiras - Com ou sem acabamento interior 	sem sub-telha	S-PSE	N	N	N

Quadro 5.10 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Painel sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Estrutura de suporte do tipo T5 ou T6 - Isolamento aplicado sob a estrutura de suporte, entre as varas ou elementos de estruturas ligeiras - Acabamento interior existente ou não 	sem acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E2 ⁽¹⁾
	com acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾

Quadro 5.10 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior.		
			I	II	III
1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Pannel sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária					
- Estrutura de suporte do tipo T5 ou T6 ou estrutura de suporte combinada T5 ou T6 + material isolante - Acabamento interior existente ou não	com ou sem acabamento	MW-FF-S-PSE	N	N	N



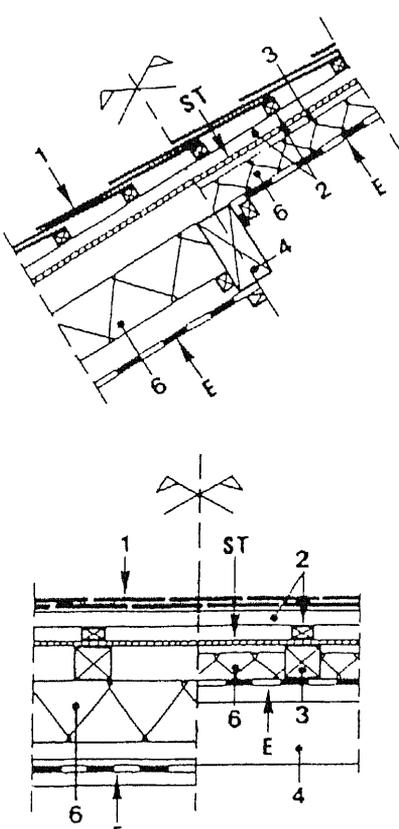
Quadro 5.10 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em telha cerâmica ou de betão, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior.		
			I	II	III
1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Painel sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária			N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
- Estrutura de suporte do tipo T5 ou T6 (painéis sandwich) 	com ou sem acabamento	MW-S-PSE	N	N	N

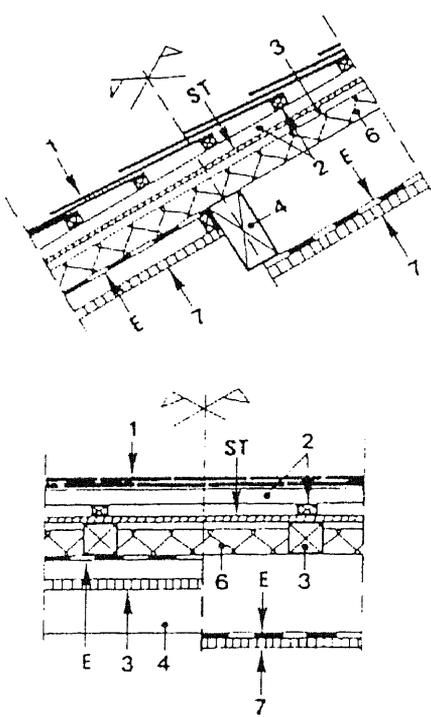
5.3.3.5.6 Coberturas com Revestimento em Ardósia Natural ou de Fibrocimento

No Quadro 5.11 e no Quadro 5.12, que se seguem, encontram-se as regras de concepção referidas pelo CSTC [45] para coberturas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento.

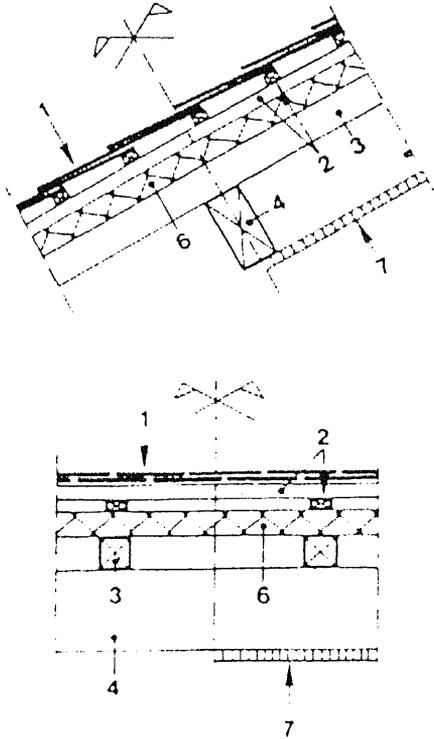
Quadro 5.11 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Isolamento entre as varas ou painéis ou entre elementos de estruturas ligeiras - Sub-telha, se previsto, colocado sobre o material de isolamento térmico 	sem sub-telha	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽⁰⁾ N	E1 ⁽⁰⁾ N
	ST1	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽⁰⁾ N	E1 ⁽⁰⁾ E1 ⁽⁰⁾
	ST2	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽⁰⁾ N	E2 ⁽⁰⁾ E2 ⁽⁰⁾

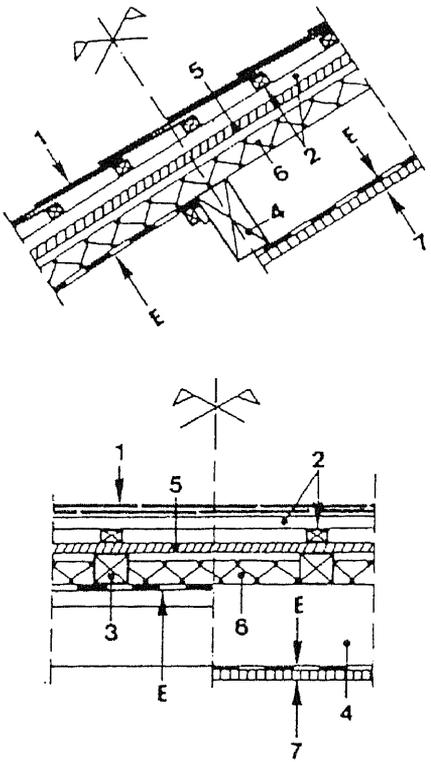
Quadro 5.11 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Isolamento entre as varas ou painéis ou entre elementos de estruturas ligeiras - Acabamento interior aplicado sob as varas ou painéis ou sob elementos de estruturas ligeiras 	ST1	MW-FF S PSE	N N N	E1 ⁽²⁾ N N	E1 ⁽²⁾ E1 ⁽²⁾ N
	ST2	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾

Quadro 5.11 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

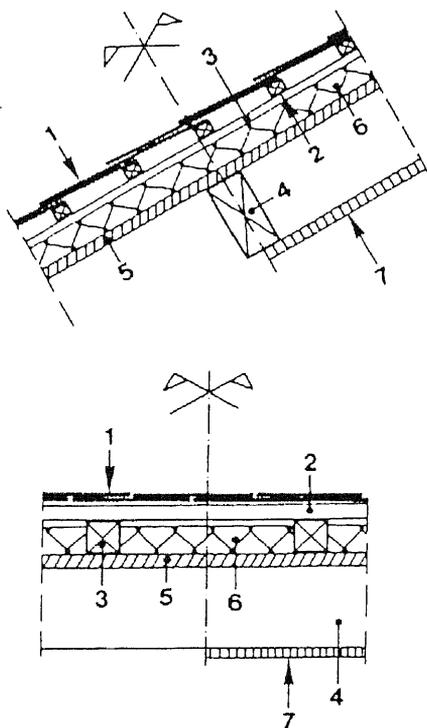
Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
<p>– Isolamento aplicado sobre as varas ou sobre elementos de estruturas ligeiras</p> <p>– Com ou sem acabamento interior</p> 	sem sub-telha	S-PSE	N	N	N

Quadro 5.12 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

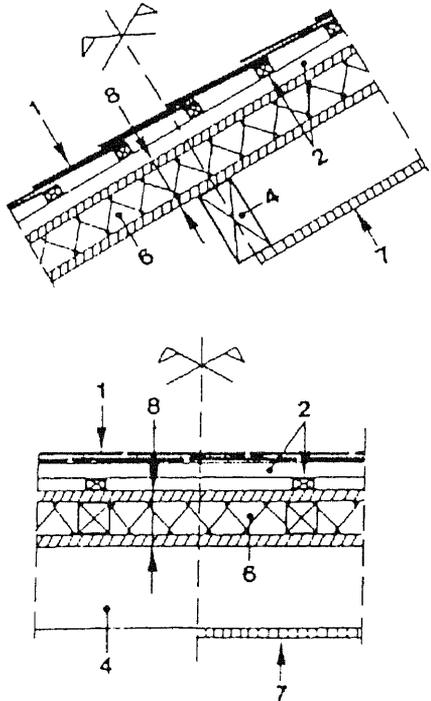
Esquema de princípio de composição da cobertura	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior.		
			I	II	III
1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Paineis sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária					
- Estrutura de suporte do tipo T5 ou T6 - Isolamento aplicado sob a estrutura de suporte, entre as varas ou elementos de estruturas ligeiras - Acabamento interior existente ou não	sem acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E2 ⁽¹⁾
	com acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾

Quadro 5.12 (cont.) - Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior.		
			N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Painel sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária					
- Estrutura de suporte do tipo T5 ou T6 ou estrutura de suporte combinada T5 ou T6 + material isolante - Acabamento interior existente ou não	com ou sem acabamento	MW-S-PSE	N	N	N



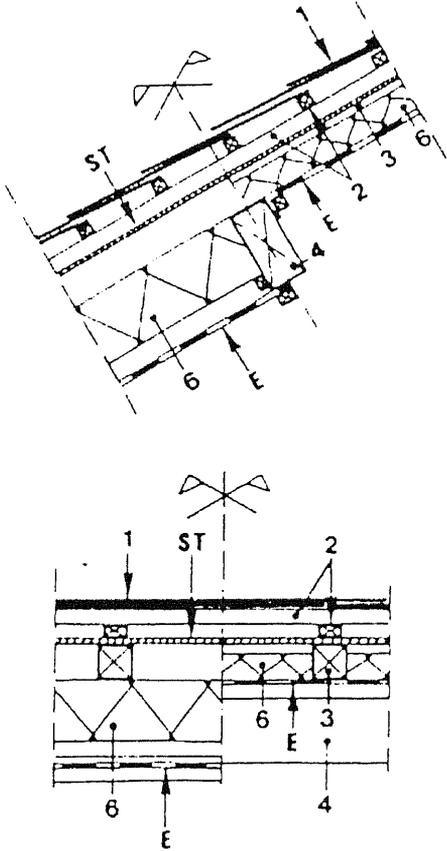
Quadro 5.12 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em ardósia natural ou de fibrocimento, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior.		
			I	II	III
1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Painel sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária					
- Estrutura de suporte do tipo T5 ou T6 (painéis sandwich) 	com ou sem acabamento	MW-S-PSE	N	N	N

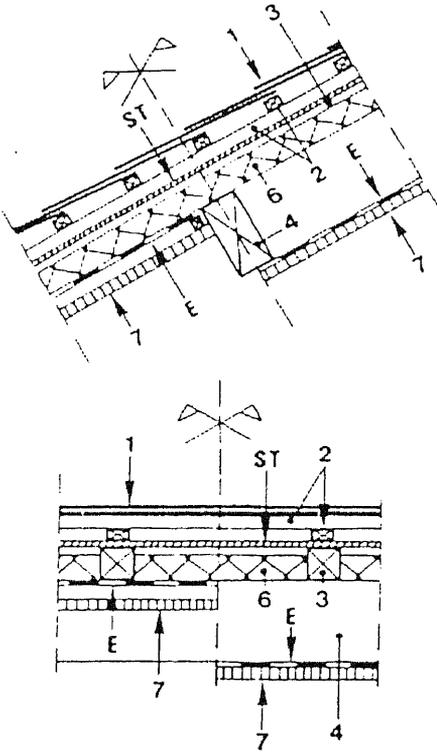
5.3.3.5.7 Coberturas com Revestimento em “Telha Asfáltica”

No Quadro 5.13 e no Quadro 5.14. que se seguem, encontram-se as regras de concepção referidas pelo CSTC [45] para coberturas com revestimento em “telha asfáltica”, sem e com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis, respectivamente.

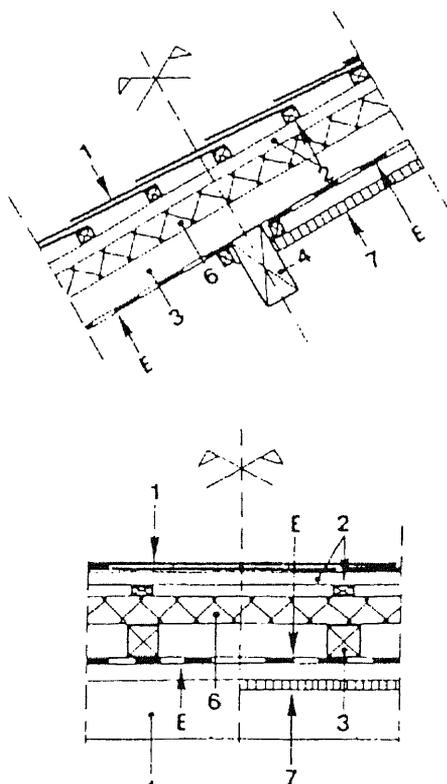
Quadro 5.13 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em “telha asfáltica”, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Isolamento entre as varas ou painéis ou entre elementos de estruturas ligeiras - Sub-telha, se previsto, colocado sobre o material de isolamento térmico 	sem sub-telha	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E2 ⁽¹⁾
	ST1	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E2 ⁽¹⁾
	ST2	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E2 ⁽¹⁾

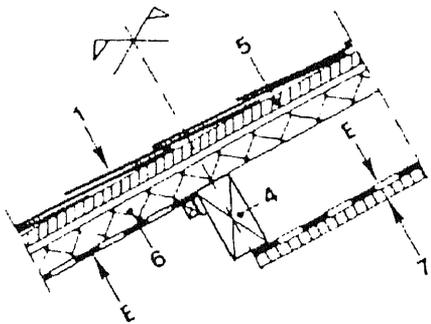
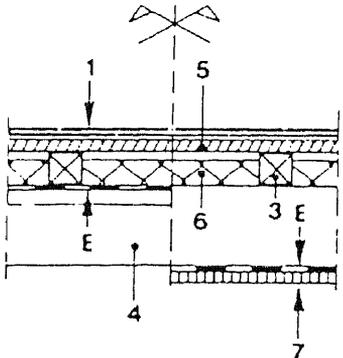
Quadro 5.13 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em “telha asfáltica”, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Isolamento entre as varas ou painéis ou entre elementos de estruturas ligeiras - Acabamento interior aplicado sob as varas ou painéis ou sob elementos de estruturas ligeiras 	ST1	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾
	ST2	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾

Quadro 5.13 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em “telha asfáltica”, sem guarda-pó nem estrutura de suporte em painéis

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior ST- Sub-telha, onde previsto E- Barreira pára-vapor, se necessária	Sub-telha (ST)	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
<ul style="list-style-type: none"> - Isolamento aplicado sobre as varas ou sobre elementos de estruturas ligeiras - Com ou sem acabamento interior 	sem sub-telha	S-PSE	N	N	E2(2)

Quadro 5.14 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em “telha asfáltica”, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

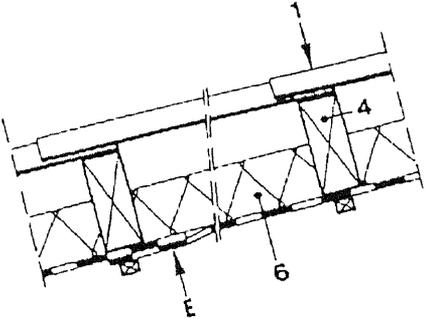
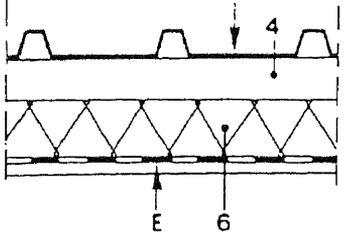
Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Painel sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Estrutura de suporte do tipo T5 ou T6 - Isolamento aplicado sob a estrutura de suporte - Acabamento interior existente ou não - Sub-telha, se previsto, colocado sobre a estrutura de suporte 	sem acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E2 ⁽¹⁾
	com acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾
					

Quadro 5.14 (cont) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em “telha asfáltica”, com guarda-pó ou estrutura de suporte em painéis

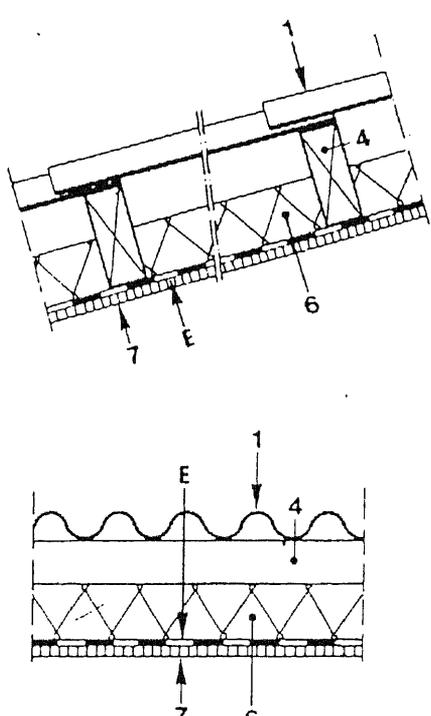
Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 2- Ripado e contra-ripado 3- Vara 4- Madre 5- Guarda-pó 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior 8- Pannel sandwich E- Barreira pára-vapor, se necessária	Acabamento interior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor		
			I	II	III
- Estrutura de suporte combinada T5 ou T6 - Acabamento interior existente ou não - Sub-telha, se previsto, colocado sobre a estrutura de suporte 	sem acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 N	E2 E2
	com acabamento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E2 ⁽²⁾ E2 ⁽²⁾

5.3.3.5.8 Coberturas com Revestimento em Placas Perfiladas de Fibrocimento, Metal ou Material Sintético

Quadro 5.15 – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em placas perfiladas de fibrocimento, metal ou material sintético

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior E- Barreira pára-vapor, se necessária	Acabamento das juntas e tipo de revestimento exterior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor X: significa que o tipo de cobertura não é adequado		
			I	II	III
- Isolamento térmico entre as madres - Sem acabamento interior  	Sem estanquidade: - Fibrocimento - Metal ou material sintético	MW-FF S-PSE MW-FF S-PSE	N N N N	E1 ⁽¹⁾ N E1 ⁽¹⁾ N	E1 ⁽¹⁾ N X X
	Com estanquidade: - Fibrocimento - Metal ou material sintético	MW-FF S PSE MW-FF S-PSE	N N N N N	E1 ⁽¹⁾ N N E1 ⁽¹⁾ N	E2 ⁽¹⁾ E1 ⁽¹⁾ N X X

Quadro 5.15 (cont.) – Recomendações do CSTC [45] para a constituição de coberturas inclinadas com revestimento em placas perfiladas de fibrocimento, metal ou material sintético

Esquema de princípio de composição da cobertura 1- Revestimento exterior 4- Madre 6- Isolamento térmico 7- Eventual acabamento interior E- Barreira pára-vapor, se necessária	Acabamento das juntas e tipo de revestimento exterior	Material de isolamento térmico	Classe E da barreira pára-vapor, se necessária, em função da classe de clima interior. N: significa que não é necessária qualquer barreira pára-vapor X: significa que o tipo de cobertura não é adequado		
			I	II	III
- Isolamento térmico entre as madres - Com acabamento interior 	Sem estanquidade:				
	- Fibrocimento	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	E1 ⁽²⁾ N
	- Metal ou material sintético	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	X X
	Com estanquidade:				
- Fibrocimento	MW-FF S PSE	N N N	E1 ⁽²⁾ N N	E2 ⁽²⁾ E1 ⁽²⁾ N	
- Metal ou material sintético	MW-FF S-PSE	N N	E1 ⁽²⁾ N	X X	

5.4 REGRAS DE CONCEPÇÃO DE PAVIMENTOS

5.4.1 GENERALIDADES

As regras que se apresentam de seguida, para constituição de pavimentos face ao problema das condensações internas, estão presentes na BSI 5250 [17], distinguindo-se as seguintes tipologias construtivas:

- Pavimentos exteriores elevados;
- Pavimentos térreos;
- Pavimentos suspensos, que são pavimentos térreos nos quais é criado um espaço de ar ventilado, normalmente designado de vazio sanitário, entre o terreno e o pavimento.

5.4.2 PAVIMENTOS EXTERIORES ELEVADOS

Os princípios de concepção dos pavimentos exteriores elevados face à difusão de vapor de água são os mesmos que se referiram anteriormente para paredes e coberturas, tendo em conta que a situação mais condicionante normalmente ocorre para o fluxo em sentido descendente – estação fria.

Tal como acontece com as paredes com isolamento pelo interior, os pavimentos elevados, normalmente, apresentam mais problemas quando a camada de isolamento térmico é aplicada sobre a estrutura de suporte (Figura 5.25). Nestes casos, se essa estrutura de suporte for pouco permeável ao vapor, como é o caso das lajes de betão ou aligeiradas geralmente utilizadas, aconselha-se a colocação de uma barreira pára-vapor acima da camada de isolamento térmico, com uma permeância inferior a cerca de $4 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ [17].

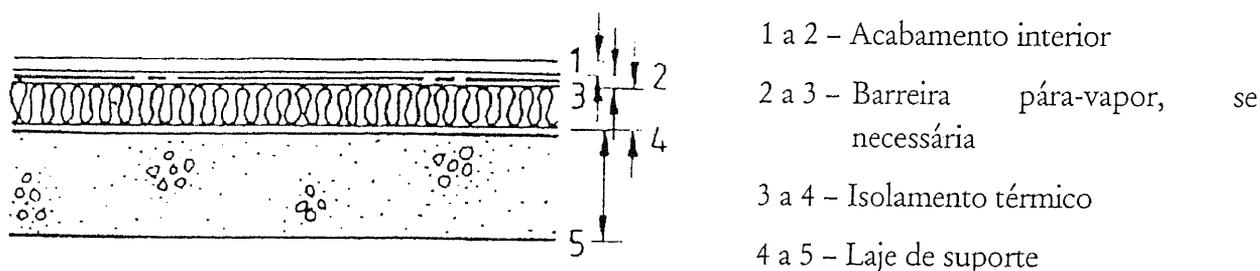


Figura 5.25 – Pavimentos exteriores elevados com isolamento térmico aplicado sobre a estrutura de suporte [17]

Nos pavimentos com isolamento térmico aplicado sob a estrutura de suporte, os riscos de ocorrência de condensações internas são pequenos, desde que as camadas subjacentes à camada de isolamento, nomeadamente o revestimento exterior, não apresentem elevada resistência à difusão de vapor de água (Figura 5.26). As recomendações apresentadas no § 5.2.2.2, para paredes com isolamento pelo exterior e revestimento delgado, também se poderão adaptar a este tipo de elementos construtivos.

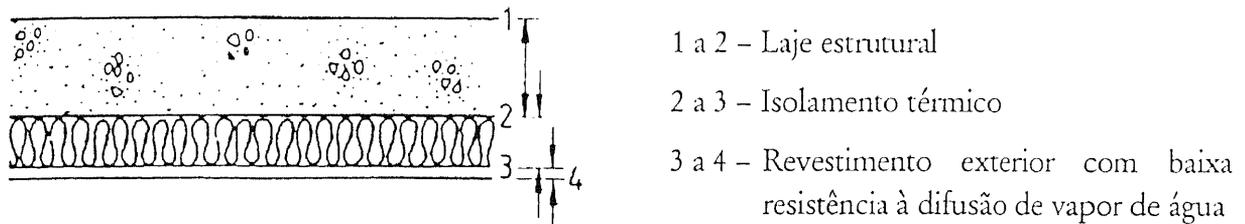


Figura 5.26 – Pavimentos exteriores elevados com isolamento térmico aplicado sob a estrutura de suporte e revestimento exterior contínuo [17]

Nos casos em que o revestimento exterior é pouco permeável ao vapor, deve criar-se um espaço de ar ventilado entre o revestimento exterior e a camada de isolamento térmico, com uma espessura não inferior a 50 mm (Figura 5.27). A ventilação desse espaço deverá ser assegurada por aberturas em lados opostos do perímetro do pavimento, com uma secção equivalente a uma abertura contínua com 25 mm de largura, ao longo desses lados [17].

Refira-se que nestes casos, apesar da norma em causa não o prever, também se pode equacionar a aplicação de uma barreira pára-vapor mas sem nunca eliminar o espaço de ar ventilado, para permitir a secagem de humidade que possa atingir o espaço compreendido entre o revestimento exterior e essa barreira.

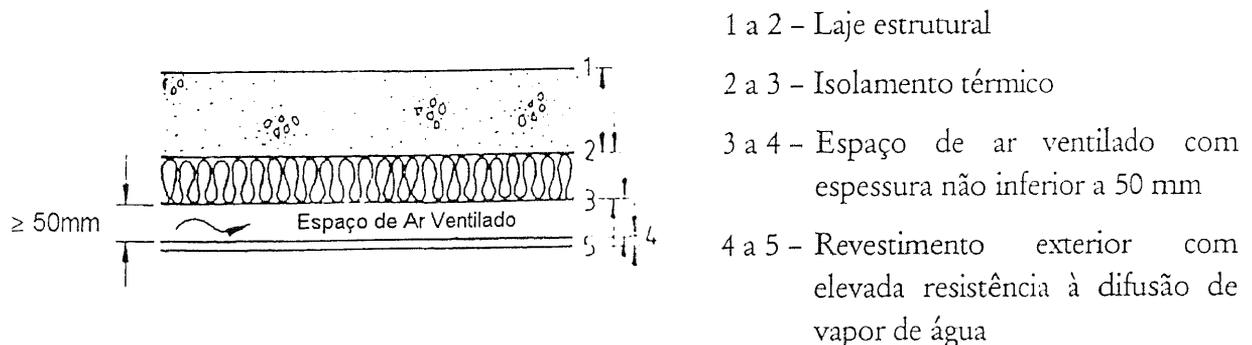


Figura 5.27 – Pavimentos exteriores elevados com isolamento térmico aplicado sob a estrutura de suporte e revestimento exterior descontínuo [17]

Nos pavimentos em que a camada de isolamento térmico é aplicada sob a estrutura de suporte, a humidade que atinja essa estrutura (a humidade de construção e com causas fortuitas são as mais comuns) terá maior dificuldade de transferência para o exterior, aumentando os riscos de degradação dos acabamentos interiores, o que se torna particularmente preocupante em pavimentos com revestimento à base de madeira ou em materiais pouco permeáveis, como por exemplo os linóleos. Assim, para além das recomendações já apresentadas, nestes casos é desejável que todas as camadas situadas sob a estrutura de suporte, incluindo as de isolamento térmico, não dificultem a transferência de água, o que poderá ser contraditório com outros requisitos já mencionados.

Por último, apresenta-se a situação de pavimentos exteriores elevados com estrutura de suporte descontínua (vigas ou barrotes). Nestes casos, desde que as camadas subjacentes ao isolamento térmico não tenham elevada resistência à difusão de vapor, os riscos de ocorrência de condensações internas são baixos. Contudo, se as camadas subjacentes ao isolamento ou a própria camada de isolamento térmico forem pouco permeáveis ao vapor de água, então os riscos de degradação do pavimento são mais elevados.

Se o acabamento interior for em madeira e a estrutura de suporte em metal ou betão, são necessários alguns cuidados. Nestes casos, e nas situações em que os elementos pontuais da estrutura de suporte formem uma ponte térmica importante através da camada de isolamento, a madeira de acabamento não deve ser aplicada directamente sobre a estrutura de suporte, pois as condensações que podem resultar daí podem provocar o seu colapso [17].

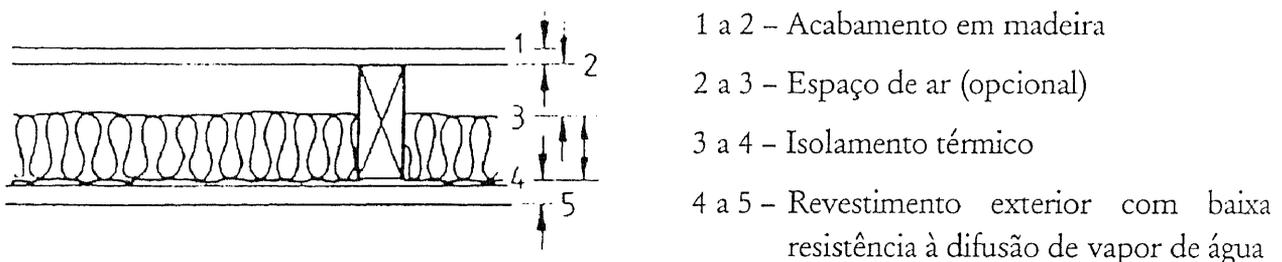


Figura 5.28 – Pavimentos exteriores elevados com acabamento em madeira e estrutura de suporte descontínua [17]

5.4.3 PAVIMENTOS TÉRREOS

Nos pavimentos térreos, apesar de na estação fria o fluxo de vapor de água normalmente se verificar no sentido descendente, existe a possibilidade de, em espaços não aquecidos, o sentido do fluxo se inverter, devido ao seu estado de saturação e à sua inércia térmica, que permite temperaturas superiores às do ambiente, que arrefece mais rapidamente.

Faça a este risco, nos pavimentos com revestimento pouco permeável ao vapor, como acontece por exemplo com as madeiras envernizadas ou os linóleos [17], são elevados os riscos de ocorrência de condensações sob esses revestimentos, a menos que exista uma camada subjacente com elevada resistência à difusão de vapor.

Nos pavimentos térreos, normalmente, aconselha-se a aplicação de uma membrana estanque para evitar a ascensão de humidade, que na generalidade dos casos oferece a resistência à difusão de vapor suficiente. Contudo, a sua aplicação terá que ser cuidada para evitar perfurações ou outras deficiências que comprometam a sua estanquidade.

Apesar de em Portugal não ser corrente a aplicação de isolamento térmico em pavimentos térreos, em seguida apresentam-se as recomendações da BSI 5250 [17] para a realização deste tipo de pavimentos. Nestes casos, uma vez que é aplicado isolamento térmico, deixa de ser provável a existência de problemas devido à ocorrência de fluxo no sentido ascendente.

Nos pavimentos em que a camada de isolamento térmico é aplicada sobre o massame de betão (Figura 5.29), podem ocorrer condensações na face superior do massame (na medida em que o fluxo se dá normalmente no sentido descendente). Se forem consideradas prejudiciais, deve aplicar-se uma barreira pára-vapor sobre o isolante térmico, com uma permeância não superior a cerca de $4 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ [17].

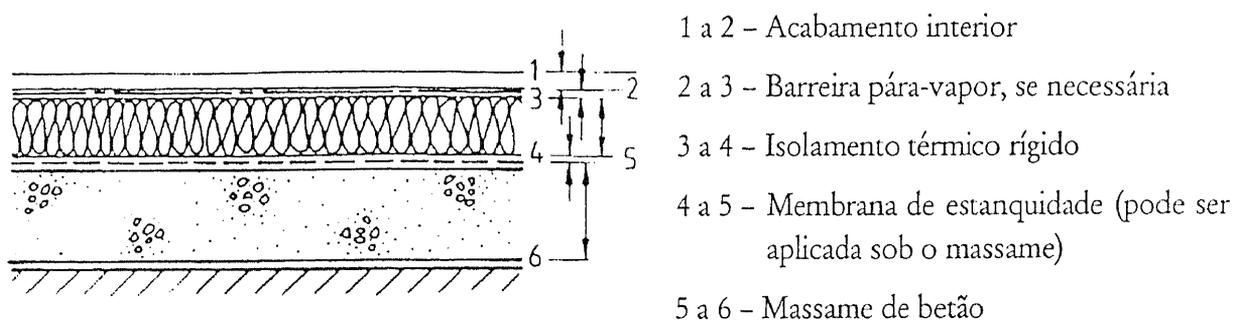


Figura 5.29 – Pavimentos térreos com isolamento térmico sobre o massame [17]

Nos pavimentos térreos em que a camada de isolamento térmico é aplicada sob o massame de betão (Figura 5.30), deve aplicar-se uma barreira pára-vapor sobre a camada de isolamento térmico, com uma permeância não superior a cerca de $2 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ [17], actuando também como membrana de estanquidade.

Nestes casos, a camada de isolamento térmico deverá ter capacidade para resistir às cargas superiores, mais elevadas, e não deverá absorver humidade [17].

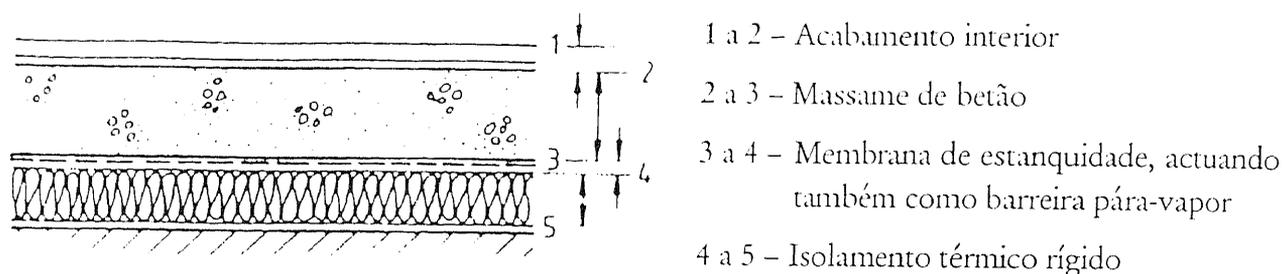


Figura 5.30 – Pavimentos térreos com isolamento térmico sob o massame [17]

Refira-se que em Portugal não é corrente aplicar isolamento térmico em pavimentos térreos, pelo que a necessidade de aplicação de uma barreira pára-vapor, que geralmente actua também como membrana de estanquidade, depende da sensibilidade à humidade dos componentes, nomeadamente dos revestimentos. Exemplos de pavimentos que levantam este tipo de preocupações são os pavimentos com revestimento em madeira ou à base de membranas pouco permeáveis, coladas com materiais sensíveis à humidade.

Nestes casos deve aplicar-se uma barreira pára-vapor sob o massame de betão, com uma permeância não superior a cerca de $2 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. A aplicação dessa barreira deverá ser efectuada em condições que garantam o seu bom funcionamento, pelo que, se for necessário, deverá ser aplicada sobre uma camada de regularização adequada.

5.4.4 PAVIMENTOS SUSPENSOS

A BSI 5250 [17] prevê dois tipos de pavimentos suspensos, ambos com isolamento térmico, que são os pavimentos em madeira, com estrutura de suporte descontínua (Figura 5.31), e os pavimentos com estrutura de suporte em laje prefabricada de betão e isolamento térmico sobre a laje (Figura 5.32).

Nos pavimentos de madeira, os riscos de ocorrência de condensações internas são baixos. Contudo, deve existir ventilação cruzada do espaço de ar, por forma a evitar a degradação dos componentes do pavimento. A secção dos orifícios de ventilação deverá respeitar o mais condicionante dos seguintes valores [17]:

- 1500 mm^2 por cada metro de desenvolvimento do perímetro do pavimento;
- 500 mm^2 por cada m^2 de área de pavimento.

Nestes casos, a camada de isolamento e eventuais camadas subjacentes preferencialmente deverão apresentar elevada permeabilidade ao vapor, caso contrário qualquer humidade que atinja as camadas superiores terá mais dificuldade de secagem. Pela mesma razão, não se devem utilizar barreiras pára-vapor neste tipo de elementos.

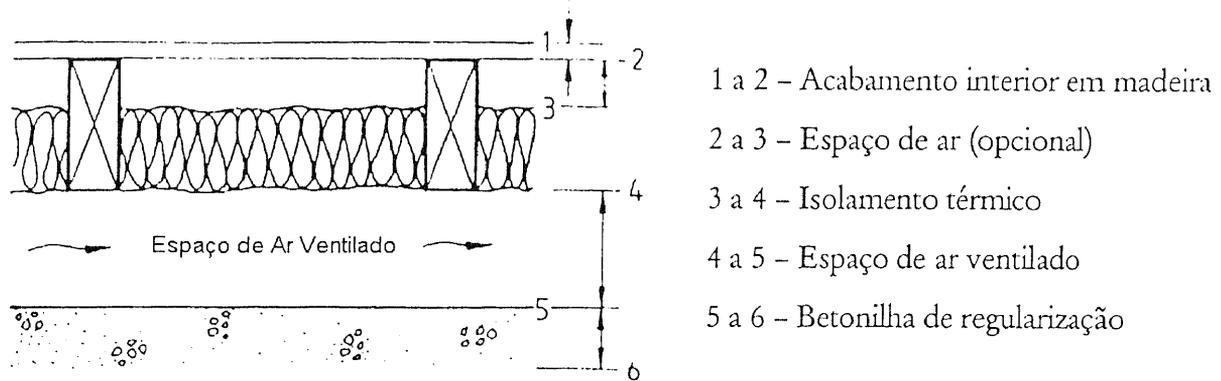


Figura 5.31 – Pavimentos suspensos em madeira [17]

Nos pavimentos suspensos com estrutura de suporte em laje prefabricada de betão e isolamento térmico sobre a laje é provável a ocorrência de condensações na face superior da laje. Se for considerada prejudicial, o que normalmente não acontece, deverá aplicar-se uma barreira pára-vapor sobre a camada de isolamento. Deve ventilar-se o espaço de ar criado, para evitar humidades relativas elevadas nesse espaço [17].

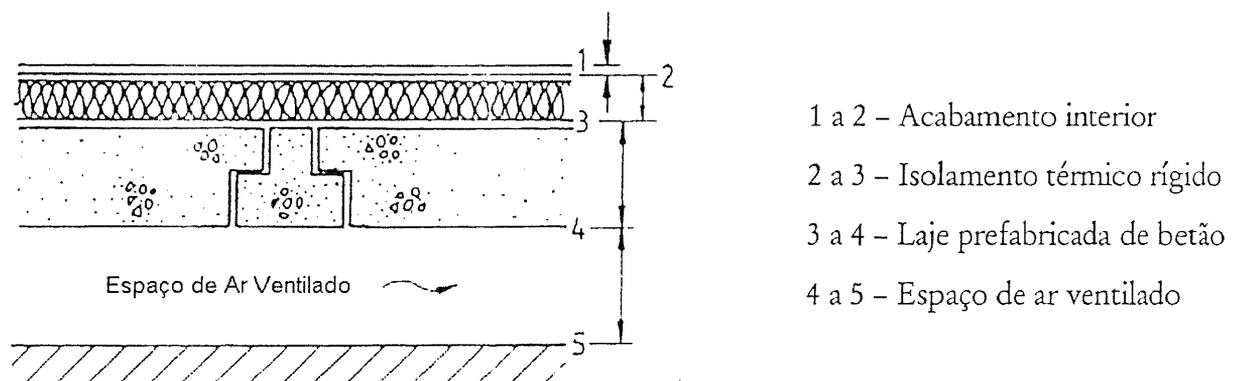


Figura 5.32 – Pavimentos suspensos com estrutura de suporte em laje prefabricada de betão [17]

6. CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema das condensações internas tem evidenciado a importância dos estudos da transferência de vapor de água através da envolvente dos edifícios e a necessidade em definir regras qualitativas e quantitativas para a concepção dos elementos que a constituem, face à difusão de vapor de água.

Um dos componentes que poderá ser de grande importância no controlo deste fenómeno são as barreiras pára-vapor, pelo que se tentou no presente trabalho apresentar os principais parâmetros a ter em conta na sua selecção e aplicação.

Dos parâmetros referidos, realça-se a importância do conhecimento das características de permeabilidade ao vapor, pelo que se desenvolveu uma campanha experimental com vista à determinação dessas características, para alguns materiais que podem ser utilizados como barreiras pára-vapor.

Esta tarefa é bastante exigente, uma vez que a normalização existente para este tipo de ensaios encontra-se bastante desenvolvida, obrigando a atender a vários aspectos. Alguns destes aspectos não foram respeitados nos ensaios que se realizaram, pelo que os respectivos resultados não devem ser utilizados sem alguma precaução.

No que toca às restantes características das barreiras pára-vapor que influenciam a sua escolha e aplicação, indicam-se os principais critérios a considerar e em alguns casos indicam-se também alguns ensaios que podem ser efectuados para avaliar esses parâmetros de forma mais objectiva. Estas indicações baseiam-se sobretudo na normalização dos Estados Unidos da América, não se conhecendo documentação europeia tão desenvolvida nesta área.

Neste trabalho, apresentam-se também algumas regras de concepção de elementos construtivos face à difusão de vapor, retiradas de diversa bibliografia estrangeira, válidas para as situações mais correntes.

Nos edifícios com forte solicitação face à difusão de vapor – edifícios com higrometria muito forte - é imprescindível simular a transferência de vapor de água através dos elementos da sua envolvente, por forma a avaliar os riscos de ocorrência de condensações internas. Um dos modelos mais utilizados, em engenharia civil, na análise deste fenómeno é o modelo de Glaser, devido à sua facilidade de exploração gráfica.

A prEN ISO 13788 [52] sugere uma metodologia para o cálculo de condensações internas em elementos construtivos que tem como base o modelo de Glaser, com a diferença de tomar em consideração o efeito da secagem.

O programa “CONDENSA”, desenvolvido no Laboratório de Física das Construções – LFC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP com base no modelo de Glaser, constitui uma ferramenta de grande utilidade na modelação do problema das condensações internas. Refira-se, contudo, que este programa não toma em consideração o efeito da secagem.

Para a realização de estudos de simulação da transferência de vapor através dos elementos construtivos é necessário conhecer as características higrotérmicas dos ambientes adjacentes, assim como as características de condutibilidade térmica e de permeabilidade ao vapor dos diferentes componentes. Assim, procurou-se explicitar os principais parâmetros utilizados em psicrometria (temperatura, humidade relativa, etc.), apontaram-se critérios para estimar as solicitações higrotérmicas a que a envolvente dos edifícios é sujeita e no Anexo II apresentam-se as características de permeabilidade ao vapor de diversos materiais e elementos de construção, recolhidas em bibliografia da especialidade.

6.2 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

As características de permeabilidade ao vapor são as que maior influência exercem na escolha e aplicação de barreiras pára-vapor, existindo uma classificação deste tipo de componentes face a este parâmetro.

No entanto, existem outras propriedades que poderão ter maior ou menor importância no desempenho de uma barreira pára-vapor, de acordo com o tipo de aplicação pretendida, tais como:

- Resistência mecânica, nomeadamente a esforços de tracção, punçãoamento, etc.;
- Elasticidade;
- Estabilidade dimensional;
- Estabilidade higrotérmica;
- Resistência a agentes de deterioração;
- Facilidade de fabrico, aplicação e selagem das juntas;
- Adequado comportamento ao fogo;
- Aderência (normalmente sem importância para barreiras do tipo membrana);
- Etc..

Da bibliografia consultada, apenas a de origem Norte Americana apresenta critérios de avaliação destes parâmetros.

Os ensaios de determinação das características de permeabilidade ao vapor de materiais e elementos de construção encontram-se já num estado de desenvolvimento que obriga a grandes cuidados na sua realização, que nem sempre foi possível atender nos ensaios realizados. De qualquer modo, é possível salientar os seguintes aspectos, relativamente a este tipo de ensaios:

- A configuração das tinas de ensaio utilizadas não foi a mais adequada, particularmente para os provetes mais permeáveis ao vapor. Nestes casos, a quantidade de dissecante utilizada revelou-se insuficiente, pois rapidamente se atingiram os valores máximos de adsorção de humidade permitidos;
- A prEN ISO 12572 [53] não faz qualquer distinção entre dissecantes, no que toca à máxima quantidade de humidade que podem adsorver. A distinção que é feita pela ASTM E 96 [11] parece mais correcta;
- Recomenda-se a utilização de tinas com maiores dimensões e com capacidade para colocar um volume de substância condicionadora suficiente, para que os ensaios decorram sem que esse volume condicione o final prematuro dos ensaios;
- Convém efectuar previamente uma estimativa da permeância dos provetes, por forma a seleccionar convenientemente os intervalos entre pesagens, em função da precisão pretendida e dos equipamentos de ensaio disponíveis;
- De preferência, devem utilizar-se tinas que permitam uma área útil de ensaio superior a 500 cm², minimizando assim os factores de erro nos resultados. A área útil deverá ser o mais próxima possível da área total dos provetes, assim como as áreas livres em contacto com as duas ambiências de ensaio também deverão ser o mais próximas possível;
- Não se devem ensaiar simultaneamente provetes com características de permeabilidade ao vapor muito distintas, pois obriga a diferentes intervalos entre pesagens, difíceis de compatibilizar;
- Para cada material ou elemento construtivo a testar deve ser ensaiado um provete de referência, de modo a avaliar convenientemente o efeito das variações de pressão atmosférica e outros factores de erro que possam surgir;
- No ensaio de películas de revestimento, é possível que a escolha do betão celular como material de suporte não tenha sido a mais adequada, uma vez que este apresenta bastantes vazios.

No que toca aos resultados obtidos nos ensaios realizados, refira-se o seguinte:

- Os resultados obtidos nos ensaios de telas betuminosas são bastante dispersos, pelo que não se determinaram as respectivas características de permeabilidade ao vapor. Esta dispersão deverá estar relacionada com a reduzida dimensão das tinas de ensaio, ao curto intervalo de tempo entre pesagens e às variações da pressão barométrica;

- As películas de revestimento ensaiadas também apresentaram alguma dispersão de resultados, com excepção da emulsão betuminosa do tipo_1. Para os restantes materiais a dispersão foi mais acentuada nos provetes em que foram aplicadas menores quantidades de material de revestimento, excepto nos provetes revestidos com pintura betuminosa do tipo_2. Admite-se que o tipo de suporte utilizado também esteja na origem das diferenças verificadas;
- Recomenda-se um apertado controlo das condições de aplicação de películas de revestimento, que deverão ser o mais próximas possível das que serão utilizadas na aplicação prática dessas películas e deverão ser devidamente descritas nos relatórios de ensaio.

Relativamente às regras de concepção dos elementos construtivos face à difusão de vapor de água, salientam-se os seguintes aspectos:

- As paredes da envolvente normalmente utilizadas entre nós não apresentam problemas de condensações internas nas aplicações correntes. As situações mais preocupantes correspondem a soluções com isolamento pelo interior e camadas exteriores (suporte e revestimento exterior) pouco permeáveis. Nas soluções com isolamento pelo exterior, o revestimento exterior deverá ter uma permeância ao vapor de água elevada, caso contrário é necessário criar um espaço de ar entre isolamento e revestimento exterior, convenientemente ventilado;
- As coberturas em terraço do tipo tradicional acarretam riscos elevados de ocorrência de condensações internas, caso não incluam uma barreira pára-vapor convenientemente localizada. Pelo contrário, as “coberturas invertidas” normalmente não apresentam problemas deste tipo;
- Para as coberturas inclinadas existe, na bibliografia estrangeira, uma série de recomendações para evitar problemas de condensações internas. Estas recomendações estão sobretudo relacionadas com a ventilação de espaços de ar na cobertura e com as características de permeabilidade ao vapor mais adequadas para os diferentes componentes da cobertura, em particular das camadas situadas pelo interior de eventuais isolantes térmicos. Refira-se, no entanto, que algumas das regras apresentada pelo CSTB (que são muito vastas) são um pouco discutíveis, uma vez que para coberturas que, à partida, deveriam apresentar um comportamento idêntico face ao problema das condensações internas, são indicadas regras diferentes. É possível que as diferentes alturas de elaboração dos textos consultados possa explicar parte destas diferenças;
- Nos pavimentos, as situações mais preocupantes verificam-se nos pavimentos térreos com revestimentos (ou outros componentes) sensíveis à humedificação. Nestas situações é imprescindível a utilização de uma barreira pára-vapor, cujo comportamento deverá ser adequado face às diferentes solicitações a que estará sujeita;

- Nos elementos construtivos de estrutura mais leve, o problema das condensações internas normalmente é mais importante, face à maior dificuldade de compatibilização das diferentes exigências funcionais. Nestes casos, as “barreiras inteligentes” surgem como soluções com um comportamento interessante deste ponto de vista, podendo ajudar a resolver problemas dificilmente contornáveis com os materiais mais convencionais. Refira-se, contudo, que os métodos tradicionais de ensaio para determinação das características de permeabilidade ao vapor poderão não ser adequados para este tipo de materiais. Além disso, o seu princípio de funcionamento assenta em pressupostos relacionados com as condições de utilização dos edifícios que deverão ser devidamente equacionados, caso contrário a sua utilização poderá não acarretar melhorias face às soluções mais tradicionais.

6.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO

Com o presente trabalho pretendeu-se dar um contributo ao estudo do comportamento dos elementos construtivos face à humidade, em particular da que resulta de problemas de condensações internas. No entanto, existe ainda um vasto campo de investigação neste domínio, do qual se podem referir os seguintes aspectos mais imediatos:

- É necessário estabelecer critérios objectivos para selecção das barreiras pára-vapor em função do fim a que se destinam, baseados na determinação experimental de parâmetros que permitam uma classificação desses critérios de selecção. Deste ponto de vista, a prática Norte Americana deverá ser convenientemente estudada;
- Os métodos de ensaio para determinação das características de permeabilidade ao vapor dos materiais poderão não ser os mais apropriados para utilização com materiais recentes, sendo necessário encontrar critérios de actuação nestas situações;
- Os modelos de simulação das transferências de vapor têm ainda um largo espaço de desenvolvimento. Contudo, a curto prazo é necessário introduzir o fenómeno da secagem nos modelos de cálculo mais básicos, atendendo às recomendações da prEN ISO 13788 [52];
- Para a utilização dos modelos de simulação é imprescindível conhecer as características de comportamento higrotérmico dos diferentes materiais e elementos construtivos, assim como os dados climáticos. É portanto necessário reunir esforços com vista à disponibilização destes dados;
- Com base nos novos modelos de simulação disponíveis, deve efectuar-se um estudo sobre os riscos de ocorrência de condensações internas nos elementos construtivos mais correntes, divulgando convenientemente essa informação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alaman, A.. *Condições Higrotérmicas de Confort em Edifícios* - Monografias del Instituto Eduardo Torroja de la construcción e del cemento (I.E.T.c.c.), n.º 268. Madrid, I.E.T.c.c., 1968.
- [2] Alaman, A.; Yraola, F. Aguirre de. *Condensaciones en Edificación* - Monografias del Instituto Eduardo Torroja de la construcción e del cemento (I.E.T.c.c.), n.º 250. Madrid, I.E.T.c.c., 1965.
- [3] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). *ASHRAE Handbook - 1993 Fundamentals*. Nova Iorque, ASHRAE, 1993.
- [4] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). *Psychrometrics. Theory and Practice*. Atlanta, ASHRAE, 1996.
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate of Sheet Materials Using a Rapid Technique for Dynamic Measurement*. E 398-83. Filadélfia, ASTM, 1983 (reaprovada em 1988).
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Practice for Selection of Vapor Retarders for Thermal Insulation*. C 755-85. Filadélfia, ASTM, 1985 (reaprovada em 1990).
- [7] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Specification for Asphalt-Coated Glass Fiber Base Sheet Used in Roofing*. D 4601-86. Filadélfia, ASTM, 1986.
- [8] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Methods for Water Vapor Retarders Used in Contact with Earth Under Concrete Slabs, on Walls, or as Ground Cover*. E 154-88. Filadélfia, ASTM, 1988.
- [9] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Specification for Flexible, Low Permeance Vapor Retarders for Thermal Insulation*. C 1136-90. Filadélfia, ASTM, 1990.
- [10] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Practices for Increasing Durability of Building Constructions Against Water-Induced Damage*. E 241-90. Filadélfia, ASTM, 1990.
- [11] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. E 96-94. Filadélfia, ASTM, 1994.
- [12] APICER – Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica. *Manual de Aplicação de Telhas Cerâmicas*. Coimbra, 1998.
- [13] APICER – Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica. *Manual de Alvenaria de Tijolo*. Coimbra, 2000.
- [14] Association Française de Normalization (AFNOR). *Isolants Thermiques Destinés au Bâtiment. Vocabulaire relatif à l'humidité* - Norme Française NF P 75-102. Paris, AFNOR, 1987.
- [15] Berthier, Jack. *Diffusion de Vapeur au Travers des Parois. Condensation* - REEF, Volume II - Sciences du Bâtiment. Paris, CSTB (Imprimerie Maulde et Renou), 1980.

- [16] Bories, S.. *Transferts de Chaleur et de Masse Dans les Matériaux. Analyse Critique des Différents Modèles Mathématiques Utilisés.* - Seminário “L’Humidité Dans le Bâtiment”. Saint-Rémy-lès-Chevreuse, França, 23 a 25 de 1982.
- [17] British Standards Institution (BSI). *British Standard Code of Practice for Control of Condensation in Buildings.* BS 5250 : 1989. Londres, BSI, 1989.
- [18] Building Research Establishment (BRE). *Insulated External Cladding Systems.* Good Building Guide GBG 31. BRE, Reino Unido, 1999.
- [19] Burch, D. M.; Thomas, W. C.; Fanney, A. H.. *Water Vapor Permeability Measurements of Common Building Materials.* pp 69-77 de “Control of Humidity in Buildings” - ASHRAE Technical Data Bulletin, Volume 8, Number 3, Coleção de comunicações dos encontros da American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. (ASHRAE) em Anaheim, California, e em Baltimore, Maryland, em Janeiro e Junho de 1992. Atlanta, ASHRAE, 1992.
- [20] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Travaux de Couverture par Grands Éléments Métalliques en Feuilles et Bandes Aluminium.* Document Technique Unifié - DTU 40.42. Paris, CSTB, 1965.
- [21] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Travaux de Couverture par Grands Éléments Métalliques en Feuilles et Bandes Acier Galvanisé.* Document Technique Unifié - DTU 40.43. Paris, CSTB, 1965.
- [22] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Travaux de Couverture en Plaques Ondulées Métalliques.* Document Technique Unifié - DTU 40.32. Paris, CSTB, 1967.
- [23] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Murs Extérieurs en Panneaux Préfabriqués de Grandes Dimensions du Type Plaque Pleine ou Nervurée en Béton Ordinaire.* Document Technique Unifié - DTU 22.1. Paris, CSTB, 1980.
- [24] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Systèmes d’Isolation Thermique des Façades par l’Extérieur Faisant l’Objet d’Un Avis Technique - Conditions Générales d’Emploi.* CSTB, 1983.
- [25] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couverture en Tuiles Plates en Béton.* Document Technique Unifié - DTU 40.25. Paris, CSTB, 1984.
- [26] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Classement EdR des Éléments de Remplissage de Façades Légères Faisant l’Objet d’Un Avis Technique.* CSTB, 1986.
- [27] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Classement re VETIR des Systèmes d’Isolation Thermique des Façades par l’Extérieur - Définition et Emploi.* Cahier 2153 du CSTB. CSTB, 1987.
- [28] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couvertures par Éléments Métalliques en Feuilles et Longues Feuilles en Zinc.* Document Technique Unifié - DTU 40.41. Paris, CSTB, 1987.
- [29] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couverture en Tuiles Planes en Béton à Glissement et à Emboîtement Longitudinal.* Document Technique Unifié - DTU 40.241. Paris, CSTB, 1990.

- [30] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couverture en Bandeaux Bétonés*. Document Technique Unifié - DTU 40.14. Paris, CSTB, 1993.
- [31] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couverture en Tuiles Canal de Terre Cuite*. Document Technique Unifié - DTU 40.22. Paris, CSTB, 1993.
- [32] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couverture en Tuiles en Béton à Glissement et à Emboîtement Longitudinal*. Document Technique Unifié - DTU 40.24. Paris, CSTB, 1993.
- [33] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couverture en Plaques Nervurées d'Aluminium Prélaqué ou Non*. Document Technique Unifié - DTU 40.36. Paris, CSTB, 1993.
- [34] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couvertures par Éléments Métalliques en Feuilles et Longues Feuilles en Cuivre*. Document Technique Unifié - DTU 40.45. Paris, CSTB, 1993.
- [35] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couvertures par Éléments Métalliques en Feuilles et Longues Feuilles en Acier Inoxydable Étamé*. Document Technique Unifié - DTU 40.44. Paris, CSTB, 1994.
- [36] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Le Mur Manteau: Protection Hygrothermique du Gros Œuvre des Bâtiments*. Cahier 2712 du CSTB. CSTB, 1994.
- [37] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Le Mur Manteau: Synthèse des Règles et Codes*. Cahier 2719 du CSTB. CSTB, 1994.
- [38] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Travaux de Couverture en Plomb Sur Support Continu*. Document Technique Unifié - DTU 40.46. Paris, CSTB, 1994.
- [39] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Ouvrages en Maçonnerie de Petits Éléments - Parois et Murs*. Document Technique Unifié - DTU 20.1. Paris, CSTB, 1995.
- [40] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couvertures en Tuiles de Terre Cuite à Emboîtement à Pureau Plat*. Document Technique Unifié - DTU 40.211. Paris, CSTB, 1996.
- [41] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couvertures en Tuiles Plates de Terre Cuite*. Document Technique Unifié - DTU 40.23. Paris, CSTB, 1996.
- [42] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couvertures en Tuiles de Terre Cuite à Emboîtement ou à Glissement à Relief*. Document Technique Unifié - DTU 40.21. Paris, CSTB, 1997.
- [43] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Couverture en Plaques Nervurées Issues de Tôles d'Acier Revêtues*. Document Technique Unifié - DTU 40.35. Paris, CSTB, 1997.
- [44] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). *Ossature Métallique et Isolation Thermique des Bardages Rapportés Faisant l'Objet d'Un Avis Technique ou d'Un Constat de Traditionalité - Conditions Générales de Conception et de Mise en Œuvre*. CSTB, 2000.
- [45] Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). *Compositions de Toitures en Fonction des Données Hygrothermiques - Toitures Versants. Toitures Plates*. Bruxelles, CSTC, 1980.

- [46] Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). *Comportement à l'Humidité des Éléments de Construction. Application aux toitures*. Bruxelles, CSTC, 1982 (revue n.º 1).
- [47] Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). *Problèmes d'Humidité dans les Bâtiments - Causes des Dégénéralations. Ponts Thermiques. Climat Intérieur - Données pour la conception et l'exécution des bâtiments. Conditions d'occupation des bâtiments*. Bruxelles, CSTC, 1984.
- [48] Couasnet, Yves. *Contribution à l'Étude du Transfert de Vapeur d'Eau en Régime Permanent et Non Stationnaire dans les Matériaux Poreux Hygroscopiques* - CSTB, Études et Recherches. Cahier 2349 du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Paris, CSTB, 1989.
- [49] Couasnet, Yves. *Les Condensations dans les Bâtiments, Guide pratique et éléments d'analyse*. Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1990.
- [50] Delcelier, Pierre. *Transferts de Vapeur* - CSTB, Études et Recherches - Cahier 2322 du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Paris, CSTB, 1989.
- [51] Deutsches Institut für Normung (DIN). *Wärmeschutz im Hochbau* - DIN 4108. Berlin, Normenausschuß Bauwesen (NABau), 1981.
- [52] European Committee for Standardization (CEN). *Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods*. prEN ISO 13788 (Working draft), GTR WI 46, CEN/TC 89 WI 29. CEN/TC 89/WG 10 N 240rev., Outubro de 1999.
- [53] European Committee for Standardization (CEN). *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapor transmission properties*. prEN ISO 12572 (Final Draft). Bruxelles, CEN, Abril de 2000.
- [54] Farinha, J. S. Brazão; Reis, A. Correia dos. *Tabelas Técnicas*. Edições Técnicas E.T.L., L.da, 1996.
- [55] Fauconnier, R.; Florence, B.; Laugier, D.. *Le transfert de l'Humidité dans les Matériaux Isolants*. Saint-Rémy-lès-Chevreuse, COSTIC, 1979.
- [56] Faustino, Jorge. *Análise de Soluções Construtivas Face à Difusão de Vapor. Importância da composição e do clima* - Dissertação de mestrado. Porto, LFC/FEUP, 1997.
- [57] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). *Product development / smart vapour retarder*. http://www.hoki.ibp.fhg.de/ibp/produktentwicklung/dampfbremse/dampfbremse_e.html. IBP, 2001.
- [58] Freitas, Vasco Peixoto de. *Transferts d'Humidité dans les Systèmes d'Isolation Extérieure Avec Peau Étanche en Régime Stationnaire*. Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées, 1985.
- [59] Freitas, Vasco Peixoto de. *Comportamento à Humidade da Envoltente dos Edifícios* - 2^{as} Jornadas de Física e Tecnologia de Edifícios. Porto, FEUP, 1986.
- [60] Freitas, Vasco Peixoto de. *Étude Expérimentale de l'Humidité de l'Air dans l'Intérieur des Bâtiments* - CIB-W40, Borås Meeting. Suécia, 1987.

- [61] Freitas, Vasco Peixoto de. *Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior*. Materiais de Construção, n.º 13, Janeiro/Fevereiro 1987, pp. 45-47. APCMC, Porto, 1987.
- [62] Freitas, Vasco Peixoto de. *Condensações Internas e sua Variação com as Condições de Utilização dos Edifícios* - Seminário sobre o comportamento à humidade da envolvente dos edifícios. Porto, FEUP, 1988.
- [63] Freitas, Vasco Peixoto de; Abrantes, Vitor. *Étude Expérimentale de l'Humidité de l'Air dans l'Intérieur des Bâtiments – Influence du Comportement Hygroscopique des Matériaux* – CIB Cenférece, Healthy Buildings'88. Stockholm, Sweden, 1988.
- [64] Freitas, Vasco Peixoto de. *Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios. Análise do fenómeno de interface* - Tese de doutoramento. Porto, FEUP, 1992.
- [65] Freitas, Vasco Peixoto de. *Humidade em edifícios. Condensações* - Acção de formação complementar para Engenheiros Civis. Porto, FEUP, 1994.
- [66] Freitas, Vasco Peixoto de; Pinto, Manuel. *Metodologia para a Definição Exigencial de Isolantes Térmicos*. Nota de Informação Técnica – NIT_001. Porto, LFC/FEUP, 1997.
- [67] Freitas, Vasco Peixoto de. *Influência dos Elementos Estruturais no Comportamento Higrotérmico da Envolvente dos Edifícios*. 2.as Jornadas de Estruturas de Betão, sobre “Comportamento em Serviço de Estruturas de Betão”. pp. 117 a 132. FEUP, Porto, 1998.
- [68] Freitas, Vasco Peixoto de; Pinto, Paulo da Silva. *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção – Condensações Internas*. Nota de Informação Técnica – NIT_002. Porto, LFC/FEUP, 1998.
- [69] Gomes, José António Furtado Figueiredo. *Características Básicas dos Materiais de Construção Aplicáveis à Térmica dos Edifícios*. Guarda, Instituto Politécnico da Guarda - Escola Superior de Tecnologia e Gestão - Departamento de Engenharia da Construção Civil - Física das Construções, 1994.
- [70] Grunau, Edvard B.. *La Lutte Contre l'Humidité dans les Façades* - Traduit par René Lucron. Paris, Eyrolles, 1970.
- [71] Handegord, G. O.. *Vapour Barriers in Home Construction*. Canadian Building Digest – CBD-9. National Research Council Canada, 1960 (publicação original).
- [72] Hedenblad, Göran. *Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Mortar and Cement Paste*. Lund, Division of Building Materials - Lund Institute of Technology, 1993.
- [73] Henriques, Fernando M. A.. *Condensações em Paredes de Edifícios* - Relatório 195/85, NCCt. Lisboa, LNEC, 1985.
- [74] Henriques, Fernando M. A.. *Critérios de Qualidade para Diminuir os Riscos de Condensações em Paredes de Edifícios* - Relatório 287/88, NCCt. Lisboa, LNEC, 1988.
- [75] Hens, H.. *Material Properties*. Capítulo 1 de: *Condensation and Energy*. Sourcebook - Report Annex XIV, Volume 1 - Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme. International Energy Agency (IEA), 1991.

- [76] Hens, H. *Modelling: Hygric Aspects*. Capítulo 4 de: *Condensation and Energy. Sourcebook - Report Annex XIV, Volume 1 - Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*. International Energy Agency (IEA), 1991.
- [77] Instituto Português da Qualidade (IPQ). *Materiais Plásticos. Materiais celulares rígidos. Determinação da permeabilidade ao vapor de água* - Norma Portuguesa NP 2256. Lisboa, IPQ, 1988.
- [78] International Energy Agency (IEA). *Condensation and Energy. Guidelines & Practice - Report Annex XIV, Volume 2 - Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*. IEA, 1991.
- [79] International Energy Agency (IEA). *Condensation and Energy. Catalogue of Material Properties - Report Annex XIV, Volume 3*. IEA, 1991.
- [80] International Energy Agency (IEA). *Condensation and Energy, Catalogue of Material Properties - Report Annex XIV, Upgraded version*. IEA, 1994.
- [81] Korsgaard, Vagn; Bunch-Nielsen, Tommy; Rode, Carsten. *The Self-Drying Concept for Flat Roofs*. Reimpressão retirada do 9.º Congresso da Associação Internacional de Estanquidade, em Amsterdão, de 26 a 28 de Abril de 1995.
- [82] Künzle, Hartwig M.. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One and two-dimensional calculation using simple parameters*. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau. Estugarda, IRB Verlag, 1995.
- [83] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). *Revestimentos com Base em Ligantes Sintéticos. Determinação da Permeabilidade ao Vapor de Água* - Ficha de Ensaio FE Pa 17. Lisboa, LNEC, 1980.
- [84] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). *Hidrófugos de Superfície. Determinação da Permeabilidade ao Vapor de Água* - Ficha de Ensaio FE Hu 11. Lisboa, LNEC.
- [85] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). *Ensaio de Isolamentos Térmicos. Determinação da Permeabilidade ao Vapor de Água de Materiais de Construção e de Isolamento. Técnica de Ensaio e Interpretação dos Resultados* - Tradução da norma "DIN 52 615, Blatt 1", de 1973 - ICT, Tradução 640. Lisboa, LNEC, 1986.
- [86] Lanzinha, João. *Propriedades Higrotémicas de Materiais de Construção* - Dissertação de mestrado. Coimbra, LFC/FCTUC, 1998.
- [87] Latta, J. K.. *Vapour Barriers: What are they? Are they Effective?*. CBD-175. National Research Council Canada, 1976 (publicação original).
- [88] Matana, Michel. *Humidité. Diagnostic - Remontées d'eau du sol - Infiltrations - Condensation*. Paris, Éditions Alternatives, 1995.
- [89] Medeiros, Hermano de. *Paredes Exteriores: Juntas de dilatação e transmissão de humidades e de vapor de água através de paredes* - Paredes de Edifícios, Curso de Promoção Profissional 510, Documento 11. Lisboa, LNEC, 1975.

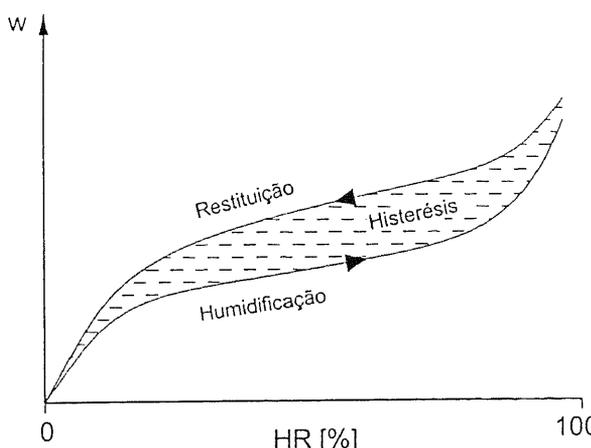
- [90] *Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios.*
- [91] Norma Holandesa *SBR - Report 9.* Em [79], pp. 1.9 – 1.19.
- [92] Oliveira, Carlos Rafael. *Permeabilidade ao Vapor de Pinturas Exteriores* - Dissertação de mestrado. Porto, LFC/FEUP, 1996.
- [93] *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE.* Decreto-Lei n.º 40/90, de 06 de Fevereiro. Porto, Porto Editora, 1993.
- [94] Santos, C. A. Pina dos; Paiva, J. A. Vasconcelos de. *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios.* ICT, Informação Técnica, Edifícios, ITE 28. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1996.
- [95] Silva, A. Cavaleiro e. *Elementos de Termodinâmica do Ar Húmido* - Notas de leitura, 1ª parte. Lisboa, LNEC, 1965.
- [96] Speidel, K.. *Diffusion et Condensation de Vapeur d'Eau dans le Bâtiment, Processus physique, Calcul d'après une nouvelle méthode graphique* - Traduit et adapté de l'allemand par Jean-Louis Cauchepin. Paris, PYC Édition, 1983.
- [97] Straaten, J. F. van. *Thermal Performance of Buildings* - Architectural Science Series. Londres, Elsevier Publishing Company, 1967.
- [98] Teiga, Carlos. *Estudo do Comportamento Higrotérmico de Betões Leves de Poliestireno Expandido* - Trabalho de investigação desenvolvido no Laboratório de Física das Construções da FEUP, no âmbito do PRODEP II. Porto, FEUP, 1995.
- [99] Trechsel, Heinz R.. *Moisture Control in Buildings.* Filadélfia, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1994.
- [100] Trechsel, Heinz R.; Bomberg, Mark. *Water Vapour Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement.* Baltimore, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1989.
- [101] Tveit, Annanias. *Factors Affecting the Moisture Permeability of Porous Materials and the Calculation of Moisture Transport and Condensation Hazard in Building Structures.* Oslo, Norwegian Building Research Institute (NBI), 1966.
- [102] Vaz, M. G. Almeida. *Estudo da Permeabilidade ao Vapor de Água em Materiais de Construção* - Trabalho de investigação desenvolvido no Laboratório de Física das Construções da FEUP. Porto, LFC/FEUP, 1995.
- [103] Wiederhold, Pieter R.. *Water Vapor Measurement. Methods and Instrumentation.* Trabalho de investigação desenvolvido no Laboratório de Física das Construções da FEUP. Porto, LFC/FEUP, 1995.

Anexo I - TERMINOLOGIA

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Absorção	A <i>Absorção</i> é um processo que consiste na humidificação dos materiais porosos quando em contacto com água líquida, por sucção/capilaridade.		
Adsorção	A <i>Adsorção</i> é o mecanismo pelo qual um material poroso retém moléculas de vapor de água na(s) superfície(s) dos poros, por forças químicas e/ou físicas. A máxima quantidade de humidade que um material pode reter por adsorção depende, sobretudo, da sua higroscopicidade e da humidade relativa da ambiência.		
Barreira Pára-Vapor	Uma <i>Barreira Pára-Vapor</i> é um material (ou componente construtivo) que restringe a transmissão de vapor de água e, portanto, possui uma elevada resistência à difusão de vapor. Burch, Thomas e Fanney [19] e a ASHRAE [3] referem o valor de $57,2 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ como sendo a permeância crítica (valor máximo) para classificar um determinado elemento como barreira pára-vapor. Outros autores propõem também uma classificação das barreiras pára-vapor em função da sua resistência à difusão de vapor de água (ver § 3).		
Capilaridade	A <i>Capilaridade</i> é o processo pelo qual um material absorve um líquido (água), por sucção, quando em contacto com esse mesmo líquido.		

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Coefficiente de Condutibilidade Térmica	O <i>Coefficiente de Condutibilidade Térmica</i> de um material representa a quantidade de calor que atravessa um provete desse material perpendicularmente às suas faces, planas e paralelas, por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre as duas faces.	λ	W/(m·°C); W/(m·K)
Coefficiente de Difusão do Vapor de Água no Ar	O <i>Coefficiente de Difusão do Vapor de Água no Ar</i> depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar. Alguns autores chegaram a diferentes expressões para a determinação deste coeficiente, sendo a de Schirmer a mais utilizada para cálculos em regime permanente: $D = 2,306 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{P_0}{P_t}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,81}$ Nesta expressão $P_0 = 101\,325$ Pa é a pressão atmosférica de referência e $T_0 = 273,15$ K (0 °C) é a temperatura de referência.	D	m ² /s
Coefficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água	O <i>Coefficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água</i> de um material homogêneo representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete desse material, perpendicularmente às suas faces planas e paralelas, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as faces.	π	kg/(m·s·Pa); g/(m·h·mmHg)
Coefficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água do Ar	O <i>Coefficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água de uma lâmina de Ar não ventilada (ar em repouso)</i> depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar, podendo ser determinado a partir da seguinte relação: $\pi_{ar} = \frac{D}{R_v \cdot T}$	π_{ar}	kg/(m·s·Pa)

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Coeficiente de Transmissão Térmica	O <i>Coeficiente de Transmissão Térmica</i> de um elemento com uma dada espessura e de faces planas e paralelas, representa a quantidade de calor que o atravessa perpendicularmente, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre as suas faces.	K	W/(m ² ·°C); W/(m ² ·K)
Condensações Internas	As condensações de vapor de água podem ocorrer na superfície e/ou no interior dos materiais ou elementos. As <i>Condensações Internas</i> geram-se sempre que as pressões parciais de vapor instaladas num dado ponto de um elemento igualam a pressão de saturação, que depende das características higrotérmicas do ar “interior” e “exterior” e da própria constituição do elemento.		
Condensações Superficiais	As <i>Condensações Superficiais</i> surgem quando a temperatura da superfície “interior” de um elemento é inferior ou igual à temperatura de ponto de orvalho do ar da ambiência “interior” e são tanto mais prováveis, quanto menor for a resistência térmica do elemento, menor for a temperatura “exterior” e maior for a humidade relativa “interior”.		
Condutância Térmica Superficial	A <i>Condutância Térmica Superficial</i> representa o fluxo de calor trocado entre a superfície de um elemento e o ambiente adjacente (interior ou exterior), devido, sobretudo, a fenómenos de convecção e radiação, por unidade de tempo e de superfície, para uma diferença unitária de temperatura entre a superfície do elemento e o ar ambiente.	h _i , h _e	W/(m ² ·°C); W/(m ² ·K)

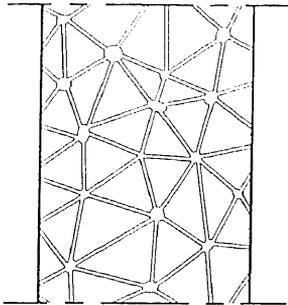
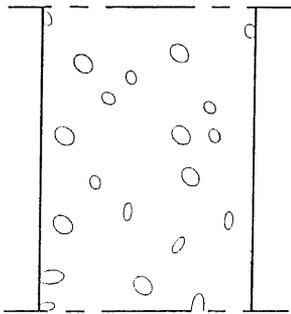
Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Curva de Adsorção Higroscópica	<p>A <i>Curva de Adsorção Higroscópica</i> relaciona o teor de humidade de equilíbrio de um material com a humidade relativa do ambiente em que se encontra, para uma determinada temperatura.</p> <p>Em geral, obtêm-se curvas diferentes para variações de humidade relativa em sentido crescente e decrescente. Este comportamento é designado por <i>Histerésis</i>.</p> 		
Densidade de Fluxo de Difusão de Vapor de Água	<p>O Fluxo de Difusão de Vapor de Água (G) referido à unidade de superfície designa-se por <i>Densidade de Fluxo de Difusão de Vapor de Água</i>, ou seja:</p> $g = \frac{G}{A} = \frac{\pi}{e} \cdot \Delta P$	g	kg/(m ² ·s); g/(m ² ·h)
Diagrama Psicrométrico	<p>A representação gráfica das propriedades termodinâmicas do “ar húmido” e das relações existentes entre si designa-se por <i>Diagrama Psicrométrico</i>.</p> <p>Este diagrama é sempre relativo a uma determinada pressão atmosférica, em geral a pressão atmosférica de referência.</p>		

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Difusão	A <i>Difusão</i> é um processo de mistura de pelo menos dois fluídos em que, na ausência de outras forças de transporte, tais como fluxo de líquido ou gás ou gradiente de temperatura, uma maior concentração de líquido ou gás migrará sempre para uma região de menor concentração.		
Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente	A Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente é a espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão de vapor de água que o elemento construtivo de espessura (e). $S_d = \pi_{ar} \cdot R_d = \mu \cdot e$	S_d	m
Factor de Resistência à Difusão de Vapor de Água	O <i>Factor de Resistência à Difusão de Vapor de Água</i> é um parâmetro característico dos materiais, obtido pela relação (adimensional) entre a permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água do próprio material, que indica quantas vezes a resistência à difusão de um provete desse material é maior do que a de uma camada de ar em repouso, de igual espessura e sujeita às mesmas condições ambientais. $\mu = \frac{\pi_{ar}}{\pi}$	μ	-
Fluxo de Difusão de Vapor de Água	O <i>Fluxo de Difusão de Vapor de Água</i> é a massa de vapor de água que se difunde através de um elemento por unidade de tempo, no sentido normal à superfície, sob o efeito de um gradiente de pressão parcial ou de concentração de gás (vapor de água). $G = \frac{\pi}{e} \cdot \Delta P \cdot A$	G	kg/s; g/h

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Higrometria	<p>O parâmetro designado por <i>Higrometria</i> traduz o aumento da pressão do vapor de água no interior de um local em relação ao exterior e, conseqüentemente, define o gradiente de pressão de vapor de água a que se encontra submetida a sua envolvente.</p> <p>O valor deste parâmetro corresponde à relação entre a produção de vapor no interior de um local (ω) e o caudal de ventilação ($n \cdot V$):</p> $\frac{\omega}{n \cdot V}$	$\frac{\omega}{n \cdot V}$	kg/m ³ ; g/m ³
Higroscopicidade	<p>A <i>Higroscopicidade</i> é a designação que se dá ao fenómeno pelo qual os materiais fixam e água por adsorção e a restituem ao ambiente em que se encontram, em função das variações de temperatura e de pressão parcial de vapor de água.</p> <p>Um material diz-se <i>Higroscópico</i> se a quantidade de água que é capaz de reter por adsorção é relativamente importante.</p>		
Humidade do Ar	<p>O “ar seco” é um ar anidro constituído por uma mistura de gases, nomeadamente Oxigénio, Azoto, Árgon e Anídrido Carbónico. O “ar húmido” é uma mistura de ar seco e vapor de água. Define-se a <i>Humidade do Ar</i> a partir da quantidade de vapor que ele contém, em volume ou em massa.</p> <p><i>Em volume</i> chama-se Humidade Absoluta do Ar e corresponde à relação entre a massa de vapor de água (m_v) e o volume (V) de “ar húmido”:</p> $W = \frac{m_v}{V}$	W	kg/m ³

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Humidade do Ar (continuação)	<p><i>Em massa</i> chama-se Teor de Humidade do Ar e corresponde à relação entre a massa de vapor de água (m_v) e a massa de ar seco (m_a):</p> $U = \frac{m_v}{m_a}$	U	kg/kg
Humidade Relativa	<p>A <i>Humidade Relativa</i> é a relação entre a massa de vapor contida no ar e a quantidade máxima de vapor que o ar pode conter, a uma determinada temperatura. O seu valor é dado pela relação entre a massa de vapor de água (m_v) e a massa de vapor de água de saturação (m_{vs}):</p> $HR = \frac{m_v}{m_{vs}} \times 100$ <p>Considerando a hipótese de o ar ser um gás perfeito, este valor também pode ser obtido através da relação entre a pressão parcial de vapor de água (P) e a pressão de saturação (P_s):</p> $HR = \frac{P}{P_s} \times 100$	HR	%
Massa de Vapor de Água de Saturação	<p>A <i>Massa de Vapor de Água de Saturação</i> é a máxima quantidade de vapor de água, em massa, que um provete de “ar húmido” pode conter. O seu valor varia, de forma crescente, com a temperatura e a pressão atmosférica.</p>	m_{vs}	kg
Permeabilidade	<p>A <i>Permeabilidade</i> caracteriza a aptidão dos materiais porosos de serem atravessados por um fluido, quando submetidos a um gradiente de pressão.</p>		

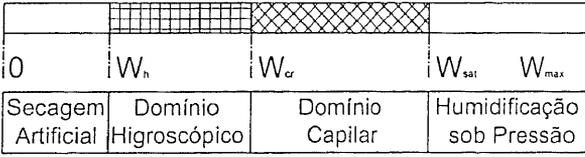
Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Permeância ao Vapor de Água	<p>A <i>Permeância ao Vapor de Água</i> de um elemento é a densidade de fluxo de vapor de água que o atravessa, referida à diferença de pressão parcial de vapor a que está sujeito entre as suas faces.</p> $Pe = \frac{g}{\Delta P}$ <p>Para um elemento constituído apenas por um material homogéneo, o valor da sua <i>Permeância</i> corresponde também à relação entre o Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água (π) do material e a sua espessura (e):</p> $Pe = \frac{\pi}{e}$	Pe	kg/(m ² ·s·Pa); g/(m ² ·h·mmHg)
Porosidade	<p>Os materiais de construção têm como característica estrutural, a existência de poros na sua constituição.</p> <p>A natureza, a importância e a disposição destes poros permite definir diferentes tipos de porosidade, como por exemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Porosidade fechada; - Porosidade aberta. 		

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
<p>Porosidade Aberta</p>	<p>A generalidade dos materiais de construção têm <i>Porosidade Aberta</i>. Nestes materiais os vazios comunicam entre si, permitindo a circulação de fluidos no seu interior. O material é mais ou menos permeável, em função da dimensão e geometria dos poros.</p> 		
<p>Porosidade Fechada</p>	<p>Num material com <i>Porosidade Fechada</i>, os vazios não comunicam entre si e o material permanece impermeável.</p> 		
<p>Pressão Atmosférica ou Barométrica</p>	<p>O efeito da força gravítica sobre as moléculas da mistura de gases que constitui o “ar húmido” leva a que o ar exerça uma determinada pressão, a chamada <i>Pressão Atmosférica ou Barométrica</i>. O valor da pressão atmosférica não é constante, variando em função da altitude dos locais relativamente ao nível do mar. Ao nível do mar a pressão atmosférica é de cerca de 101 325 Pa (pressão atmosférica de referência).</p>	<p>P_t</p>	<p>Pa, mmHg</p>

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Pressão Atmosférica ou Barométrica (continuação)	Considerando que os constituintes do “ar húmido” se comportam como gases perfeitos, de acordo com a lei de Dalton a pressão total (P_t) da mistura de “ar húmido” é igual à soma das pressões parciais dos gases que a constituem, ou seja, é igual à soma da pressão parcial do ar seco (P_a) com a pressão parcial de vapor de água (P): $P_t = P_a + P$	P_t	Pa, mmHg
Pressão Parcial do Vapor de Água	A <i>Pressão Parcial do Vapor de Água</i> é a pressão que este teria se ocupasse individualmente o volume ocupado pela mistura de ar considerada.	P	Pa, mmHg
Pressão de Saturação	A <i>Pressão de Saturação</i> é a pressão parcial máxima que pode atingir o vapor de água no ar, para determinadas condições de temperatura e pressão atmosférica.	P_s	Pa, mmHg
Resistência à Difusão de Vapor de Água	O inverso da Permeância ao Vapor de Água (P_e) é designado por <i>Resistência à Difusão de Vapor de Água</i> (R_d) e representa a resistência que um elemento oferece à passagem de vapor de água. $R_d = \frac{1}{P_e} = \frac{e}{\pi}$	R_d	$m^2 \cdot s \cdot Pa / kg$; $m^2 \cdot h \cdot mmHg / g$
Resistência Térmica	A <i>Resistência Térmica</i> de um elemento de faces planas e paralelas é a resistência que esse elemento oferece à passagem de calor, na direcção perpendicular às suas faces, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário.	R_t	$m^2 \cdot ^\circ C / W$; $m^2 \cdot K / W$

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Taxa Horária de Renovação de Ar	A <i>Taxa Horária de Renovação de Ar</i> corresponde ao número de vezes que determinado volume de ar é completamente substituído numa hora.	n	h ⁻¹
Temperatura de Ponto de Orvalho	A <i>Temperatura de Ponto de Orvalho</i> é a temperatura abaixo da qual se verifica a condensação do vapor de água contido no ar, ou seja, é a temperatura que, para uma determinada quantidade de vapor de água do ar, corresponde a 100% de humidade relativa.	t _s	°C
Teor de Humidade Crítico	O <i>Teor de Humidade Crítico</i> é o teor de humidade que um material apresenta quando em contacto com uma ambiência saturada e abaixo do qual o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível.	w _{cr}	kg/kg
Teor de Humidade Higroscópico	O <i>Teor de Humidade Higroscópico</i> corresponde à quantidade de água que um material contém quando em equilíbrio com uma ambiência que apresenta uma determinada humidade relativa. Pode variar entre o zero absoluto, se o material estiver em contacto com uma ambiência de humidade relativa nula, e o Teor de Humidade Crítico.	w _h	kg/kg

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
Teor de Humidade de um Material	Um material diz-se “húmido” quando contém água no estado gasoso, líquido ou sólido, em simultâneo ou não. A partir da quantidade de água que um material contém, pode definir-se o seu <i>Teor de Humidade</i> através da relação entre a massa ou volume de água e a massa e/ou volume do material. Assim, pode ter-se:		
	<p>- Teor de Humidade “Mássico” (de utilização mais frequente), que corresponde à relação entre a massa de água (m_e) e a massa do material no estado seco (m_s):</p> $w = \frac{m_e}{m_s}$	w	kg/kg
	<p>- Teor de Humidade em Massa Por Unidade de Volume, que corresponde à relação entre a massa de água (m_e) e o volume aparente do material no estado seco (V_s):</p> $u = \frac{m_e}{V_s}$ <p>Teor de Humidade Volúmico, que corresponde à relação entre o volume de água contido no material (V_e) e o volume aparente do material no estado seco (V_s):</p> $\theta = \frac{V_e}{V_s}$	u	kg/m ³
		θ	m ³ /m ³

Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)										
<p>Teor de Humidade de um Material (continuação)</p>	<p>Para evitar a confusão na utilização destes valores, H. Hens [75] propõe que o teor de humidade em massa por unidade de volume (u) seja utilizado para materiais com reduzida capacidade para fixação de humidade, como por exemplo as rochas, o teor de humidade “mássico” (w) se utilize para materiais com capacidade de fixação de humidade significativa, como por exemplo as madeiras, e o teor de humidade volúmico se utilize com materiais de elevada porosidade, como por exemplo os materiais de isolamento.</p> <p>A quantificação deste parâmetro é de grande importância, devido à sua influência nas propriedades dos materiais, nomeadamente a sua condutibilidade térmica e a sua permeabilidade ao vapor de água. Os materiais porosos correntemente utilizados na construção podem apresentar teores de humidade variando entre o zero absoluto e o teor de humidade máximo. No entanto, estes valores extremos são dificilmente obtidos em condições naturais. Na figura seguinte apresenta-se uma descrição convencional dos diferentes teores de humidade que um material pode apresentar.</p>  <table border="1" data-bbox="544 1413 1129 1570"> <tr> <td>0</td> <td>W_h</td> <td>W_c</td> <td>W_{sat}</td> <td>W_{max}</td> </tr> <tr> <td>Secagem Artificial</td> <td>Domínio Higroscópico</td> <td>Domínio Capilar</td> <td colspan="2">Humidificação sob Pressão</td> </tr> </table>	0	W_h	W_c	W_{sat}	W_{max}	Secagem Artificial	Domínio Higroscópico	Domínio Capilar	Humidificação sob Pressão			
0	W_h	W_c	W_{sat}	W_{max}									
Secagem Artificial	Domínio Higroscópico	Domínio Capilar	Humidificação sob Pressão										
<p>Teor de Humidade Máximo</p>	<p>O <i>Teor de Humidade Máximo</i> é o teor de humidade que um material apresenta quando todo o volume não ocupado pelo esqueleto sólido da estrutura porosa está preenchido com água</p>	w_{max}	kg/kg										



Conceito/Parâmetro	Definição	Símbolo	Unidade(s)
	.		
Teor de Humidade de Saturação	<p>O <i>Teor de Humidade de Saturação</i> corresponde à quantidade de água que um material contém quando em contacto com um plano de água durante um determinado período de tempo.</p> <p>Certos autores utilizam a designação de <i>Teor de Humidade Capilar (w)</i>.</p>	w_{sat}	kg/kg
Ventilação	A <i>Ventilação</i> é um processo que consiste em extrair o ar do interior dos compartimentos, substituindo-o por ar exterior que é admitido.		

Anexo II - CARACTERÍSTICAS DE PERMEABILIDADE AO VAPOR
DE MATERIAIS E ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO

ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS DO ANEXO II

TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

- Quadro AII.1 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS PARA ALVENARIA E REVESTIMENTO
- Quadro AII.2 - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE ALVENARIAS E REVESTIMENTOS
- Quadro AII.3 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE BETÕES
- Quadro AII.4 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MADEIRAS E DERIVADOS
- Quadro AII.5 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO
- Quadro AII.6 - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR

Anexo II - Características de Permeabilidade ao Vapor de Materiais e Elementos de Construção

Neste anexo apresentam-se as características de permeabilidade ao vapor de água de vários materiais e elementos de construção, recolhidas na bibliografia da especialidade. Apresentam-se também os resultados obtidos em ensaios efectuados no Laboratório de Física das Construções - LFC a alguns materiais.

Os materiais e elementos de construção foram agrupados em vários quadros, que estão organizados da seguinte forma:

- Para materiais homogéneos ou assimiláveis (como por exemplo o betão), apresentam-se os valores do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água - π e do factor de resistência à difusão do vapor de água - μ . Para materiais não homogéneos ou de espessura muito reduzida (como é o caso das barreiras pára-vapor) apresentam-se os valores da permeância ao vapor de água - P_e e da espessura da camada de ar de difusão equivalente - S_d ;
- Para os elementos com a designação "Alvenaria de...", os valores apresentados têm em consideração as juntas de assentamento;
- Os resultados obtidos nos ensaios realizados no Laboratório de Física das Construções (Ref. LFC) são apresentados em linhas independentes;
- Para os materiais e elementos de construção que apresentam um leque muito alargado de valores, é fornecido um valor de referência para utilização em programas de simulação das transferências de vapor por difusão, como por exemplo o programa "CONDENSA";
- Na coluna das observações (Obs.) refere-se o método de ensaio, quando conhecido, em que MTS corresponde ao método da tina seca e MTH ao método da tina húmida, e na coluna adjacente indicam-se as referências bibliográficas (Ref.);
- Os valores de π e P_e são apresentados em duas unidades diferentes, tendo-se adoptado os seguintes valores nas conversões efectuadas:

TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

Parâmetro	Unidade	Multiplicar por	Para converter para
Pressão	mmHg	133,322	Pa
Espessura	μm	1×10^{-6}	m
Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água - π	$\text{g} / (\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg})$	$20,835 \times 10^{-10}$	$\text{kg} / (\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
Permeância ao Vapor de Água - P_e	$\text{g} / (\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg})$	$20,835 \times 10^{-10}$	$\text{kg} / (\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$

Refira-se ainda que, na bibliografia consultada, em geral, só são apresentados valores de um dos parâmetros (π ou μ , Pe ou S_d), pelo que se tornou necessário definir um valor para o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar - π_{ar} , a utilizar na determinação dos restantes parâmetros. Adoptou-se o valor apresentado na norma DIN 4108 [51] pois é também adoptado por várias das publicações consultadas.

Note-se, contudo, que este valor é determinado considerando uma temperatura de 10 °C, bastante diferente das temperaturas que normalmente se utilizam nos ensaios de determinação das características de permeabilidade ao vapor dos materiais de construção.

$$\text{Para } t = 10 \text{ °C tem-se então: } \pi_{ar} = \frac{1}{1,5 \times 10^6} [\text{kg}/(\text{m.h.Pa})] = 185 \times 10^{-12} [\text{kg}/(\text{m.s.Pa})]$$

$$\text{logo: } \mu = \frac{\pi_{ar}}{\pi} \Rightarrow \mu = \frac{185 \times 10^{-12}}{\pi}, \text{ com } \pi \text{ em } [\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})]$$

$$S_d = \frac{\pi_{ar}}{Pe} \Rightarrow S_d = \frac{185 \times 10^{-12}}{Pe}, \text{ com } Pe \text{ em } [\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})]$$

Quadro AII.1 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS PARA ALVENARIA E REVESTIMENTO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
1.1	Ardósia	∞	0	0	[55]	
1.2	Ar em repouso (lâmina de ar não ventilada)	0,85 a 1,1	8000 a 10 400	165 a 215	[3], [17], [48], [49], [65], [90], [99]	
1.3	Argamassa à base de cal $\gamma = 1400$ a 1800 kg/m^3	6,4 a 41	215 a 1400	4,5 a 29	[48], [51], [70], [82], [91], [96]	
	Valor de referência	15	600	13		
1.4	Argamassa à base de cimento $\gamma = 1900$ a 2100 kg/m^3	12 a 41	215 a 700	4,5 a 15	[51], [70], [89], [91], [96], [99]	
1.5	Argamassa bastarda $\gamma = 1800$ a 2000 kg/m^3	10 a 22	400 a 890	8,3 a 19	[48], [70], [96]	
1.6	Argamassa de cal e cimento $\gamma = 1800$ a 1900 kg/m^3	15 a 35	255 a 590	5,3 a 12	[51], [82]	
1.7	Asfalto $\gamma = 2000 \text{ kg/m}^3$	20 000	0,44	0,0093	[96]	
1.8	Barro vermelho $\gamma = 1900 \text{ kg/m}^3$	77	115	2,4	LFC	MTS
1.9	Betume $\gamma = 1200 \text{ kg/m}^3$	50 000	0,18	0,0037	[96]	

Quadro AII.1 (cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS PARA ALVENARIA E REVESTIMENTO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
1.10	Borracha $\gamma = 1200$ a 1500 kg/m^3	900	10	0,20	[91]	
1.11	Elementos cerâmicos $\gamma = 1300$ a 1700 kg/m^3	7,5 a 9	990 a 1200	21 a 25	[91]	
1.12	Elementos cerâmicos vitrificados $\gamma = 2000 \text{ kg/m}^3$	100 a 300	30 a 89	0,62 a 1,9	[51], [70], [96]	
1.13	Fibrocimento	14 a 185	48 a 620	1,0 a 13	[15], [17], [51], [55], [58], [65], [70], [89], [91], [96]	
	Valor de referência	50	180	3,7		
1.14	Fibrocimento comprimido $e = 3$ a 6 mm	135 a 445	20 a 66	0,42 a 1,4	[3], [15], [23], [48], [49], [58], [65], [88], [99]	
1.15	Grés $\gamma = 2000$ a 2600 kg/m^3	15 a 30	295 a 580	6,2 a 12	[91], [96]	
1.16	Linóleo $\gamma = 1200 \text{ kg/m}^3$	1800	4,9	0,1	[91]	

Quadro AII.1 (cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS PARA ALVENARIA E REVESTIMENTO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
1.17	Materiais a granel					
	- À base de areia, brita ou gôdo $\gamma = 1800 \text{ kg/m}^3$	4	2200	46		
	- Areia de pedra-pomes $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$	4	2200	46		
	- Argila expandida, ardósia expandida $\gamma \leq 400 \text{ kg/m}^3$	3	2950	62		
	- Cortiça expandida em granulado $\gamma \leq 200 \text{ kg/m}^3$	3	2950	62	[96]	
	- Lava celular $\gamma = 1200 \text{ kg/m}^3$	4	2200	46		
	$\gamma = 1500 \text{ kg/m}^3$	5	1800	37		
	- Mica expandida $\gamma \leq 100 \text{ kg/m}^3$	2	4450	93		
	- Pedra-pomes de escória $\gamma \leq 600 \text{ kg/m}^3$	3	2950	62		
	- Perlite expandida $\gamma \leq 100 \text{ kg/m}^3$	2	4450	93		

Quadro AII.1 (cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS PARA ALVENARIA E REVESTIMENTO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
1.18	Metal	∞	0	0	[15], [48], [49], [58], [65], [96]	
1.19	Painéis de aparas de madeira aglutinadas com argamassa de cimento $\gamma = 350$ a 700 kg/m^3	2 a 10	860 a 4450	18 a 93	[51], [17], [91]	
1.20	Painéis/placas de gesso	6,0 a 11	820 a 1500	17 a 31	[3], [15], [17], [82], [91], [99]	
1.21	Painéis/placas de gesso cartonado	5,5 a 11	800 a 1600	17 a 34	[15], [23], [48], [49], [51], [55], [58], [65], [88], [90], [96]	
1.22	Pedra calcária $\gamma = 2000 \text{ kg/m}^3$	20	450	9,4	[15], [48], [58], [65], [96]	
	$\gamma = 2500 \text{ kg/m}^3$	89	100	2,1	[15], [48], [58], [65], [96]	
1.23	Placas de poliéster reforçado com fibras de vidro $\gamma = 1200 \text{ kg/m}^3$	> 9000	< 1,0	< 0,02	[91]	

Quadro AII.1 (cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS PARA ALVENARIA E REVESTIMENTO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
1.24	Placas de polietileno $\gamma = 920 \text{ a } 1950 \text{ kg/m}^3$	> 9000	< 1,0	< 0,02	[91]	
1.25	Placas de polimetacrilato de metilo (acrílicos) $\gamma = 1200 \text{ kg/m}^3$	> 9000	< 1,0	< 0,02	[91]	
1.26	Placas de polipropileno $\gamma = 900 \text{ kg/m}^3$	> 9000	< 1,0	< 0,02	[91]	
1.27	Polietileno reticulado	1800	5,0	0,10	[90]	
1.28	Reboco à base de gesso	4,9 a 11	800 a 1800	17 a 38	[15], [17], [46], [48], [49], [51], [55], [58], [65], [70], [88], [90], [91], [96], [97], [99]	
1.29	Rocha cristalina metamórfica (granito, basalto, mármore) $\gamma = 2800 \text{ kg/m}^3$	300	30	0,62	[96]	

Quadro AII.1 (cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS PARA ALVENARIA E REVESTIMENTO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
1.30	Termoplásticos ou elastómeros em folha					
	- Policloreto de vinil (PVC) $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$	20 000	0,44	0,0093	[96]	
	- Butil $\gamma = 1100 \text{ kg/m}^3$	500 000	0,018	0,000 37	[96]	
1.31	Tijolo silico-calcário $\gamma = 1500 \text{ a } 1700 \text{ kg/m}^3$	9 a 27	330 a 990	6,9 a 21	[70], [82]	
1.32	Tijolo vitrificado	400	22	0,46	[70]	
1.33	Vidro	∞	0	0	[15], [48], [49], [58], [65], [96]	

Quadro AII.2 - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE ALVENARIAS E REVESTIMENTOS

n.º	ELEMENTO	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente S_d	Permeância ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		m	$g/(m^2 \cdot h \cdot mmHg) \times 10^5$	$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{12}$		
2.1	Alvenaria de blocos de betão vazados $e = 0,20$ m	2,7	3250	68	[48], [49], [58], [65]	
2.2	Alvenaria de granito $e = 0,30$ m	8,3	1050	22	[65]	
2.3	Alvenaria de tijolo maciço $e = 0,20$ m	2,0	4500	94	[48], [49], [58], [65]	
2.4	Alvenaria de tijolo vazado $e = 0,20$ m	3,6	2500	52	[48], [49], [58], [65]	
2.5	Blocos de betão celular $e = 0,07$ m	3,8	2350	49	[88]	
2.6	Contraplacado com cola exterior $e = 6,4$ mm	4,6 a 7,1	1250 a 1900	26 a 40	[3], [99]	
2.7	Contraplacado com cola interior $e = 6,4$ mm	0,55 a 1,7	5300 a 16 100	110 a 335	[3], [99]	
2.8	Esmalte de vinil acrílico (1 camada) $e_{(seca)} = 40$ μ m	0,38	23 500	490	[3], [99]	

Quadro AII.2 (Cont.) - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE ALVENARIAS E REVESTIMENTOS

n.º	ELEMENTO	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente S_d	Permeância ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
			P_e			
		m	$g/(m^2 \cdot h \cdot mmHg) \times 10^5$	$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{12}$		
2.9	Laca de óleo $e = 1 \text{ mm}$	0,022	400 000	8300	[48], [49]	
2.10	Laca de poliuretano $e = 1 \text{ mm}$	0,012	750 000	15 600	[48], [49]	
2.11	Laca de PVC $e = 1 \text{ mm}$	0,036	250 000	5200	[48], [49]	
2.12	Película livre de tinta de borracha $e \cong 670 \text{ } \mu\text{m}$	0,34	26 000	545	LFC	MTH
2.13	Película livre de tinta de borracha $e \cong 670 \text{ } \mu\text{m}$	5,8	1550	32	LFC	MTS
2.14	Película livre de tinta texturada $e \cong 375 \text{ } \mu\text{m}$	0,088	101 000	2100	LFC	MTH
2.15	Película livre de tinta texturada $e \cong 375 \text{ } \mu\text{m}$	0,87	10 300	215	LFC	MTS
2.16	Pintura exterior acrílica (1 camada) $e_{(seca)} = 40 \text{ } \mu\text{m}$	0,59	15 000	315	[3], [99]	
2.17	Pintura de óleo $e = 1 \text{ mm}$	0,014	650 000	13 500	[48], [49]	

Quadro AII.2 (Cont.) - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE ALVENARIAS E REVESTIMENTOS

n.º	ELEMENTO	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente S_d	Permeância ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
			P_e			
		m	$g/(m^2 \cdot h \cdot mmHg) \times 10^5$	$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{12}$		
2.18	Pintura de tinta de borracha $e \cong 670 \mu m$	1,3	6900	145	LFC	MTH
2.19	Pintura de tinta de borracha $e \cong 670 \mu m$	7,1	1250	26	LFC	MTS
2.20	Pintura de tinta texturada $e \cong 375 \mu m$	0,45	19 900	415	LFC	MTH
2.21	Pintura de tinta texturada $e \cong 375 \mu m$	3,3	2700	56	LFC	MTS
2.22	Pintura de tinta "plástica" de acabamento mate $e \cong 110 \mu m$	0,021	432 000	9000	LFC	MTH
2.23	Pintura de tinta "plástica" de acabamento mate $e \cong 110 \mu m$	0,072	124 000	2550	LFC	MTS
2.24	Pintura de tinta "plástica" de acabamento mate aveludado $e \cong 110 \mu m$	0,026	344 000	7200	LFC	MTH

Quadro AII.2 (Cont.) - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE ALVENARIAS E REVESTIMENTOS

n.º	ELEMENTO	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente S_d	Permeância ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
			P_e			
		m	$g/(m^2 \cdot h \cdot mmHg) \times 10^5$	$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{12}$		
2.25	Pintura de tinta "plástica" de acabamento mate aveludado $e \cong 110 \mu m$	0,11	82 000	1700	LFC	MTS
2.26	Primário-selante (1 camada) $e_{(seca)} = 30 \mu m$	0,51	17 300	360	[3], [99]	
2.27	Resina epoxy $e = 200 \mu m$ $e = 300 \mu m$	12	740	15	[96]	
		21	425	8,8	[96]	
2.28	Resina de poliéster, reforçada com fibra de vidro $e = 1,5 mm$	75	120	2,5	[96]	
2.29	Revestimento de argamassa "cerezitado" $e = 15 mm$	1,9 a 2,7	3300 a 4650	69 a 97	[15], [48], [49], [58], [65]	

Quadro AII.3 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE BETÕES

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
3.1	Betão de argila ou xisto expandido	3,0 a 92	97 a 2950	2,0 a 62	[49], [51], [55], [70], [91], [96], [99]	
	Valor de referência	7,4	1200	25		
3.2	Betão cavernoso $\gamma = 1600 \text{ a } 2100 \text{ kg/m}^3$	5,9 a 11	800 a 1500	17 a 31	[48], [49]	
3.3	Betão celular	2,5 a 12	730 a 3500	15 a 73	[15], [48], [49], [55], [58], [65], [70], [73], [74], [82], [88], [89], [90], [91], [99]	
	Valor de referência	4,4	2000	42		
3.4	Betão de escórias de alto forno	6,6 a 14	620 a 1350	13 a 28	[70], [91]	
3.5	Betão com fibras de madeira	2,8 a 7,5	1200 a 3200	25 a 67	[90]	
3.6	Betão normal	15 a 260	34 a 625	0,71 a 13	[3], [15], [17], [46], [48], [49], [51], [55], [58], [65], [70], [73], [74], [82], [86], [88], [89], [91], [96], [99]	
	Valor de referência	30	300	6,3		
3.7	Betão normal $\gamma = 2112 \text{ kg/m}^3$	110	80	1,7	LFC	MTS

Quadro AII.3 (Cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE BETÕES

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
3.8	Betão de pedra-pomes	2,5 a 15	590 a 3550	12 a 74	[49], [51], [70], [96], [99]	
	Valor de referência	3,0	3000	63		
3.9	Betão de poliestireno $\gamma = 400 \text{ kg/m}^3$	16 a 20	435 a 570	9 a 12	[91]	
3.10	Betão de poliestireno $\gamma = 250 \text{ kg/m}^3$	12	770	16	LFC	MTS
	$\gamma = 545 \text{ kg/m}^3$	24	365	7,6	LFC	MTS

Quadro AII.4 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MADEIRAS E DERIVADOS

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
4.1	Abeto $\gamma = 600 \text{ kg/m}^3$	40 a 70	125 a 220	2,6 a 4,6	[51], [96]	
4.2	Aglomerado de fibras de madeira					
	- denso	46 a 200	45 a 190	0,93 a 4,0	[2], [3], [17], [49], [51], [91], [96], [99]	
	- leve	2,8 a 16	550 a 3200	11 a 67	[2], [17], [51], [96], [99]	
4.3	Aglomerado de partículas de madeira	40 a 100	89 a 225	1,9 a 4,7	[15], [23], [48], [49], [55], [58], [65], [74], [88], [96]	
4.4	Balsa $\gamma = 125 \text{ kg/m}^3$	9 a 53	170 a 980	3,5 a 20	[91]	
4.5	Carvalho $\gamma = 800 \text{ kg/m}^3$	40 a 60	150 a 220	3,1 a 4,6	[51], [96]	
4.6	Contraplacado	26 a 400	22 a 345	0,46 a 7,1	[15], [23], [48], [49], [51], [58], [65], [74], [88], [96], [99]	
	Valor de referência	60	150	3,1		
4.7	Faia $\gamma = 800 \text{ kg/m}^3$	40 a 50	180 a 220	3,7 a 4,6	[51], [96]	

Quadro AII.4 (Cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MADEIRAS E DERIVADOS

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
4.8	Faia:					
	- com 10% de água	70	125	2,6	[70]	
	- com 15% de água	11	810	17	[70]	
	- com 20% de água	8,5	1050	22	[70]	
	- com 40% de água	2	4450	93	[70]	
4.9	Pinho					
	$\gamma = 530 \text{ a } 600 \text{ kg/m}^3$	18 a 120	73 a 490	1,5 a 10	[51], [91], [96]	
	Valor de referência	70	125	2,6		
4.10	Pinho nórdico:					
	- com 4% de água	230	39	0,81	[70]	
	- com 6% de água	160	56	1,2	[70]	
	- com 8% de água	110	81	1,7	[70]	
	- com 10% de água	73	120	2,5	[70]	

Quadro AII.5 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
5.1	Aglomerado expandido de cortiça	4,5 a 62	145 a 1950	3,0 a 41	[3], [15], [17], [48], [49], [51], [58], [65], [70], [73], [89], [90], [91], [96], [97], [99]	
	Valor de referência	18	500	10		
5.2	Espuma elastomérica	8900	1,0	0,021	[90]	
5.3	Espuma rígida de poliuretano	13 a 185	48 a 680	1,0 a 14	[17], [51], [55], [58], [88], [90], [91], [96], [99]	
	Valor de referência	44	200	4,2		
5.4	Espuma rígida à base de PVC celular $\gamma = 25 \text{ a } 72 \text{ kg/m}^3$	92 a 260	34 a 97	0,70 a 2,0	[15], [23], [48], [49], [58], [65], [70], [88], [91], [96], [99]	
5.5	Espuma rígida formo-fenólica	26 a 140	64 a 345	1,3 a 7,1	[15], [17], [51], [55], [58], [65], [91], [99]	
5.6	Espuma de ureia formaldeído	1,0 a 5,5	1600 a 8900	33 a 185	[17], [51], [90], [91], [99]	
5.7	Espuma de vidro	> 100 000	< 0,089	< 0,0019	[70]	
5.8	Lã mineral	1,0 a 1,9	4650 a 8900	97 a 185	[15], [17], [23], [46], [48], [49], [58], [65], [70], [74], [89], [90]	

Quadro AII.5 (Cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
5.9	Lã mineral	0,76	11 800	245	[3], [99]	MTH
5.10	Lã de rocha	1,1 a 1,3	6800 a 8100	140 a 170	[70], [96]	
5.11	Lã de vidro	1,1 a 1,5	6000 a 8100	125 a 170	[70], [90], [96]	
5.12	Painéis/placas de espuma de poliuretano expandido	44 a 320	28 a 200	0,58 a 4,2	[3], [15], [23], [48], [49], [58], [65], [99]	
	Valor de referência	50	180	3,7		
5.13	Perlite $\gamma = 50 \text{ a } 120 \text{ kg/m}^3$	2	4450	93	[96]	
5.14	Poliestireno expandido	19 a 150	58 a 480	1,2 a 10	[3], [17], [51], [55], [58], [65], [70], [74], [88], [90], [91], [99]	
	Valor de referência	30	300	6,3		

Quadro AII.5 (Cont.) - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO VAPOR E FACTOR DE RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR DE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

n.º	MATERIAL	Factor de Resistência à Difusão do Vapor de Água	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
		μ	π			
		-	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}) \times 10^5$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}) \times 10^{12}$		
5.15	Poliestireno expandido					
	- Moldado em blocos por via húmida $\gamma = 9$ a 16 kg/m^3	22 a 30	300 a 400	6,3 a 8,3	[15], [23], [48], [49], [58], [65]	
	- Moldado em contínuo por via húmida $\gamma = 11$ a 20 kg/m^3	36 a 59	150 a 250	3,1 a 5,2	[15], [23], [48], [49], [58], [65]	
	- Termo-comprimido em contínuo por via seca $\gamma = 18$ a 23 kg/m^3	63 a 110	80 a 140	1,7 a 2,9	[15], [23], [48], [49], [58], [65]	
5.16	Poliestireno extrudido	80 a 300	30 a 110	0,6 a 2,3	[3], [15], [17], [46], [48], [49], [51], [55], [58], [65], [88], [90], [91], [99]	
5.17	Poliestireno extrudido $\gamma = 28 \text{ kg/m}^3$	105	85	1,8	LFC	MTS
5.18	Vermiculite	2 a 2,8	3200 a 4450	67 a 93	[17], [96]	
5.19	Vidro celular	∞	0	0	[2], [3], [15], [23], [46], [48], [49], [58], [65], [88], [99]	

Quadro AII.6 - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR

n.º	MATERIAL	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente S_d	Permeância ao Vapor de Água		Referência	Obs.
			P_e			
		m	$g/(m^2 \cdot h \cdot mmHg) \times 10^5$	$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{12}$		
6.1	Feltro betuminoso $e = 3 \text{ mm}$	10	880	18	LFC	MTS
6.2	Folha de acetato celuloso $e = 0,25 \text{ mm}$	0,70 a 0,79	11 200 a 12 600	235 a 265	[2], [3], [99]	MTS
	$e = 3,2 \text{ mm}$	10	860	18	[3], [99]	MTS
6.3	Folha de acrílico reforçado com fibra de vidro $e = 1,4 \text{ mm}$	27	330	6,9	[3], [99]	MTS
6.4	Folha de alumínio $e = 15 \mu\text{m}$	> 5,9	< 1500	< 31	[15], [48], [49], [58], [65], [96]	
	$e = 25 \mu\text{m}$	64	140	2,9	[99]	
	$e > 40 \mu\text{m}$	> 89	< 100	< 2,1	[15], [58], [65], [96]	
	$e = 100 \mu\text{m}$	∞	0	0	[97]	
6.5	Folha de alumínio colada a papel Kraft com asfalto $e = 15 \mu\text{m}$	160	55	1,1	[97]	

Quadro AII.6 (Cont.) - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR

n.º	MATERIAL	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente S_d	Permeância ao Vapor de Água		Ref.	Obs.
			P_e			
		m	$g/(m^2 \cdot h \cdot mmHg) \times 10^5$	$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{12}$		
6.6	Folha de alumínio sobre placa de gesso $e = 15 \mu m$	8,9	1000	21	[23], [88]	
6.7	Folha de poliéster $e = 25 \mu m$	4,4	2000	42	[2], [3], [99]	MTS
	$e = 90 \mu m$	14	625	13	[3]	MTS
	$e = 190$ a $200 \mu m$	40 a 46	190 a 220	4,0 a 4,6	[3], [17], [99]	
6.8	Folha de poliéster reforçado com fibra de vidro $e = 1,2 mm$	64	140	2,9	[3], [99]	MTS
6.9	Folha de polietileno $e = 50 \mu m$	19 a 20	435 a 460	9,1 a 9,6	[2], [3], [97], [99]	
	$e = 100 \mu m$	40 a 44	200 a 220	4,2 a 4,6	[2], [3], [15], [48], [49], [58], [65], [74], [96], [97]	
	$e = 120 \mu m$	37 a 64	140 a 240	2,9 a 5,0	[17]	
	$e = 150 \mu m$	54	165	3,4	[3]	MTS
	$e = 200 \mu m$	81	110	2,3	[3]	MTS
	$e = 250 \mu m$	74 a 110	82 a 120	1,7 a 2,5	[3], [17], [99]	

Quadro AII.6 (Cont.) - PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA DA CAMADA DE AR DE DIFUSÃO EQUIVALENTE DE BARREIRAS PÁRA-VAPOR

n.º	MATERIAL	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente S_d	Permeância ao Vapor de Água P_e		Ref.	Obs.
			m	$g/(m^2 \cdot h \cdot mmHg) \times 10^5$		
6.10	Folha de PVC					
	$e = 50$ a $100 \mu m$	2,3 a 4,7	1850 a 3850	39 a 80	[3], [99]	
	$e = 800 \mu m$	8,1	1100	23	[48], [49]	
6.11	Papel betuminoso					
	$e = 300 \mu m$	0,90	9900	205	[96]	

