

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E SISTEMAS DE FACHADA

Para se poder cabalmente otimizar a localização e utilização dos materiais em fachadas de habitação, será necessário ter uma imagem clara sobre as suas propriedades. Neste anexo faz-se a caracterização das propriedades dos materiais de fachada, especialmente daquelas com implicações energéticas e ambientais no desempenho de conforto dos edifícios. Faz-se a distinção entre as propriedades dos materiais e dos sistemas de fachada onde estes se podem incluir. São também apresentados os conceitos subjacentes às propriedades, bem como as metodologias de estimativa e alguns exemplos de valores calculados.

A1.1.**OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

Durante mais de um milhão de anos o homem utilizou praticamente apenas cinco materiais de construção, de que dispunha quase sem transformação: a madeira, a pedra, o osso, o chifre e as peles. A disponibilidade imediata dos materiais era o principal factor que condicionava os sistemas construtivos em habitação. No princípio do Neolítico, operou-se uma série de transformações radicais, que conduziu também a um enriquecimento quantitativo e qualitativo dos materiais utilizados pelo homem: argila, fibras animais, fibras vegetais e metais.

* "Até aos princípios do século XX os materiais locais são um factor decisivo na definição da casa regional, porque os grupos humanos estavam isolados" (Veiga de Oliveira e Galhano 2000).

Foi somente após a Revolução Industrial que se operou uma drástica transformação nos materiais de construção e consequentemente nos sistemas construtivos, com a generalização inicialmente do aço e do vidro e, mais tarde, do betão armado. A par dos novos materiais, um outro aspecto marcou o pós-Revolução Industrial, os transportes. A relação de dependência entre disponibilidade de materiais e construção deixou de existir, tendo em conta a reorganização das acessibilidades*, tornando-se predominante o factor custo. A disponibilidade de vários tipos de materiais e sistemas construtivos, alargou as possibilidades dos projectistas, talvez até demasiado, já que se chegou a um ponto em que o leque de soluções é tão vasto que não se chegam a testar convenientemente antes da sua implementação e, o que é mais grave, não se ponderam convenientemente outros factores, que não o custo económico. Um dos aspectos que fica sistematicamente para segundo plano, já que nem sequer é regulamentado em termos de utilização de materiais de construção, é o custo ambiental. No entanto, a redução do impacto ambiental da construção será ou pelo menos deverá ser uma condicionante dos próximos anos, ainda que isso venha a custar um corte progressivo com os sistemas construtivos e materiais actuais. Ora é precisamente a eminência desse corte que vai condicionar a implementação da redução, não apenas pelas pressões dos actuais grupos que dominam o mercado da construção, mas igualmente pelos futuros utentes que têm uma imagem da habitação muito associada aos sistemas construtivos convencionais existentes.

A1.1.1. A evolução dos materiais de construção e a habitação

Pode afirmar-se que os materiais de construção dos primeiros abrigos artificiais do Homem eram materiais ligeiros: nomeadamente cascas de árvore suportadas por ramos ou ossos e, por cima destas, com o intuito de aumentar a protecção (impermeabilização e estanquicidade), peles de animais e, posteriormente, materiais já com alguma transformação, como folhas de palmeira entrançadas que gradualmente foram evoluindo para tecidos de fibras naturais, como lã ou algodão.

Após o Neolítico, a fixação das populações trouxe a necessidade de construir duma forma mais permanente, utilizando materiais duráveis, tais como terra, argila ou pedra. Inicialmente, eram as

construções de carácter mais monumental, com função religiosa ou mortuária, que eram caracteristicamente realizados com materiais pesados e duráveis. As tendas foram substituídas por casas, o que trouxe uma evolução dos sistemas construtivos no sentido do incremento do peso e durabilidade.

Os sistemas construtivos das casas no Sul da Europa mantiveram-se praticamente sem grandes alterações até ao século XIX, prolongando-se mesmo até meados do século XX. Em Portugal e noutros países do Sul da Europa, eram caracterizados por paredes pesadas portantes em pedra, tijolo ou adobe e lajes de piso e cobertura ligeiras, em madeira. Só em construções mais excepcionais, como Igrejas ou palácios se utilizavam outros tipos de soluções construtivas para lajes de piso e coberturas, com abóbadas ou cúpulas, pesadas.

A pouca durabilidade e resistência dos materiais utilizados nos primeiros abrigos levou gradualmente a um certo abandono das envolventes exteriores leves. Estas, normalmente realizadas com matérias-primas naturais (madeira, peles e tecidos), deixaram de se evidenciar na construção de habitações, mas mais vulgarmente para a realização de abrigos para utilização sazonal e normalmente associadas a povos ou grupos nómadas, bem como a climas húmidos e quentes com pequenas amplitudes térmicas.

Só no presente século, com a generalização das fibras não naturais e dos revestimentos poliméricos, os materiais leves, nomeadamente membranas e painéis, evoluíram numa forma significativa no sentido da durabilidade, isolamento acústico e térmico e resistência. Por essa razão, o interesse nas construções e sistemas construtivos leves tem vindo gradualmente a aumentar na Europa. No entanto, em termos de habitação, este interesse não tem sido tão marcante, especialmente nos países do Sul da Europa, onde a tradição da construção há muito se arreigou aos sistemas construtivos pesados. Para o senso comum, em Portugal, a habitação subentende uma construção de grande durabilidade, enquanto o conceito de abrigo está associado a construções efémeras. Outro motivo levou, após a sedentarização do Homem, ao abandono das tendas em detrimento das casas pesadas em climas temperados, a sua pouca capacidade de armazenamento térmico, que não as tornava adequadas para a regulação natural das amplitudes térmicas diárias, deixando uma imagem negativa também sobre o conforto das construções leves. A utilização de sistemas leves em habitação permanente é possível, desde que convenientemente ponderada a sua utilização, já que a inércia se poderá manter forte, com a utilização mista de materiais pesados e leves numa forma mais optimizada, atendendo à maior variedade de sistemas disponíveis.

A1.1.2. Propriedades dos materiais de construção com implicações energéticas

As propriedades dos materiais de construção podem ser classificadas segundo vários aspectos. Na Figura A1.1.1 apresenta-se uma divisão onde as propriedades aparecem em função do estado e dimensão das partículas de materiais na forma em que são utilizados em construção.

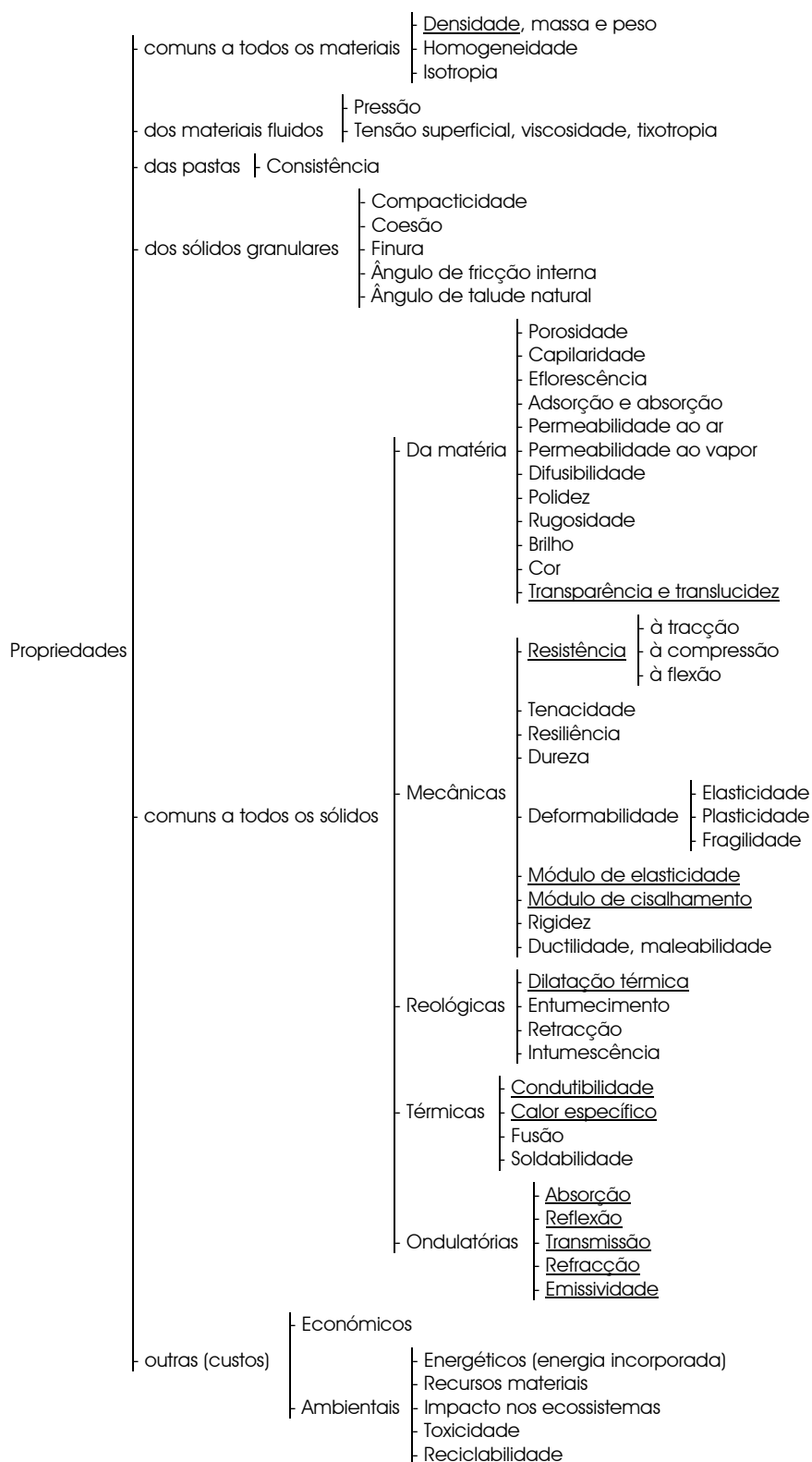


Figura A1.1.1. Classificação das propriedades dos materiais

Dentro desta divisão aparecem sempre aspectos físico-químicos*. Em termos de desempenho de resistência mecânica, durabilidade e conforto, são as propriedades físico-químicas que permitem decidir sobre as potencialidades de aplicação dum material.

A1.1.2.1. Propriedades físico-químicas

Em todos os projectos de edifícios é importante ter uma imagem clara das propriedades físicas dos materiais utilizados, já que só dessa forma se pode ponderar racionalmente da utilização de um material em detrimento de outros. Existem diversas solicitações nos diferentes tipos de materiais, sendo estas que condicionam o desempenho físico da solução construtiva. A maior parte das características das soluções construtivas da envolvente exterior com influência no desempenho higrotérmico, acústico e de luminosidade dependem das propriedades físicas dos materiais, das quais as principais se encontram sublinhadas no organograma da Figura A1.1.1.

Através de processos químicos permite-se a obtenção de várias matérias-primas para a elaboração dos materiais de construção. Desta forma, até mesmo o ar pode constituir uma matéria-prima para o fabrico de materiais de construção, estando por exemplo na base de alguns plásticos ou mesmo do vidro**.

As principais propriedades químicas podem dividir-se nos seguintes grupos:

- Resistência aos agentes químicos;
- Resistência e comportamento ao fogo;
- Durabilidade.

As propriedades químicas são importantes quando, por exemplo, se pretende determinar a resistência dum material a agentes químicos exteriores, como por exemplo à humidade, à poluição atmosférica, etc. Esta resistência vai ter influência na durabilidade, que também pode ser determinada por outros aspectos, que não têm apenas a ver com a química. Por outro lado, uma avaliação ambiental da produção de certos materiais de construção requer um conhecimento das substâncias que fazem parte do seu processo de fabrico e de como reagem entre si. Com esta análise consegue fazer-se um retrato dos possíveis poluentes existentes no material e os riscos ambientais que advêm do seu depósito em aterro. Também se trata duma questão química os possíveis efeitos que os materiais podem ter na qualidade do ar interior. Por outro lado, o conhecimento das propriedades químicas serve igualmente para evitar o contacto entre materiais que possam reagir entre si e assim afectar a sua durabilidade, o aspecto estético, a potencial libertação de gases poluentes, etc.

a) Absorção e libertação de energia em reacções químicas: As condições em que uma reacção química tem lugar são definidas pelo estado físico das substâncias. O estado sólido é caracterizado pela forte coesão molecular e pela forma estável; o estado gasoso pela fraca coesão molecular e por não ter forma e o estado líquido é um estado intermédio. Desta forma, cada substância tem um determinado conteúdo energético, chamado de energia coesiva

* A química dá uma imagem dos elementos constituintes duma substância, enquanto a física dá uma imagem da sua forma e estrutura. Para a química não importa se um mármore, por exemplo, está desfeito em pó ou é uma pedra – em ambos os casos a composição química é carbonato de cálcio. Da mesma forma, as propriedades físicas, tal como a resistência térmica, a resistência à compressão, etc., são vistas independentemente da sua composição química (Berge 1992).

** A temperaturas muito baixas o ar torna-se líquido. A partir deste estado o oxigénio e o azoto podem ser extraídos através do aquecimento. O azoto é utilizado para a produção do amoníaco (NH_3), aquecendo o hidrogénio e o azoto até uma temperatura de 500-600°C a uma pressão de 200 atmosferas e passando através dum catalizador, normalmente filtros com ferro. Entre outras coisas, o amoníaco é utilizado na produção do vidro, da lã de vidro e como matéria-prima principal na produção de sais de amoníaco, que são utilizados como aditivos ignífugantes em certos produtos de isolamento. Por reacção com hidrocarbonetos formam-se aminas, que podem ser utilizadas na produção de vários polímeros (Berge 1992).

* Se o conteúdo energético na substância original numa reacção química é maior que o conteúdo energético da substância resultante é libertada energia, principalmente em forma de calor. Esta é chamada uma reacção exotérmica. Ao aumentar a sua temperatura, a maior parte das substâncias passam do estado sólido ao líquido e posteriormente ao gasoso. Em alguns casos não existe transição pelo estado líquido e a substância passa directamente do estado sólido ao gasoso, a chamada sublimação. Como a coesão molecular é enfraquecida para os estados mais elevados, pode-se assumir que estas reacções necessitam de energia, pelo que absorvem calor, constituindo reacções endotérmicas. A quantidade de energia depende da temperatura à qual a substância muda, por exemplo de estado sólido a líquido, chamando-se neste caso de ponto de fusão.

do elemento que pode ser utilizada para regulação térmica dum ambiente interior*. A utilização de materiais com um ponto de fusão equivalente à temperatura de conforto permite aproveitar o fenómeno de absorção e libertação de energia durante a mudança de estado como regulador térmico para impedir grandes oscilações na temperatura interior. Os materiais com esta particularidade de fundir quando ultrapassam a temperatura de conforto (aproximadamente entre 20 e 25°C) são chamados em literatura de língua inglesa de PCMs (Phase Change Materials), sendo apresentado e avaliado um sistema de pavimento concebido e desenvolvido com base neste princípio no Capítulo VI.

A1.1.2.2. Outras propriedades

As propriedades que não se podem enquadrar nos aspectos físico-químicos são aquelas que geralmente se consideram como custos. Ainda assim podem estar relacionadas com os aspectos físico-químicos. Por exemplo a densidade em termos de peso próprio e volume vai influenciar o custo de transporte. Dentro dos custos é habitual considerar-se os custos económicos e os custos ambientais, que muitas vezes apresentam valores antagónicos e vão criar alguns obstáculos à escolha criteriosa entre vários materiais.

Podemos classificar dentro das outras propriedades os custos:

- Económicos;
- Ambientais (energéticos, recursos materiais, impactes nos ecossistemas, toxicidade, reciclabilidade).

É actualmente dominante o custo económico, que vai condicionar a escolha de entre os materiais com o desempenho físico adequado, os mais acessíveis, de modo a tornar viável a comercialização das construções. O custo ambiental dos materiais utilizados não é tão determinante como o custo económico, já que depende actualmente apenas da consciência individual de quem projecta. Espera-se no entanto que, num futuro próximo, condicione mais fortemente a escolha dos materiais, nomeadamente por imposições regulamentares, incentivos fiscais e por exigência dos próprios consumidores / utentes.

A1.1.3. Propriedades dos materiais de construção com implicações energéticas

Seguidamente serão mais detalhadamente desenvolvidas aquelas propriedades que têm uma maior influência no desempenho energético dos edifícios e que foram sublinhadas na classificação anterior. Serão apresentados em Tabelas os valores resumidos de algumas propriedades dos materiais de construção convencionais, bem como daqueles que constituem objecto deste estudo.

A1.1.3.1. Densidade

A densidade (ρ) relaciona o volume de um material com a sua massa*. A densidade aparente é aquela que normalmente caracteriza os materiais de construção e mostra-se os valores de alguns materiais na Tabela A1.1.1.

* A densidade de um material pode ser calculada de diversas formas:

- **Aparente ou relativa:** Obtém-se por dividir o peso do material pelo seu volume global ou aparente, que inclui os espaços vazios. No caso dos espaços vazios estarem ocupados por ar obtém-se a densidade seca (mínima aparente). No caso de estarem ocupados por água diz-se densidade saturada (máxima aparente). A Tabela A1.1.1 apresenta valores de densidade aparente de alguns materiais;
- **Real ou absoluta:** Exclui-se neste caso os espaços vazios no volume do material. Por exemplo para o cálculo da massa de uma parede de tijolo maciço esta será igual à densidade aparente, no entanto para uma parede de tijolo furado será inferior, correspondendo apenas à argila;
- **Submergida:** Resulta de subtrair à densidade saturada o peso do volume do líquido que a ocupa. Em construção o líquido é geralmente a água, por exemplo em materiais porosos submersos ou colocados abaixo do nível freático.

Tabela A1.1.1. Densidade aparente (ρ) de alguns materiais

| Material | [Kg/m ³] |
|--|----------------------|
| Aço | 7.780 |
| Acrílicos, PVC | 1.200-1.400 |
| Aglomerado de fibras de madeira aglutinadas com cimento | 1.350 |
| Aglomerado de fibras de madeira - denso | 850-1.000 |
| Aglomerado de fibras de madeira - leve | 200-250 |
| Aglomerado de partículas de madeira - prensadas | 350-750 |
| Aglomerado de partículas de madeira - extrudidas | 550-650 |
| Aglomerado negro de cortiça expandida | 120 |
| Água | 997 |
| Alcatrão | 400 |
| Alumínio | 2.700 |
| Argamassa de Inertes correntes | 1.800-2.100 |
| Argila expandida (8/16) | <400 |
| Aglomerado de cortiça | 500 |
| Arela - seca | 1.500 |
| Arela - saturada | 1.650 |
| Ar seco | 1.223 |
| Asfalto | 2.110 |
| Balsa | 60-120 |
| Basalto | 2.700-3.000 |
| Betão de Inertes correntes - normal | 2.200-2.400 |
| Betão de Inertes correntes - cavernoso | 1.700-2.100 |
| Betão de pozolana ou escória expandida - com finos | 1.200-1.600 |
| Betão de pozolana ou escória expandida - sem finos | 1.000-1.200 |
| Betão de pedra-pomes | 950-1.150 |
| Betão de argila expandida - dosagem de cimento $\geq 300 \text{ Kg/m}^3$ | 1.000-1.800 |
| Betão de argila expandida - dosagem de cimento $\leq 250 \text{ Kg/m}^3$ | 600-1.000 |
| Betão de vermiculite ou de perlite - cimento/areia: 1/3 | 600-800 |
| Betão de vermiculite ou de perlite - cimento/areia: 1/6 | 400-600 |
| Betão autoclavado | 400-800 |
| Borracha natural | 1.000 |
| Borrachas sintéticas, fôrmo-fenólicas, poliamidas, poliésteres, polietilenos | 900-1.700 |
| Brita ou seixo calcário | 1.000-1.500 |
| Cal | 1.600 |
| Calcário - mármore | 2.600 |
| Calcário - outros | 1.480-2.590 |
| Cerâmica de barro vermelho | 1.800-2.000 |
| Chapa de vidro | 2.500 |
| Chumbo | 11.340 |
| Cobre | 8.930 |
| Contraplacado | 350-550 |
| Duralumínio | 2.800 |
| Espuma rígida de Poliuretano | 30-40 |
| Estuque projectado ou de massa volúmica elevada | 1.100-1.300 |
| Estuque tradicional, placas de estafe, gesso cartonado | 750-1.000 |
| Estuque com Inertes leves - gesso/inerte: 1/1 | 700-900 |
| Estuque com Inertes leves - gesso/inerte: 1/2 | 500-700 |
| Ferro | 7.870 |
| Ferro fundido | 7.500 |
| Fibra de celulose | 60 |
| Fibra de Côco | 85 |
| Granito, gneisse, pórfiro | 2.300-2.900 |
| Grés - quartzoso | 2.200-2.800 |
| Grés - calcário | 2.000-2.700 |
| Lã de rocha | 20-180 |
| Lã de vidro | 8-80 |
| Latão | 8.400 |
| Lava, traquito, andesito | 2.000-2.700 |
| Madeira de massa volúmica elevada | 800-1.000 |
| Madeiras pouco densas (Carvalho, freixo, faia, pinho, casquinha, cedro, abeto) | 300-750 |
| Materiais granulares leves ou fibras soltas | 20-100 |
| Membranas betuminosas | 1.000-1.100 |
| Placas de fibrocimento | 1.400-2.200 |
| Poliestireno expandido moldado | 15-35 |
| Poliestireno expandido extrudido | 25-40 |
| Silex | 2.600-2.800 |
| Terra - seca | 1.500 |
| Terra - saturada | 1.700 |
| Terra - compactada | 1.850 |
| Tijolo | 1.800-2.000 |
| Vidro | 2.500 |
| Vidro celular | 110-140 |
| Xisto, ardósia | 2.000-2.800 |
| Zinco | 7.130 |

Fonte: (Pina dos Santos 1990)

A1.1.3.2. Permeabilidade ao vapor de água

O conhecimento das características de permeabilidade ao vapor de água dos materiais de construção é essencial à modelação da transferência de vapor através dos elementos construtivos, que pode ser feita através do método de Glaser, explicado por Freitas e Pinto (Freitas e Pinto 1998). Para aplicar este método é necessário conhecer as condições climáticas do interior e exterior ao elemento construtivo (Temperaturas e Pressão parcial de vapor no interior e exterior), as resistências térmicas superficiais e as características de permeabilidade das várias camadas dos materiais componentes da parede, dadas pelos seus Factor de resistência à Difusão do Vapor de Água (δ) e Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água (π).

* O Factor de resistência à Difusão do vapor de água (δ) é um valor 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 lâmina de ar em repouso, de igual espessura e sujeita às mesmas condições ambientais:

$$\delta_{ar} = \frac{D}{R_v \cdot T} \quad (A1.1.1.)$$

** O Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água (π) de um material homogéneo representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete desse material, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as duas faces.

*** O Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água de uma lâmina de Ar (π_{ar}) não ventilada (ar em repouso) depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar, podendo ser determinado a partir da seguinte relação (Freitas, 1998):

$$\pi_{ar} = \frac{D}{R_v \cdot T} \quad (A1.1.2)$$

Tabela A1.1.2. Factor de resistência à difusão do vapor de água (δ) e Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (π) de alguns materiais de construção

| Material | δ | π [kg/(m.s.Pa)x10 ⁻¹²] |
|--|------------|---|
| Aglomerado negro de cortiça expandida | 18 | 10 |
| Aglomerado de fibras de madeira (denso) | 46 a 200 | 0,93 a 4 |
| Aglomerado de fibras de madeira (leve) | 2,8 a 16 | 11 a 67 |
| Ardósia | ∞ | 0 |
| Ar em repouso (lâmina de ar não ventilada) | 0,85 a 1,1 | 165 a 215 |
| Argamassa à base de cal | 15 | 13 |
| Argamassa à base de cimento | 15 a 41 | 4,5 a 12 |
| Argila expandida a granel | 3 | 62 |
| Asfalto | 20 000 | 0,0093 |
| Betão cavernoso (1600 a 2100kg/m ³) | 5,9 a 11 | 17 a 31 |
| Betão celular | 4,4 | 42 |
| Betão de argila expandido | 7,4 | 25 |
| Betão normal | 30 | 6,3 |
| Betão de poliestireno (400kg/m ³) | 16 a 20 | 9 a 12 |
| Betume | 50 000 | 0,0037 |
| Borracha | 900 | 0,20 |
| Brita ou gódo | 4 | 46 |
| Calcário | 20 a 90 | 2,1 a 9,4 |
| Carvalho (800kg/m ³) | 40 a 60 | 3,1 a 4,6 |
| Contraplacado | 60 | 3,1 |
| Elementos cerâmicos | 7,5 a 9 | 21 a 25 |
| Elementos cerâmicos vitrificados | 100 a 300 | 0,62 a 1,9 |
| Espuma de ureia formaldeído | 1 a 5,5 | 33 a 185 |
| Espuma de vidro | >100 000 | <0,0019 |
| Espuma elastomérica | 8900 | 0,021 |
| Espuma rígida à base de PVC celular | 92 a 260 | 0,7 a 2 |
| Espuma rígida de poliuretano | 44 | 4,2 |
| Espuma rígida formo-fenólica | 26 a 140 | 1,3 a 7,1 |
| Fala (800kg/m ³) | 40 a 50 | 3,7 a 4,6 |
| Fibrocimento | 50 | 3,7 |
| Gesso cartonado em placas | 5,5 a 11 | 17 a 34 |
| Granito, Basalto e Mármore | 300 | 0,62 |
| Granulado de cortiça expandida | 3 | 62 |
| Grés | 15 a 30 | 6,2 a 12 |
| Lã de rocha | 1,1 a 1,3 | 140 a 170 |
| Lã de vidro | 1,1 a 1,5 | 125 a 170 |
| Linóleo | 1800 | 0,1 |
| Metais | ∞ | 0 |
| Painel de partículas de madeira aglutinadas com cimento | 2,8 a 10 | 18 a 67 |
| Perlite expandida | 2 | 93 |
| Pinho (530 a 600kg/m ³) | 70 | 2,6 |
| Placas de poliéster reforçado com fibra de vidro | >9000 | <0,02 |
| Placas de polietileno e polimetacrilato de metilo | >9000 | <0,02 |
| Poliestireno expandido | 30 | 6,3 |
| Poliestireno expandido moldado em blocos por via húmida (9 a 16kg/m ³) | 22 a 30 | 6,3 a 8,3 |
| Poliestireno expandido moldado em contínuo por via húmida (11 a 20kg/m ³) | 36 a 59 | 3,1 a 5,2 |
| Poliestireno expandido termo-comprimido em contínuo por via seca (18 a 23kg/m ³) | 63 a 110 | 1,7 a 2,9 |
| Poliestireno expandido extrudido (28kg/m ³) | 105 | 1,8 |
| Polietileno reticulado | 1800 | 0,10 |
| Reboco à base de gesso | 4,9 a 11 | 17 a 38 |
| PVC em folha | 20 000 | 0,0093 |
| Tijolo silico-calcário | 9 a 27 | 6,9 a 21 |
| Tijolo vitrificado | 400 | 0,46 |
| Vidro | ∞ | 0 |

Fonte: (Freitas 1998)

Os valores da Tabela A1.1.2 são para materiais secos. A permeabilidade ao vapor de água pode variar duma forma significativa com o seu conteúdo em humidade, como se pode ver no exemplo da Tabela A1.1.3. Para efeitos de simplificação de cálculo considera-se geralmente um conteúdo nos materiais de 0% de humidade.

Tabela A1.1.3. Factor de resistência à difusão do vapor de água (μ) e Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (π) de madeira de faia em função do teor de humidade

| Material | | μ | π [Kg/(m.s.Pa)* 10 ⁻¹²] |
|----------|-----------------|-------|---|
| Faia | Com 10% de água | 70,0 | 2,6 |
| | Com 15% de água | 11,0 | 17,0 |
| | Com 20% de água | 8,5 | 22,0 |
| | Com 40% de água | 2,0 | 93,0 |

Fonte: (Freitas 1998)

A1.1.3.3. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica (λ)* é uma propriedade característica de cada material, quer se apresente em estado sólido, líquido ou gasoso.

O valor de λ é muito influenciado pela existência de cavidades elementares, ocupadas por ar, por exemplo em materiais porosos ou alveolares. Estas cavidades podem ser propositadas, ou acidentais, devido a certos processos tecnológicos, mudanças ou danos na estrutura. Os alveolos acidentais podem fazer variar os valores de λ duma forma imprevisível, favorecendo ou não o desempenho higratérmico**.

O valor de λ não é normalmente constante durante toda a vida útil dum material, podendo ser alterado como consequência de determinados factores, tais como (Davies 2001):

- **Temperatura:** geralmente o valor de λ diminui com o aumento da temperatura. Para materiais de construção normalmente é adoptado o λ_{10} (correspondendo a uma temperatura média do material de 10°C com uma temperatura interior de 20°C e uma temperatura exterior de 0°C);
- **Humidade:** o aumento da humidade do material faz aumentar o valor de λ ;
- **Envelhecimento:** alguns materiais de isolamento contêm um gás com um λ mais baixo que o ar. Este gás pode dispersar-se e ser substituído por ar ao longo do tempo de tal forma que a condutibilidade térmica aumenta com o tempo. Em painéis sandwich o efeito é minimizado, porque a maior parte das espumas plásticas têm uma percentagem elevada de células fechadas e o material está protegido pelas chapas exteriores.

Em algumas soluções de construção leve de madeira torna-se especialmente importante garantir a estanquicidade, pela degradação e aumento exponencial da condutibilidade que a água provoca neste material, bem como nalguns tipos de isolamentos fibrosos (como a fibra de vidro e a lã de rocha). Na Tabela A1.1.4 apresentam-se os valores de condutibilidade de alguns materiais de construção comuns, para temperaturas de projecto, para aplicação no RCCTE.

* A condutibilidade térmica pode ser definida como a quantidade de calor (W) que atravessa 1m² de um material com uma espessura de 1m durante 1 hora com uma diferença de 1°C entre as superfícies opostas. Pode-se representar graficamente como na Figura A1.1.1. As outras quatro superfícies consideram-se absolutamente isoladas e o fluxo de calor dá-se apenas na direcção t_1 - t_2 . A λ é directamente proporcional à área das superfícies e inversamente proporcional à distância entre elas. A unidade é J/s.°K.m ou W/°K.m.

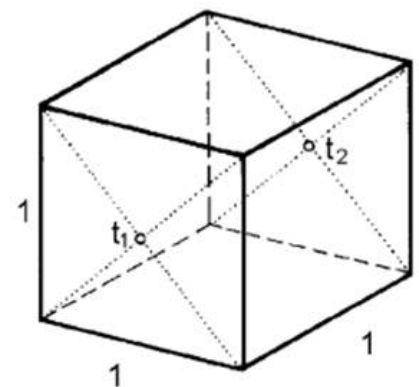


Figura A1.1.1. Representação esquemática da condutibilidade térmica (Davies 2001)

** Quando se projecta, tem de se ter em conta valores conservadores de λ , que prevejam aumentos provocados pela deposição, compressão, esmagamento ou humidade. Por exemplo, o valor de λ da espuma de poliestireno entre painéis de betão (estrutura sandwich) aumenta, devido a estes efeitos, entre 35 a 45% (Davies 2001).

Tabela A1.1.4. Condutibilidade térmica (λ) de materiais de construção

| Material | W/m.°C |
|---|--------|
| Isolamentos | |
| Lã de rocha (20-35kg/m ³) | 0,045 |
| (35-180kg/m ³) | 0,040 |
| Lã de vidro (8-12kg/m ³) | 0,045 |
| (12-80kg/m ³) | 0,040 |
| Vidro celular (110-140kg/m ³) | 0,050 |
| Aglomerado negro de cortiça (10-150kg/m ³) | 0,045 |
| Poliestireno expandido moldado (15-35kg/m ³) | 0,040 |
| Poliestireno expandido extrudido (25-40kg/m ³) | 0,035 |
| Espuma rígida de Poliuretano (30-40kg/m ³) | 0,030 |
| Argila expandida (8/16) | 0,160 |
| Materiais granulares leves ou fibras soltas | 0,050 |
| Pedras (Incluindo juntas de assentamento) | |
| Granito, gneisse, pórfiro | 3,00 |
| Xisto, ardósia | 2,20 |
| Basalto | 1,60 |
| Lava, traquito, andesito | 1,10 |
| Calcário - mármore | 2,90 |
| Calcário - outros | 1,40 |
| Grés - quartzoso | 2,60 |
| Grés - calcário | 1,90 |
| Brita ou seixo calcário | 0,70 |
| Sílex | 2,60 |
| Betões e compostos de cimento | |
| Betão de inertes correntes - normal | 1,75 |
| Betão de inertes correntes - cavernoso | 1,40 |
| Betão de pozolana ou escória expandida - com finos | 0,52 |
| Betão de pozolana ou escória expandida - sem finos | 0,35 |
| Betão de pedra-pomes | 0,46 |
| Betão - dosagem de cimento >300Kg/m ³ | 0,70 |
| Betão - dosagem de cimento <300Kg/m ³ | 0,25 |
| Betão de vermiculite ou de perlite - cimento/areia: 1/3 | 0,31 |
| Betão de vermiculite ou de perlite - cimento/areia: 1/6 | 0,24 |
| Betão autoclavado | 0,20 |
| Betão de aparas de madeira | 0,12 |
| Argamassa de inertes correntes | 1,15 |
| Placas de fibrocimento | 0,80 |
| Cerâmica | |
| Cerâmica de barro vermelho | 1,15 |
| Gessos | |
| Estuque projectado | 0,50 |
| Estuque tradicional, placas de estafe, gesso cartonado | 0,35 |
| Estuque com inertes leves - gesso/inerte: 1/1 | 0,30 |
| Estuque com inertes leves - gesso/inerte: 1/2 | 0,25 |
| Madeiras e derivados | |
| Madeira de massa volúmica elevada | 0,290 |
| Carvalho, freixo, faia, pinho, casquinha, cedro, abeto | 0,150 |
| Balsa | 0,052 |
| Aglomerado de fibras de madeira: 300<d<400Kg/m ³ | 0,110 |
| Aglomerado de fibras de madeira: 400<d<500Kg/m ³ | 0,130 |
| Aglomerado de fibras de madeira: 500<d<600Kg/m ³ | 0,150 |
| Aglomerado de fibras de madeira: 600<d<800Kg/m ³ | 0,180 |
| Aglomerado de partículas de madeira - prensadas | 0,120 |
| Aglomerado de partículas de madeira duro (Platex) | 0,160 |
| Aglomerado de madeira / cimento | 0,220 |
| Contraplacado 350<d<450Kg/m ³ | 0,115 |
| Contraplacado 450<d<600Kg/m ³ | 0,150 |
| Metais | |
| Aço | 52 |
| Alumínio | 230 |
| Chumbo | 35 |
| Cobre | 380 |
| Duralumínio | 160 |
| Ferro | 72 |
| Ferro fundido | 56 |
| Latão | 110 |
| Zinco | 112 |
| Polímeros | |
| Borrachas sintéticas, poliamidas, poliésteres, polietilenos | 0,4 |
| Acrílicos, PVC | 0,2 |
| Revestimentos | |
| Aglomerado de cortiça | 0,10 |
| Alcatifa | 0,05 |
| Areia - seca | 0,37 |
| Areia - húmida | 1,28 |
| Terra - seca | 0,16 |
| Terra - húmida | 0,77 |
| Água | 0,58 |
| Ar seco | 0,24 |
| Membranas betuminosas | 0,23 |
| Asfalto | 0,81 |
| Vidro | |
| Chapa de vidro | 1,10 |

Fonte: (Pina dos Santos 1990); (Sánchez 2005)

A1.1.3.4. Calor específico e Difusibilidade térmica

O calor específico (c) é a energia produzida aumentando em uma unidade de temperatura, uma unidade de massa. Este é normalmente medido em J/kg.K ou Kcal/kg.°C. Para os materiais de construção o valor do calor específico está contido no intervalo entre 300 e 1.500 J/kg.K. Uma exceção relevante é a madeira, cujo calor específico está situado entre 1.500 e 2.510 J/kg.K, como se pode ver na Tabela A1.1.5. A água é, no entanto, a matéria comum com um maior calor específico, 4.187 J/kg.K (sendo apenas ultrapassada pelo Hidrogénio e Amoníaco, como se pode ver na mesma Tabela, que não são materiais aplicáveis em construção). Desta forma, o teor de humidade nos materiais vai influenciar numa forma significativa a sua capacidade de armazenamento térmico.

Tabela A1.1.5. Calor específico (c) de alguns materiais

| Material | kcal/kg.°C | J/kg.K |
|----------------------------|-------------|-------------|
| Aço | 0,110-0,120 | 450-512 |
| Acrílico | 0,350 | 1.460 |
| Água | 1,000 | 4.187 |
| Álcool metílico | 0,609 | 2.549 |
| Alumínio | 0,200-0,215 | 830-950 |
| Amoníaco | 1,125 | 4.710 |
| Ar | 0,240 | 1.000 |
| Arela | 0,190 | 800 |
| Argamassa de cimento | 0,250 | 1.046 |
| Asfalto | 0,215 | 920 |
| Betão | 0,210-0,260 | 840-1.040 |
| Calcário | 0,190 | 810 |
| Cerâmica | 0,220-0,240 | 920-1.000 |
| Chumbo | 0,031 | 128-130 |
| Cobre, Zinco | 0,092 | 386-390 |
| Cortiça, aglomerado | 0,040 | 170 |
| Estanho, Prata | 0,055 | 230-240 |
| Granito | 0,160 | 650 |
| Grés | 0,180 | 745 |
| Hidrogénio | 3,390 | 14.200 |
| Lã mineral | 0,160-0,190 | 670-800 |
| Madeira | 0,360-0,600 | 1.500-2.510 |
| Madeira, aglomerado | 0,310 | 1.300 |
| Mármore | 0,200 | 830 |
| Óleo vegetal | 0,400 | 1.670 |
| Painel de fibras isolantes | 0,330 | 1.400 |
| Painel de aglomerado denso | 0,300 | 1.250 |
| Parafina | 0,510 | 2.130 |
| Pedras calcárias | 0,220 | 920 |
| Petróleo | 0,510 | 2.130 |
| Polietileno | 0,550 | 2.300 |
| Poliestireno expandido | 0,370 | 1.550 |
| Poliuretano expandido | 0,250 | 1.045 |
| PVC | 0,250 | 1.040 |
| Terra | 0,440 | 1.840 |
| Vapor de água | 0,420 | 1.760 |
| Vidro | 0,200 | 750 |
| Zinco | 0,090 | 389 |

Fontes: (Sastre 2000); www.ex.ac.uk/trol/dictunit/notes5/htm;
www.engineeringtoolbox.com/24_151.html

Um determinado material, em função do calor específico (c), da densidade (γ) e da condutibilidade térmica (λ) consegue aquecer mais ou menos rapidamente. A difusibilidade térmica (α) caracteriza esta propriedade e pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

Tabela A1.1.6. Difusibilidade térmica de alguns materiais (Sastre 2000)

| Material | α [10 ⁻⁶ m ² /s] |
|------------------|---|
| Cobre | 112 |
| Alumínio | 84 |
| Latão | 34,2 |
| Ar | 22,5 |
| Aço | 18,8 |
| Aço Inoxidável | 3,9 |
| Fibra de vidro | 1,6 |
| Betão normal | 0,75 |
| Vidro | 0,51 |
| Terra argilosa | 0,5 |
| Água | 0,15 |
| Madeira de Pinho | 0,07 |
| PVC | 0,05 |

$$\alpha = \lambda / \gamma \cdot C$$

(A1.1.3)

Onde:

 λ – Condutibilidade térmica [kcal/h.m.°C]; γ – Densidade [kg/m³]; c – Calor específico [kcal/kg.°C]

São apresentados na Tabela A1.1.6, valores de difusibilidade térmica (α) de alguns materiais.

A1.1.3.5. Absorção, Transmissão, Reflexão e Emissividade

Todas as superfícies emitem calor radiante. A quantidade total de emissão de calor por unidade de área depende da temperatura absoluta e emissividade (ε) da superfície, pela seguinte equação:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

(A1.1.4)

Onde:

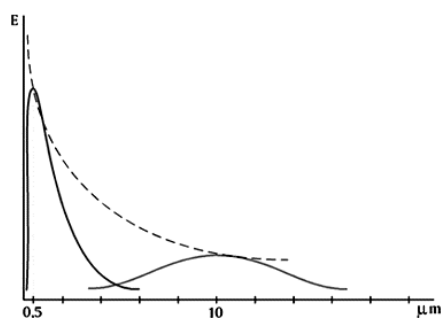
 q - fluxo de calor por unidade de superfície [W/m²]; T - temperatura absoluta; ε - emissividade [valor numérico entre 0 e 1]; σ - constante de Stefan-Boltzman [5,6697.10⁻⁴ W/m² K⁴].

Figura A1.1.2. Lei de Wien (FABUTE 2003)

O calor que um corpo liberta por radiação integra ondas electromagnéticas de vários comprimentos de onda. Wien mostrou que o comprimento de onda que resulta na máxima potência de emissão, multiplicado pela temperatura absoluta dá uma constante. A lei de Wien pode ser representada graficamente (Figura A1.1.2) ou dada pela seguinte expressão (FABUTE 2003):

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu\text{mK}$$

(A1.1.5)

Onde:

 λ_{\max} – comprimento de onda da máxima potência de emissão; T – Temperatura absoluta.

Quando a energia radiante atinge uma superfície, esta pode ser absorvida, reflectida, ou transmitida através do material. A soma dos coeficientes numéricos relativos às fracções mencionadas anteriormente, é (FABUTE 2003):

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

(A1.1.6)

Onde:

 α - coeficiente de absorção; τ - coeficiente de transmissão; ρ - coeficiente de reflexão.

Se $\alpha=1$, a superfície é negra. Se $\alpha \geq 0$, $\rho \geq 0$, $\tau=0$, o material é opaco, Se $\tau > 0$, o material é transparente.

A maior parte dos materiais de construção são opacos. Para os materiais opacos, o coeficiente de reflexão pode ser uma propriedade importante quer estes sejam utilizados nas superfícies exterior ou interior, vindo a ter influência quer nos ganhos térmicos, quer na iluminação natural.

Apesar de constituírem uma minoria, os materiais transparentes e ou translúcidos, como o vidro ou alguns plásticos, têm um papel fundamental nos sistemas solares passivos. Em termos de transmissão e reflexão faz-se geralmente uma caracterização em termos luminosos e energéticos, em função dos comprimentos de onda. Na Tabela A1.1.7 apresentam-se valores destas propriedades para vidros, bem como dos respectivos Coeficientes U, Factores solares e Coeficientes de sombreamento.

Tabela A1.1.7. Propriedades energéticas de vidros de construção

| | Transmissão luminosa T_l (%) | Reflexão luminosa exterior R_{se} (%) | Reflexão luminosa interior R_{si} (%) | Transmissão energética T_e (%) | Reflexão energética exterior R_{se} (%) | Coeficiente U | Factor solar (%) EN 410 | Coeficiente de Sombreamento |
|---|-----------------------------------|--|--|-------------------------------------|--|---------------|----------------------------|-----------------------------|
| Vidro simples Incolor 6mm | 89 | 8 | 8 | 79 | 7 | 5,8 | 0,82 | 0,95 |
| Vidro extra-claro 6mm | 91 | 8 | 8 | 90 | 8 | 5,7 | 0,90 | 1,04 |
| Vidro pirafítico Incolor face ext.reflect.)6mm | 47 | 32 | 26 | 51 | 26 | 5,7 | 0,57 | 0,66 |
| Vidro simples Incolor 10mm | 86 | 8 | 8 | 72 | 7 | 5,6 | 0,78 | 0,89 |
| Vidro simples Incolor 19mm | 82 | 7 | 7 | 60 | 6 | 5,3 | 0,69 | 0,79 |
| Vidro laminado 10mm | 87 | 8 | 8 | 71 | 7 | 5,7 | 0,77 | 0,86 |
| Vidro laminado de protecção 22mm | 82 | 7 | 7 | 53 | 6 | 5,4 | 0,64 | 0,73 |
| Vidro duplo Incolor 4+(6)+6mm | 80 | 14 | 14 | 67 | 13 | 3,3 | 0,74 | 0,85 |
| Vidro duplo Incolor 4+(12)+6mm | 80 | 14 | 14 | 67 | 13 | 2,9 | 0,75 | 0,86 |
| Vidro duplo Incolor 5+(12)+5mm | 80 | 14 | 14 | 66 | 12 | 2,8 | 0,74 | 0,85 |
| Vidro duplo c/ baixa emissiv. 6+(10)+4mm ar na caixa-de-ar. | 75 | 12 | 14 | 49 | 25 | 1,9 | 0,57 | 0,65 |
| Vidro duplo c/ baixa emissiv. 6+(16)+4mm ar na caixa-de-ar. | 75 | 12 | 14 | 49 | 25 | 1,4 | 0,57 | 0,65 |
| Vidro duplo c/ baixa emissiv. 6+(16)+4mm argon na caixa-de-ar. | 75 | 12 | 14 | 49 | 25 | 1,1 | 0,57 | 0,65 |
| Vidro duplo c/ película de isolamento acústico no vidro Interior 6+(12)+10.8mm | 79 | 14 | 14 | 60 | 12 | 2,8 | 0,71 | 0,81 |
| Vidro duplo c/ película de isolamento acústico em ambos os vidros 6.8+(9)+10.8mm | 77 | 14 | 14 | 55 | 11 | 3,0 | 0,67 | 0,77 |
| Vidro duplo c/ película de isolamento acústico em ambos os vidros 8.8+(12)+12.8mm | 76 | 14 | 14 | 52 | 10 | 2,7 | 0,64 | 0,73 |

Fonte: (Saint-Gobain 2000)

Para qualquer superfície onde a radiação incidente não é dependente do ângulo, ou onde a superfície é difusa, $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$. Para superfícies cinzentas também se sabe que $\varepsilon = \alpha$.

Se a emissividade não depende do comprimento de onda a superfície é chamada de **cinzenta**. Várias classes de superfícies aproximam-se desta condição em algumas regiões do espectro. Para outras superfícies a emissividade é função do comprimento de onda. Na prática da concepção de sistemas solares passivos em edifícios, superfícies cuja emissividade depende do comprimento de onda são chamadas de **selectivas**. Os mais importantes espectros de comprimentos de onda a considerar na concepção destes sistemas são: o de radiação solar directa e o de radiação infravermelha de comprimento de onda longo. As superfícies estão expostas ao primeiro intervalo e emitem radiação no segundo. Superfícies terrestres contidas num intervalo à volta de 300°K têm um α_{\max} de 10 μ m, aproximadamente.

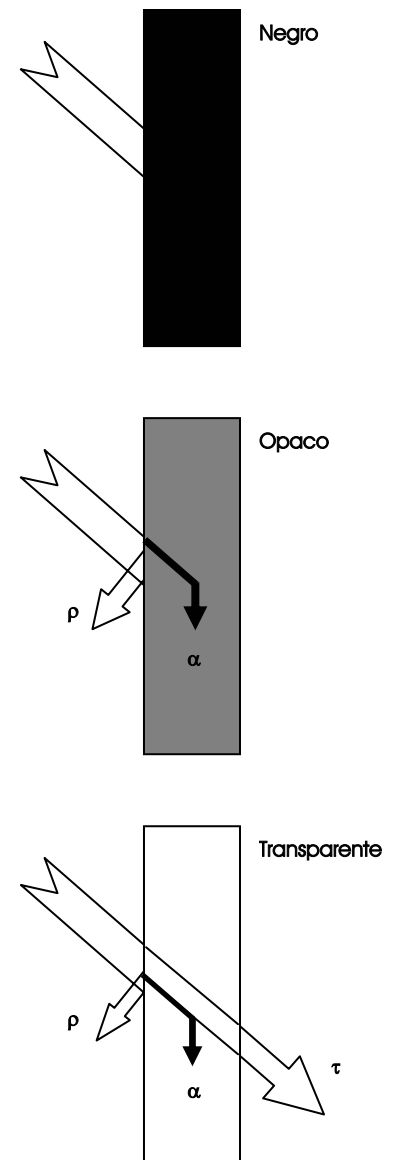


Figura A1.1.3. Representação esquemática de α , ρ e τ para materiais negros, opacos e transparentes

As trocas de calor por radiação entre dois corpos são dadas pela seguinte equação:

$$q = F \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (\text{A1.1.7})$$

Onde,

σ - constante de Stefan-Boltzman = $5,6697 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$;

ε - emissividade (para um corpo negro a emissividade é 1);

T_1, T_2 - temperatura das superfícies 1 e 2 (°K);

F - factor angular *.

A equação anterior é utilizada para o cálculo de trocas de calor radiante entre:

- as superfícies interiores de um compartimento, se forem necessários dados detalhados (em primeiro lugar nas paredes de maior área, com aquecimento radiante);
- as superfícies e os ocupantes, por questões de avaliação do conforto térmico.

A Emissividade é assim a relação entre o poder emissivo total de um determinado corpo e o poder emissivo total de um corpo negro absoluto à mesma temperatura, medido para comprimentos de onda da gama dos infra-vermelhos. Alguns valores de ε de materiais de construção e respectivos comprimentos de onda de medição são apresentados na Tabela A1.1.8.

Tabela A1.1.8. Emissividade de alguns materiais

| Material | Comprimento de onda [μm] | Emissividade ε |
|--|--------------------------|----------------------------|
| Aço | - | 0,07 |
| Água | 8-14 | 0,98 |
| Alumínio | - | 0,09 |
| Areia | - | 0,90 |
| Argamassa de inertes correntes | 2-5,6 | 0,87 |
| Argila expandida (8/16) | 8-14 | 0,91 |
| Betão normal | 2-5,6 | 0,92 - 0,97 |
| Borrachas sintéticas, formo-fenólicos, poliamidas, políesteres, polietilenos | 8-14 | 0,95 |
| Calcário | 5 | 0,96 |
| Carvalho, freixo, faia, pinho, casquinha, cedro, abeto | - | 0,90 |
| Cerâmica de barro vermelho | 2-5,6 | 0,93 |
| Chumbo | 8-14 | 0,28 |
| Cobre | 8-14 | 0,07 |
| Contraplacado | 2-5,6 | 0,83 |
| Estuque projectado ou de massa volumica elevada | 2-5,6 | 0,86 - 0,90 |
| Estuque tradicional, placas de estafe, gesso cartonado | 2-5,6 | 0,90 |
| Ferro | 8-14 | 0,21 |
| Ferro fundido | 8-14 | 0,81 |
| Granito, gnelisse, pórfiro | 5 | 0,96 |
| Latão | 8-14 | 0,10 |
| Placas de madeira prensadas | - | 0,87 |
| Poliestireno expandido extrudido | 5 | 0,60 |
| Polimetacrilato de metilo (acrílico), policloreto de vinilo (PVC) | 2-5,6 | 0,91 - 0,94 |
| Terra | - | 0,92 |
| Vidro celular | 8-14 | 0,92 |
| Zinco | - | 0,25 |

Fonte: <http://www.infrared-thermography.com>

* Para calcular o factor angular deverá ser assumido que:

- as superfícies são cinzentas (do ponto de vista térmico),
- a radiação e a reflexão são difusas,
- o ambiente entre superfícies, não emite nem absorve radiação,
- a absorção e a emissão, ao longo das superfícies são constantes e não dependem da temperatura (esta última varia num pequeno intervalo).

A potência emissiva de uma superfície hemisférica, sobre uma superfície emissiva, varia com o co-seno do ângulo entre a normal da superfície radiante e a linha que liga a superfície radiante até ao ponto da superfície hemisférica. Assim a troca de calor radiante entre duas superfícies depende da posição geométrica: como elas se "vêem" uma à outra. Esta relação é expressa pelo factor angular, o qual é definido como a fracção de energia radiante difusa que abandona uma superfície e vai directamente para a outra.

O factor angular pode ser determinado por técnicas numéricas ou gráficas.

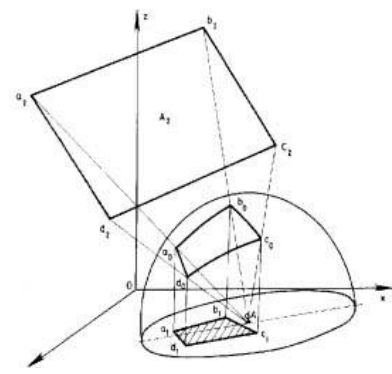


Figura A1.1.4. Factor angular (FABUTE 2003)

A1.1.3.6. Deformabilidade (Coeficiente de Poisson e Módulo de elasticidade)

Este trabalho não pretende referir propriedades mecânicas dos materiais, ainda que algumas possam ter influência no conforto das construções. Como não se vai tratar da optimização do peso das estruturas, mas apenas da optimização com vista ao conforto das soluções de envolvente exterior, as propriedades mecânicas que importa salientar têm a ver apenas com o peso próprio dos sistemas construtivos de paredes exteriores, com o desempenho em termos de durabilidade, de resistência ao vento e humidade, bem como deformabilidade com influência no isolamento acústico, através do coeficiente de Poisson.

Um aspecto a considerar nas deformações dos materiais é o da reversibilidade do fenómeno, que pode ser de dois tipos:

- **Elástica:** diz-se que uma deformação é elástica quando o material recupera a sua forma inicial, uma vez finalizada a acção que provoca a deformação
- **Plástica:** diz-se que uma deformação é plástica quando o material não recupera total ou parcialmente a forma inicial após a aplicação do esforço.

O módulo de elasticidade, também designado por módulo de Young (E), é o coeficiente de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, considerando um regime elástico*. Este módulo vai ter influência nos modos de vibração dos materiais de construção, tendo no caso da física das construções especial relevância na acústica. Alguns valores são apresentados na Tabela A1.1.9.

O coeficiente de Poisson (ν) é a relação entre a deformação longitudinal e a deformação transversal. Os valores para alguns materiais são apresentados na Tabela A1.1.10.

* A maior parte dos materiais tem um comportamento elástico se os esforços aplicados não são muito elevados. Esta tensão limite, a partir da qual o material já não tem um comportamento linearmente elástico designa-se por limite elástico. Se, além de ter um comportamento elástico, o material tem também um módulo de deformação constante dentro duns limites normais, nos quais trabalhará realmente o elemento construtivo, pode dizer-se que o material em questão é linearmente elástico e que o seu módulo de deformação, neste caso designado por módulo de Elasticidade (E), é constante (Sastre 2000).

Tabela A1.1.9. Módulos de elasticidade (E) característicos de alguns materiais

| Material | GN/m ² |
|--|-------------------|
| Aço, Níquel | 206,0 |
| Aglomerado de cortiça | 0,005 |
| Alumínio | 72,0 |
| Ardósia | 60,0-90,0 |
| Argila expandida (8/16) | 0,00025 |
| Basalto | 105,0 |
| Betão normal | 29,0 |
| Betão de elevada resistência | 34,5-44,8 |
| Betão leve | 6,89-20,7 |
| Betão cavernoso | 1,45-3,12 |
| Borracha natural | 3,3-5,9 |
| Borrachas sintéticas, forno-fenólicos, poliamidas, poliésteres, polietilenos | 1,0 |
| Calcário | 6,8-31,8 |
| Carvalho, freixo, fava, pinho, casquinha, | 14,0 |
| Cedro, abeto, choupo | 12,0 |
| Cerâmica de barro vermelho | 14,0 |
| Chumbo | 16,0 |
| Cobre | 115,0 |
| Contraplacado | 12,4 |
| Duralumínio | 70,0 |
| ETFE | 0,8 |
| Ferro forjado | 190,0 |
| Ferro fundido | 100,0 |
| Fibra de côco | 0,285 |
| Granito, gneisse | 50,0 |
| Latão | 90,0 |
| Mármore | 55,0 |
| Placas de fibrocimento | 5,0 |
| Placas de partículas de madeira aglutinadas com cimento | 5,5 |
| Polycarbonato | 2,4 |
| Poliestireno expandido moldado | 3,0 |
| Poliestireno expandido extrudado | 3,4 |
| Polimetacrilatos de metilo (acrílicos), policloreto de vinilo (PVC) | 3,5 |
| Poliuretano | 0,17-34,50 |
| PTFE | 0,3-0,8 |
| Terra compactada (Adobe) | 0,7-7,0 |
| Tijolo com argamassa de cimento | 6,2 |
| Vidro | 70,0 |
| Vidro celular | 15,0 |
| Xisto, ardósia | 100,0 |
| Zinco | 95,0 |

Fontes: (Brazão Farinha 2000); (Centro de Investigación Navapalos, 1998); (Sastre 2000);
<http://www.abrapex.com.br>; <http://www.artenum.org>; <http://clientes.netvisao.pt/carlos11/cmc/>;
<http://www.goodfellow.com/csp/active/gfMaterialTables.csp>

Tabela A1.1.10. Coeficientes de Poisson de alguns materiais

| Material | Adimensional |
|------------------------------------|--------------|
| Aço comercial | 0,285 |
| Aço Inox | 0,29 |
| Alumínio | 0,34 |
| Betão | 0,10-0,20 |
| Borracha | 0,45-0,50 |
| Chumbo | 0,44 |
| Cortiça | 0 |
| Ferro fundido | 0,2-0,30 |
| Pedra (granito, mármore, calcário) | 0,2-0,30 |
| Plexiglas | 0,40 |
| PTFE | 0,46 |
| Polycarbonato | 0,37 |
| Titanio | 0,33 |
| Vidro | 0,25 |
| Zinco | 0,34 |

Fontes: <http://lut.univ-lemans.fr/gmp/cours/rebiere/proprietesmecaniques.html>; (Brazão Farinha 2000)

Quando se aplica um esforço de cisalhamento, a força e a deformação são também proporcionais entre si, segundo a expressão:

$$G = \tau / \gamma \quad (\text{A1.1.8})$$

Onde:

G : módulo de cisalhamento

τ : força

γ : deformação

Por sua vez, o módulo de elasticidade (E), o módulo de cisalhamento (G) e o coeficiente de Poisson (ν) estão relacionados entre si através da equação (Sastre 2000):

$$E = 2.G (1 + \nu) \quad (\text{A1.1.9})$$

A1.1.3.7. Outras propriedades mecânicas

A maior parte dos materiais, ao ser sujeitos a esforços e após atingirem o seu limite de deformação, quebram, decompondo-se em duas ou mais unidades. Neste caso diz-se que se atingiu a ruptura do material. Se, durante o processo de ruptura se analisam as tensões de deformações que se produzem, pode realizar-se um gráfico das tensões/deformações e definir os valores de tensão de ruptura e deformação de ruptura.

A ruptura não se produz sempre com a mesma carga. Na generalidade dos materiais de construção o tempo vai limitando a capacidade de carga dum elemento. Este fenómeno pode dever-se à fadiga* e/ou ao cansaço**.

A resistência corresponde à capacidade que um material tem para suportar esforços externos ou internos sem entrar em ruptura nem se deformar excessivamente. Segundo o tipo de esforço ou deformação aplicada podem definir-se os seguintes tipos de resistência mecânica:

- **Resistência à compressão:** exprime a capacidade resistente do material até ao colapso, quando sujeito à solicitação de uma carga de compressão (em MPa);
- **Resistência à tracção:** expressa a tensão de ruptura dum material quando sujeito a esforços de tracção (em MPa). É importante para o cálculo dos elementos horizontais e das estruturas tensadas, como as suspensas ou pneumáticas;
- **Resistência à flexão;**
- **Resistência ao cisalhamento;**
- **Resistência à torsão;**
- **Resistência à flexo-tracção, flexocompressão, etc.**

Apresentam-se na Tabela A1.1.11 valores de resistência à compressão e à tracção de alguns materiais de construção.

* Fadiga: Diminuição da resistência à ruptura dum material ou elemento construtivo submetido a cargas de intensidade e sinal variável;

** Cansaço: Diminuição da resistência à ruptura dum material ou elemento construtivo submetido a cargas permanentes muito elevadas (Sastre 2000).

Tabela A1.1.11. Resistência à compressão e à tracção de materiais de construção

| Material | Resistência à compressão (Kgf/cm ²) | Resistência à tracção (Kgf/cm ²) |
|--|---|--|
| Lã de rocha | 0,46 | 1,12 |
| Vidro celular | 10,20 | 1,22 |
| Aglomerado negro de cortiça | 0,20 | 0,94 |
| Poliestireno expandido moldado | 1,02 | - |
| Poliestireno expandido extrudido | 3,00 | - |
| Espuma rígida de poliuretano | 2,50 | - |
| Granito, gneisse, pórfiro | 1.784,51 | - |
| Xisto, ardósia | 713,80 | - |
| Basalto | 2.039,44 | - |
| Mámore | 1.580,57 | - |
| Grés - quartzoso | 1.121,69 | - |
| Grés - calcário | 1.580,57 | - |
| Cerâmica de barro vermelho | 152,96 | - |
| Betão normal | 135,62 | 10,91 |
| Betão de vermiculite - cimento/areia: 1/3 | 20,00 | - |
| Betão de vermiculite - cimento/areia: 1/6 | 3,50 | - |
| Carvalho, freixo, faia, pinho, casquinha, cedro, abeto | 251,87 | 214,14 |
| Borrachas sintéticas, formo-fenólicos, poliamidas, poliésteres, polietilenos | 469,07 | 203,94 |
| Polimetacrilatos de metilo (acrílicos), policloreto de vinilo (PVC) | 509,86 | 458,87 |
| Aço | 2.396,33 | 4.078,86 |
| Alumínio | 2.651,26 | - |
| Chumbo | - | 1.529,58 |
| Cobre | - | 2.192,40 |
| Ferro fundido | - | 2.549,30 |
| Latão | - | 1.529,58 |
| Zinco | - | 1.631,55 |

Fontes: Termolan Isolamentos; Grupo Amorim; Styrofoam; (Brazão Farinha 2000);
http://clientes.netvisao.pt/carlos11/cmc/04_vidros.pdf;
<http://www.abrapex.com.br/02Caracter.html>; <http://www.mtc.ind.br/poliojate.htm>;
http://www.bracon.hpg.ig.com.br/economia_e_negocios/14/index_int_2.html

As resistências à tracção e compressão, apesar de serem fundamentais no caso de elementos estruturais, não são as propriedades com maior relevância no caso dos elementos construtivos da envolvente exterior, sendo um aspecto essencial a considerar no caso das soluções construtivas de paredes leves e mistas. Um exemplo disto é a resistência ao choque ou resiliência*.

* Resiliência: Resistência que apresentam os sólidos à quebra por choque;

** Dureza: Qualidade que têm certos materiais que apresentam uma forte resistência a ser furados, riscados ou desgastados (Sastre 2000).

Outro aspecto importante é a resistência à fricção, à abrasão e ao desgaste superficiais, que se podem englobar numa propriedade denominada dureza**. Existem várias escalas de dureza, tais como Mohs, Barcol, Brinell, Rockwell, Shore, Knoop, Martens, Meyer, Vickers, etc.

A1.2. Propriedades higrotérmicas da envolvente exterior

Os elementos construtivos que mais influência têm no desempenho térmico duma habitação são os da envolvente, nomeadamente em termos de ganhos e perdas. A envolvente é o somatório das componentes-fronteira: coberturas, fachadas, envidraçados, empenas e pavimentos. Estas componentes intervêm a dois níveis:

- **Geométrico:** para um mesmo volume a forma determina superfícies diferentes de contacto com o exterior. Ao quociente entre a Área da Superfície exterior e o Volume chama-se factor de forma, que é mínimo no caso duma esfera e tende a ser mais elevado nos casos das envoltentes muito recortadas;

$$F_f = \frac{S_e}{V} \quad (A1.2.1)$$

Onde:

S_e – Área da superfície exterior [m^2];

V – Volume [m^3].

- **Transferência de calor:** na medida em que seja, mais ou menos permeável aos fluxos de calor ou de ar.

Em termos térmicos e visuais podem distinguir-se dois tipos de componentes típicos duma envolvente (Fernandes 1991):

- **Elementos opacos:** nestes, contam-se em geral as coberturas, os pavimentos e os panos de fachada opaca (parede corrente mais zonas de singularidade – ou de pontes térmicas – tais como zonas de pilares, vigas, caixas de estore, etc.) Esses elementos podem contribuir para o controle das perdas e / ou ganhos segundo o seu grau de isolamento térmico e para a inércia térmica conforme a sua massa e – no caso de disporem de isolantes leves – em função da localização destes. No limite, o isolamento no interior inibe o aproveitamento do efeito de inércia;
- **Elementos transparentes e translúcidos:** estes têm um comportamento essencial nos edifícios por permitirem uma série de funções: visibilidade e contacto com o exterior, iluminação natural e ganhos solares. Em termos térmicos, há envidraçados que constituem apenas perdas térmicas no Inverno, por exemplo quando orientados a Norte, enquanto os mesmos envidraçados orientados a Sul podem ter um balanço energético positivo nos ciclos do dia, da semana ou da estação. A área de elementos transparentes e translúcidos deve, porém, ser ponderada tendo em conta os seguintes factores:
 - a) iluminação natural, geralmente mais favorável para envidraçados verticais orientados a Norte;
 - b) ganhos solares úteis, essenciais no Inverno;
 - c) perdas térmicas (Inverno);
 - d) ganhos solares perniciosos (Verão).

A1.2.1. Resistência térmica

A quantidade de calor transferido através de um painel, limitado por duas superfícies num plano paralelo, de área unitária, é directamente proporcional à diferença de temperatura entre as superfícies opostas e à condutibilidade e inversamente proporcional à espessura:

$$q = \alpha \cdot (t_1 - t_2) \quad (\text{A1.2.2})$$

Onde $\alpha = \frac{\lambda}{d}$ é a condutância;

Com o valor recíproco:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{d}{\lambda}} = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad (\text{A1.2.3})$$

Onde:

q - fluxo de calor por unidade de superfície [W/m^2];

d - espessura das camadas [m];

λ - condutibilidade térmica [$\text{W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$];

R - resistência térmica [$\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$];

t_1, t_2 - temperatura da superfície 1 e 2, respectivamente [$^\circ\text{C}$].

O valor da resistência de elementos ligados em série é aditivo, como tal, para um elemento composto por várias camadas:

$$R = \sum_{j=1}^n R_j = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (\text{A1.2.4})$$

Onde:

n : número de camadas;

d : Espessura do material;

λ : Condutibilidade térmica [$\text{W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$].

A resistência térmica define as propriedades de isolamento térmico dum elemento construtivo, medida em $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C} / \text{W}$.

Alguns valores de resistências térmicas de elementos de construção homogéneos comuns presentes na envolvente exterior dos edifícios são indicados na Tabela A1.2.1. São indicadas várias espessuras, ou as espessuras mais comuns, para se poder fazer uma análise comparativa mais rápida.

Tabela A1.2.1. Resistências térmicas para espessuras comuns de alguns materiais de construção homogêneos sem contabilizar as resistências térmicas superficiais

| Material | Espessura [mm] | Resistência térmica [m ² .°C/W] |
|---|-------------------|---|
| Espuma rígida de Poliuretano | 10 | 0,33 |
| | 20 | 0,67 |
| | 50 | 1,67 |
| Poliestireno expandido extrudido | 10 | 0,28 |
| | 20 | 0,57 |
| | 50 | 1,43 |
| Lã de vidro | 10 | 0,25 |
| | 20 | 0,50 |
| | 50 | 1,25 |
| Poliestireno expandido moldado | 10 | 0,25 |
| | 20 | 0,50 |
| | 50 | 1,25 |
| Fibra de côco | 10 | 0,23 |
| | 20 | 0,45 |
| | 50 | 1,14 |
| Lã de rocha | 10 | 0,22 |
| | 20 | 0,44 |
| | 50 | 1,11 |
| Aglomerado negro de cortiça | 10 | 0,22 |
| | 20 | 0,44 |
| | 50 | 1,11 |
| Materiais granulares leves ou fibras soltas | 10 | 0,20 |
| | 20 | 0,40 |
| | 50 | 1,00 |
| Aglomerado de fibras de madeira - leve | 10 | 0,17 |
| | 20 | 0,34 |
| | 50 | 0,86 |
| Aglomerado de partículas de madeira - prensadas | 10 | 0,08 |
| | 20 | 0,16 |
| | 50 | 0,42 |
| Contraplacado | 10 | 0,07 |
| | 20 | 0,15 |
| | 50 | 0,38 |
| Carvalho, freixo, faveira, pinho, casquinha, cedro, abeto, choupo | 10 | 0,07 |
| | 20 | 0,13 |
| | 50 | 0,33 |
| Aglomerado de partículas de madeira - extrudidas | 10 | 0,06 |
| | 20 | 0,12 |
| | 50 | 0,31 |
| Aglomerado de fibras de madeira - denso | 10 | 0,05 |
| | 20 | 0,10 |
| | 50 | 0,25 |
| Viroc | 10 | 0,04 |
| | 13 | 0,06 |
| | 20 | 0,09 |
| Madeira de massa volúmica elevada | 10 | 0,03 |
| | 20 | 0,07 |
| | 50 | 0,17 |
| Estuque tradicional, placas de estafe, gesso cartonado | 10 | 0,03 |
| | 13 | 0,04 |
| | 20 | 0,06 |
| Estuque projectado | 10 | 0,02 |
| | 20 | 0,04 |
| | 50 | 0,10 |
| Argamassa de inertes correntes | 10 | 0,008 |
| | 20 | 0,017 |
| | 50 | 0,043 |
| Betão de inertes correntes - normal | 10 | 0,006 |
| | 20 | 0,011 |
| | 50 | 0,028 |

Fonte: (realizado a partir dos dados de condutibilidade da Tabela A1.1.5.)

A1.2.1.1. Resistência térmica superficial

Sem diferença de temperatura não é possível a existência de fluxo de calor. Como tal, o fluxo de calor (q) – [W/m²] entre o ar e a superfície vai ser directamente proporcional à diferença de temperatura entre o ar e a superfície, com o coeficiente de convecção (h).

$$q = h \cdot (t_{ar} - t_s) \quad (A1.2.5)$$

Onde:

h : Coeficiente de convecção [W/m².°C];

t_{ar} : Temperatura ambiente do ar [°C];

t_s : Temperatura da superfície [°C].

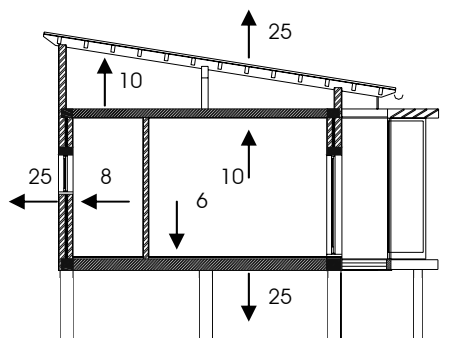


Figura A1.2.1. Coeficientes de convecção típicos

O coeficiente de convecção depende da posição da superfície, em relação à direcção do fluxo de calor, da geometria da superfície e da velocidade do ar. Esta última pode ser natural (devido à diferença de temperatura) ou forçada (devido ao vento). Valores típicos dos coeficientes de convecção são apresentados na Tabela A1.2.2. Valores de projecto têm incluído o efeito da transferência de calor radiante entre superfícies limite e são apresentados na Figura A1.2.1.

Tabela A1.2.2. Valores típicos do coeficiente de convecção (Torvi 2001)

| Processo | | h [w/m².k] |
|---------------------------------|---------------------------|------------|
| Convecção natural | Gases | 2-25 |
| | Líquidos | 50-100 |
| Convecção forçada | Gases | 25-250 |
| | Líquidos | 50-2000 |
| Convecção com mudança de estado | Evaporação ou condensação | 2500-10000 |

Fonte: (Torvi 2001).

O valor recíproco é a chamada resistência térmica superficial interior e exterior (respectivamente R_{si} e R_{se}). De acordo com critérios estabelecidos em documentação normativa francesa e correntemente utilizados em Portugal, preconiza-se em tais casos a adopção dos valores da Tabela A1.2.3 para as resistências térmicas superficiais exterior e interior (Pina dos Santos 1990):

Tabela. A1.2.3. Resistências térmicas superficiais (Pina dos Santos, 1990)

| Sentido do fluxo de calor | Resistência térmica superficial ¹ R_s [m ² .°C / W] | |
|---------------------------|--|----------------------------|
| | Exterior [$R_e = 1/h_e$] | Interior [$R_i = 1/h_i$] |
| Horizontal | 0,04 | 0,12 |
| Vertical | ascendente | 0,04 |
| | descendente | 0,17 |

Fonte: (Pina dos Santos 1990)

Estes valores são iguais aos valores constantes na norma internacional ISO 6946/1 (1987), com excepção do valor de R_i para fluxo de sentido horizontal que nesta norma é 0,13.

Nas soluções em que um dos paramentos do elemento de construção contacta com um local não aquecido ou em que existem disposições construtivas que limitem as trocas de calor por convecção e radiação com o ambiente exterior, é razoável utilizar valores da resistência térmica superficial exterior ($R_e = 1/h_e$) superiores ao indicado na Tabela A1.2.3.

¹ Ambos os paramentos com emissividade elevada (situação corrente).

Para pavimentos em contacto com um local não aquecido ou sobre um espaço de ar ventilado e lajes de esteira em contacto com um desvão ventilado ou um espaço de ar fortemente ventilado as resistências térmicas exteriores e interiores consideradas são iguais:

- Fluxo ascendente: $R_e = R_i = 0,10 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$;
- Fluxo descendente: $R_e = R_i = 0,17 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$.

A1.2.1.2. Resistência térmica de espaços de ar

Num espaço de ar ocorre um processo de transferência de calor combinado. Existe um fluxo de calor por condução entre as superfícies limites (Figura A1.2.2 a)), por radiação (Figura A1.2.2 b)) e por convecção (Figura A1.2.2.c)). A intensidade da troca de calor por radiação entre as superfícies limites opostas no espaço de ar depende da temperatura das superfícies (e não apenas da diferença de temperaturas) e da emissividade das superfícies. Desta forma, a intensidade da troca de calor por radiação pode ser atenuada pela colocação de revestimentos superficiais selectivos, ainda que não seja uma solução comum.

A transmissão de calor no espaço de ar não ventilado será proporcional à espessura. Se esta é reduzida ou se a estratificação do ar (em espaços de ar horizontais) prevenir o movimento de ar intensivo, o efeito de isolamento do ar estacionário prevalece, pelo que a condução é o fenómeno preponderante.

O efeito combinado da condução, radiação e convecção acima referidos pode ser caracterizado pela resistência térmica equivalente de espaços de ar não ventilados, dado em função dos parâmetros anteriormente mencionados. Nos estudos apresentados neste trabalho, os valores considerados têm como base o RCCTE, sendo apresentados na Tabela A1.2.4.

Tabela A1.2.4. Resistências térmicas equivalentes de espaços de ar não ventilados [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$]

| Sentido do fluxo de calor | | Espessura do espaço de ar (mm) | Resistência térmica ² R_a |
|---------------------------|-------------|--------------------------------|--|
| Horizontal | | 10 | 0,14 |
| | | 20 | 0,16 |
| | | 50 a 100 | 0,17 |
| Vertical | ascendente | 10 | 0,13 |
| | | 20 | 0,14 |
| | | 50 a 100 | 0,14 |
| | descendente | 10 | 0,15 |
| | | 20 | 0,18 |
| | | 50 a 100 | 0,21 |

Fonte: (Pina dos Santos, 1990)

Os valores apresentados na Tabela A1.2.4 diferem ligeiramente de outras fontes. Os valores da resistência térmica de espaços de ar não ventilados que constam por exemplo na norma ISO 6946/1 (1987) são sintetizados na Tabela A1.2.5 e na NBE-CT-79 na Tabela A1.2.6:

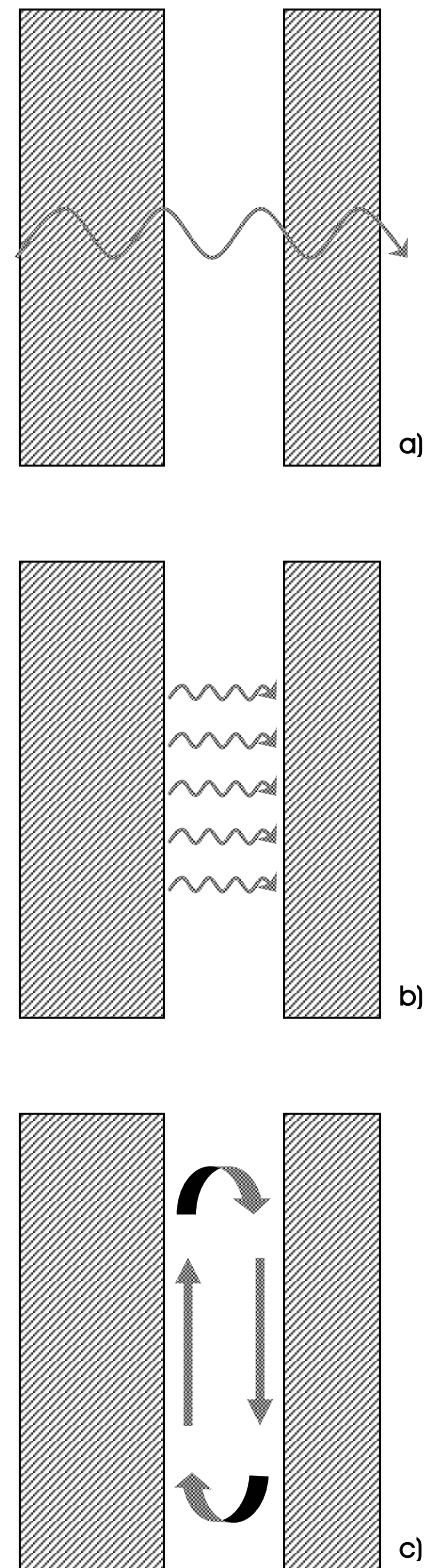


Figura A1.2.2. Os diversos fenómenos de transmissão de calor que ocorrem em espaços de ar em fachada: a) condução; b) radiação; c) convecção

² Ambas as superfícies com emissividade elevada (situação corrente).

Tabela A1.2.5. Resistências térmicas equivalentes de espaços de ar não ventilados [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$]

| Espessura da camada de ar [mm] | Direcção do fluxo de calor | | |
|--------------------------------|----------------------------|------------|-------------|
| | Horizontal (Fachada) | Ascendente | Descendente |
| 5 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| 7 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| 10 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 15 | 0,17 | 0,16 | 0,17 |
| 25 | 0,18 | 0,16 | 0,19 |
| 50 | 0,18 | 0,16 | 0,21 |
| 100 | 0,18 | 0,16 | 0,22 |
| 300 | 0,18 | 0,16 | 0,23 |

Fonte: (ISO 6946/1 1987)

Tabela A1.2.6. Resistências térmicas equivalentes de espaços de ar não ventilados [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$]

| Espessura da camada de ar [mm] | Direcção do fluxo de calor | | |
|--------------------------------|----------------------------|------------|-------------|
| | Horizontal (fachada) | Ascendente | Descendente |
| 10 | 0,14 | 0,14 | 0,15 |
| 20 | 0,16 | 0,15 | 0,18 |
| 50 | 0,18 | 0,16 | 0,21 |
| 100 | 0,17 | 0,16 | 0,21 |
| >150 | 0,16 | 0,16 | 0,21 |

Fonte: (NBE-CT-79)

Para espessuras superiores a 50mm, devido à diferença de densidade desenvolve-se circulação natural de ar, acompanhada de transferência de calor por convecção. Quanto mais espessa é a caixa-de-ar, maior é a transferência de calor por convecção. Por esta razão, resulta uma espessura óptima de 50mm, que não deverá ser ultrapassada, caso contrário a caixa-de-ar começa a perder eficiência em termos térmicos.

Nos espaços de ar ventilados predomina sempre a convecção, mas neste caso mesmo para pequenas espessuras. A diferença entre espaços de ar "muito pouco", "pouco" e "fortemente" ventilados depende da posição e da área das aberturas de ventilação. O grau de ventilação dos espaços de ar caracteriza-se pela relação entre a secção total dos orifícios de ventilação S , expressa em cm^2 , e o comprimento do cerramento L da fachada, expresso em m. Consideram-se três casos (NBE-CT-79) (RCCTE):

1. $S/L < 20\text{cm}^2/\text{m}$ (muito pouco ventilado);
2. $20 \leq S/L \leq 500\text{cm}^2/\text{m}$ (pouco ventilado);
3. $S/L \geq 500\text{cm}^2/\text{m}$ (fortemente ventilado).

Para espaços de ar pouco ventilados, os valores de R_{ar} da Tabela 4.2.5 deverão ser divididos por 2 (EN ISO 6946). Segundo a norma NBE-CT-79 e o RCCTE deverá ser determinado um Coeficiente α , dado em função da relação entre as resistências térmicas dos panos exterior (R_{pe}) e interior (R_{pi}) dado pela Tabela A1.2.7:

Tabela A1.2.7. Factor α para determinação da Resistência Térmica de espaços de ar ligeiramente ventilados

| Relação de Resistências térmicas dos panos de parede R_{pe}/R_{pi} | Relação S/L , em cm^2/m | |
|--|---|-----------|
| | 20 a 200 | 200 a 500 |
| $R_{pe}/R_{pi} < 0,1$ | 0,10 | 0,25 |
| $0,1 < R_{pe}/R_{pi} < 0,6$ | 0,20 | 0,45 |
| $0,6 < R_{pe}/R_{pi} < 1,2$ | 0,30 | 0,60 |

Fontes: (NBE-CT-79) (RCCTE 1990)

Para espaços de ar fortemente ventilados, a resistência térmica da camada de ar deve ser desprezada (NBE-CT-79) (ISO 6946/1 1987).

Em alguns casos os espaços de ar são ligados por pequenos orifícios ao espaço exterior. Isso não os transforma em fortemente ventilados, pois os pequenos orifícios promovem apenas a transferência de vapor, a uma determinada distribuição de pressão parcial. No entanto, a renovação de ar feita a partir destes pequenos orifícios é acompanhada por uma transferência de calor por convecção em direcção ao exterior, o que implica a sua consideração como caixa-de-ar pouco ventilada.

A1.2.1.3. Resistência Térmica total

A resistência térmica total R_t dum elemento plano composto de camadas homogéneas de elementos perpendiculares à direcção do fluxo de calor pode calcular-se através da seguinte expressão:

$$R_t = R_i + \sum R_j + R_e \quad [\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}] \quad (\text{A1.2.6})$$

Onde:

R_{si} : Resistência térmica superficial interior;

$\sum R_1, R_2, \dots, R_n$: Somatório das resistências térmicas de cada camada de parede, incluindo as lâminas de ar;

R_{se} : Resistência térmica superficial exterior.

A expressão anterior aplica-se no cálculo de paredes duplas com caixa-de-ar não ventilada.

Segundo a norma (ISO 6946/1 1987), no caso de caixa-de-ar pouco ventilada, os valores da resistência térmica da lâmina de ar dados pela Tabela 4.2.5 deverão ser divididos por 2.

Segundo a norma (NBE-CT-79), no caso de caixa-de-ar pouco ventilada, os valores da resistência térmica total (R'_t) da lâmina de ar dados pela Tabela 4.2.6 deverão ser afectados do coeficiente α dado em função da Tabela 4.2.7 através da seguinte expressão:

$$R'_t = R_t + \frac{(R''_t - R_t)}{\alpha} \quad [\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}] \quad (\text{A1.2.7})$$

Onde:

R_t : Resistência térmica total calculada segundo a expressão 4.2.6;

R''_t : Resistência térmica total calculada segundo a expressão 4.2.8;

α : Coeficiente determinado pela Tabela 4.2.7.

Para espaços de ar fortemente ventilados, as resistências térmicas da camada de ar e dos elementos localizados para o exterior desta devem ser desprezadas (NBE-CT-79) (ISO 6946/1 1987) e a resistência térmica superficial exterior deverá ser substituída por uma segunda Resistência térmica superficial interior, pelo que a expressão 4.2.6 resulta:

$$R''_t = R_{si} + \sum R_{ti} + R_{si} \quad [\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}] \quad (\text{A1.2.8})$$

Onde:

R_{si} : Resistência térmica superficial interior;

R_{ti} : Resistências térmicas de cada camada do pano interior de parede.

O estudo da transferência de calor em fachadas pode ser mais detalhadamente desenvolvido, determinando as temperaturas ao longo da secção dos panos de parede. Este tipo de estudo é

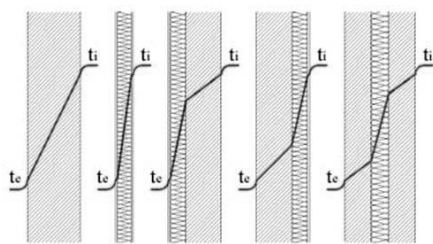


Figura A1.2.3. Linha de variação da temperatura ao longo da secção de paredes exteriores (FABUTE 2003)

baseado num modelo unidimensional, assumindo que os elementos são homogêneos e compostos por camadas paralelas, às quais o fluxo de calor é perpendicular. A distribuição de temperatura no corte transversal de um elemento de um edifício é importante na determinação de condensações internas.

Num estado estacionário o fluxo de calor é igual para todos os planos do corte transversal, ou através de qualquer camada, os fluxos de “chegada” são iguais aos fluxos de “partida”. Assim:

$$\frac{t_1 - t_2}{R_1} = \frac{t_2 - t_3}{R_2} = \frac{t_3 - t_4}{R_3} = \dots = q = \frac{(t_i - t_e)}{R_t} \quad (\text{A1.2.9})$$

A redução da temperatura em cada camada é proporcional à sua resistência térmica, ou seja, uma camada do isolamento térmico é assinalada por uma queda acentuada da temperatura, conforme se pode ver na Figura A1.2.3.

A1.2.2. Coeficiente global de transferência de calor

O Coeficiente de transferência de calor (k) constitui o inverso da Resistência térmica dum elemento, sendo dado pela seguinte expressão:

$$k = \frac{1}{R} \quad [\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (\text{A1.2.10})$$

A título ilustrativo apresenta-se na Figura 4.2.4 a espessura equivalente ao coeficiente de transmissão térmica de 100cm de pedra de granito diversos materiais de construção.

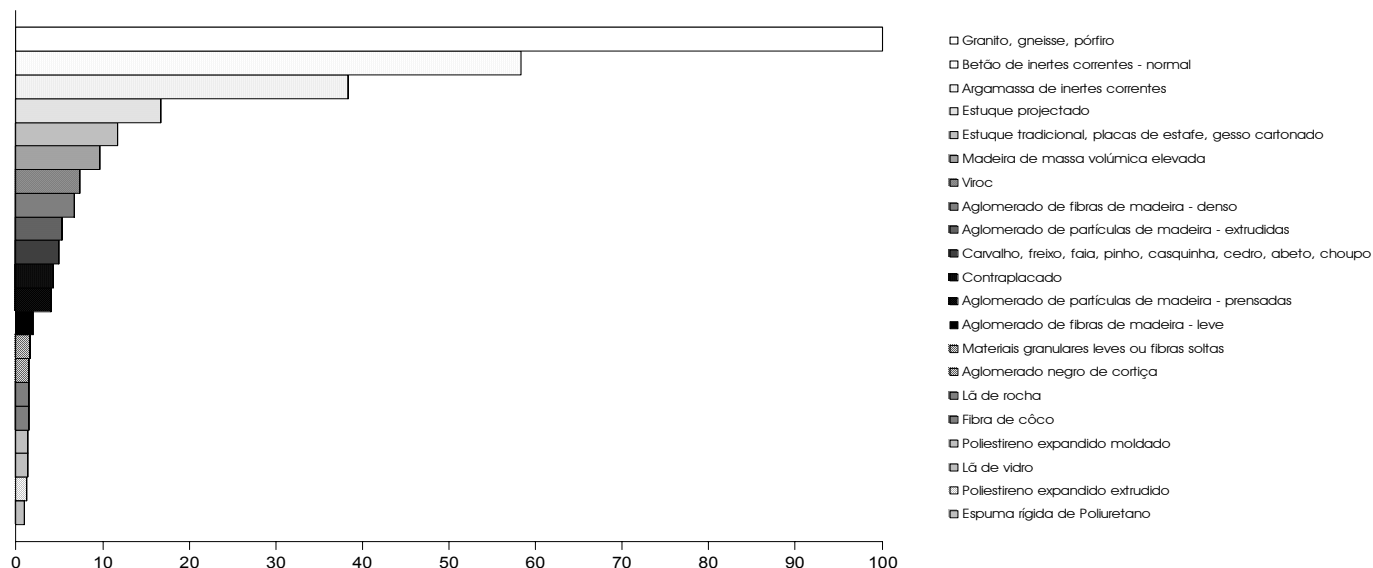


Figura A1.2.4. Espessura equivalente à transmissão térmica de 100cm de pedra de diversos materiais de construção homogêneos

O inverso da Resistência térmica total é chamado de Coeficiente global de transferência de calor (U), designado por (k) no RCCTE. Este coeficiente define as perdas de calor através dum elemento construtivo, por unidade de diferença de temperatura entre o

interior e o exterior e por unidade de área e pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + R_a + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \quad (\text{A1.2.11})$$

Onde:

U : Coeficiente global de transferência de calor [$\text{W}/^\circ\text{C}$];

h_i e h_e : Coeficientes de transferência de calor por convecção junto à superfície interior e exterior, respectivamente [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$];

d_i : Espessura da camada de material [m];

λ_i : Condutibilidade térmica do material constituinte de cada camada [$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$];

R_a : Resistência térmica da camada de ar [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$].

O fluxo de calor obedece à lei de Fourier, logo:

$$q = U \cdot \Delta t \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{A1.2.12})$$

Onde:

U: Coeficiente global de transferência de calor [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$];

Δt : Gradiente de temperatura na direcção do fluxo [$^\circ\text{C}$].

A quantidade de calor (Q) transferida numa determinada área de direcção perpendicular ao fluxo é então dada por:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad [\text{W}] \quad (\text{A1.2.13})$$

Onde:

U - coeficiente de transferência de calor [$\text{W}/^\circ\text{C}$];

A - área do elemento construtivo normal à direcção do fluxo [m^2];

ΔT - diferença de temperatura ambiente entre o interior e o exterior [$^\circ\text{C}$].

Quando os elementos são heterogéneos em superfície, como por exemplo um tijolo furado, define-se um U médio dado por:

$$U_m = \frac{\sum_{j=1}^n U_j A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \quad (\text{A1.2.14})$$

Onde:

A_j : área homogénea do elemento construtivo perpendicular ao fluxo [m^2];

U_j : Coeficiente U de cada área homogénea [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$];

n: nº de camadas.

Apresentam-se na Tabela A1.2.8 valores estimados do Coeficiente U para alguns tipos de parede e lajes normalmente constituintes da envolvente exterior de edifícios de habitação. Os cálculos detalhados com uma diversidade maior de soluções construtivas apresentam-se no Anexo 3, junto com outras propriedades que caracterizam as respectivas soluções. Os cortes esquemáticos das soluções construtivas de parede apresentam-se no Anexo 2.

Tabela A1.2.8. Coeficientes U para diversos tipos de paredes

| Elemento | Designação | Constituição | U [w/m ² .°C] |
|-------------------------------|-------------|----------------------------------|--------------------------|
| Paredes Simples s/ Isolamento | PS1.1/15 | A15+R2 | 4,09 |
| | PS1.1/20 | A20+R2 | 3,82 |
| | PS1.1/40 | A40+R2 | 3,05 |
| | PS2.1/11 | M11 | 3,91 |
| | PS3.1/15 | H0.5+B15+H0.5 | 0,92 |
| | PS3.1/40 | R0.5+B40+H0.5 | 0,38 |
| | PS4.1/15 | C15 | 4,07 |
| | PS4.1/20 | C20 | 3,65 |
| | PS5.1/11 | R2+T11+R2 | 2,47 |
| | PS5.1/15 | R2+T15+R2 | 1,98 |
| | PS5.1/22 | R2+T22+R2 | 1,53 |
| Paredes Simples c/ Isol. Int. | PS1.2/40 | A40+L5+G1.3 | 0,69 |
| | PS2.2/11 | M11+L5+G1.3 | 0,69 |
| | PS4.2/20 | C20+L5+G1.3 | 0,70 |
| Paredes Simples c/ Isol. Ext. | PS1.3/20 | R2+X5+A20+R2 | 0,66 |
| | PS3.3/15 | R2+ X5+B15+H0.5 | 0,42 |
| | PS3.3/20 | R2+ X5+B20+H0.5 | 0,38 |
| | PS4.3/20 | R2+X5+C20+R2 | 0,66 |
| | PS5.3/22 | R2+X5+T22+R2 | 0,52 |
| Paredes Duplas | PD1.1/11+11 | R2+T11+J5+T11+R2 | 1,27 |
| | PD2.1/11 | M11+J5+T11+R2 | 1,43 |
| | PD3.1 | M11+J5+C20+R2 | 1,66 |
| | PD1.2/11+11 | R2+T11+J5+XP4+T11+R2 | 0,52 |
| | PD1.2/15+11 | R2+T15+J5+XP4+T11+R2 | 0,49 |
| | PD2.2/11 | M11+J5+XP4+T11+R2 | 0,54 |
| | PD3.1 | M11+J5+XP4+C15+R2 | 0,58 |
| | PD5.2 | A12+J5+XP4+T11+R2 | 0,57 |
| | PMD2.1 | V1.2+J5+N5+B15+H0.5 | 0,41 |
| | PMD4 | E3+J5+XP4+C20+R2 | 0,62 |
| Paredes Triplas | PT2 | AB0.5+J9.5+R2+T15+J5+XP4+T11+R2 | 0,45 |
| | PT(L)3 | V1.2+J9.5+V1.9+N8+F2+J0.5+2xG1.3 | 0,40 |
| Lajes de Pavimento | LP1 | D1.2+P0.5+V1.9+F2+N16+V1.2 | Inv: 0,227 Ver: 0,23 |
| | LP2 | D1.2+P0.5+C4+Y16+N5+V1.2 | Inv: 0,65 Ver: 0,75 |
| | LP3 | D1.2+P0.5+C4+Z26+R2 | Inv: 2,2 Ver: 2,8 |
| Lajes de Cobertura | LC1 | N8+V1.2+J15+Y16+S1.5 | Inv: 0,51 Ver: 0,49 |
| | LC2 | N8+V1.2 | Inv: 0,51 Ver: 0,49 |
| | LC3 | C4+Z20+S1.5 | Inv: 2,1 Ver: 1,8 |

Nota: Na constituição de cada parede os números correspondem à espessura em cm e as letras ao material, por exemplo R2+A40+R2 refere-se a 2cm de Reboco na face exterior, 40cm de Alvenaria de Granito e 2cm de Reboco na face interior. Os materiais utilizados são os indicados na legenda seguinte:

| | | | | | |
|---|----------------------|---|-----------------------------|------|------------------------------------|
| A | Alvenaria de Granito | J | Lâmina de ar | V | Aglomerado de Madeira/Cimento |
| B | Alvenaria de Adobe | L | Lã de Rocha | W | Barotes de Madeira |
| C | Betão Armado | M | Tijolo Maciço | X/XP | Poliestireno Expandido / Extrudido |
| D | Pavimento Flutuante | N | Aglomerado Negro de Cortiça | Y | Laje Alveolar |
| E | Placas de Pedra | P | Poliétileno Reticulado | Z | Laje Aligeirada blocos de betão |
| F | Fibra de Coco | R | Reboco | AB | Vidro |
| G | Gesso Cartonado | S | Estuque | AC | Betão Cavernoso |
| H | Cal | T | Tijolo Furado | AD | Blocos de Betão |

Será importante referir que o actual RCCTE apresenta uns valores de U máximos admissíveis e valores mínimos recomendáveis para

poder cumprir a verificação automática em função das zonas climáticas e da estação, e que são os referidos na Tabela A1.2.9.

Tabela A1.2.9. Coeficientes U máximos admissíveis e valores de referência mínimos para elementos verticais [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$] (RCCTE 1990)

| Elemento da envolvente | Zona climática | | |
|--|----------------|-----|------|
| | I1 | I2 | I3 |
| Valores máximos: | | | |
| Fachadas | 1,8 | 1,6 | 1,45 |
| Elementos em contacto com zonas anexas não úteis | 2,0 | 2,0 | 1,9 |
| Valores de referência: | | | |
| Elementos opacos | 1,4 | 1,2 | 0,95 |
| Elementos transparentes e translúcidos (U médio dia/noite) | 4,2 | 4,2 | 4,2 |

A1.2.3. Permeância ao vapor de água

A Permeância ao Vapor de Água (P_e)* corresponde a um coeficiente de transferência de vapor dado em função da permeabilidade e da espessura em materiais homogéneos. Desta forma, a cada elemento construtivo de parede corresponde uma determinada permeância, conforme se pode ver na Tabela A1.2.10.

Tabela A1.2.10. Permeância ao Vapor de Água (P_e) de alguns elementos construtivos, barreiras pára-vapor e acabamentos

| Material | Espessura (m) | P_e [$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \cdot 10^{-12}$] |
|--|--------------------------------------|--|
| Alvenaria de blocos de betão vazados | 0,2 | 68 |
| Alvenaria de granito | 0,3 | 22 |
| Alvenaria de tijolo maciço | 0,2 | 94 |
| Alvenaria de tijolo vazado | 0,2 | 52 |
| Blocos de betão celular | 0,07 | 695 |
| Contraplacado com cola exterior | 0,0064 | 26 a 40 |
| Contraplacado com cola interior | 0,0064 | 110 a 335 |
| Esmalte de vinil acrílico (1 camada) | $e_{\text{seccal}} = 40 \mu\text{m}$ | 490 |
| Feltro betuminoso | 0,003 | 18 |
| Folha de acetato celuloso | 0,00025 | 235 a 265 |
| | 0,0032 | 18 |
| Folha de acrílico reforçado com fibra de vidro | 0,0014 | 6,9 |
| Folha de alumínio | $e = 15 \mu\text{m}$ | <31 |
| | $e = 25 \mu\text{m}$ | 2,9 |
| | $e > 40 \mu\text{m}$ | <2,1 |
| | $e = 100 \mu\text{m}$ | 0 |
| Folha de alumínio colada a papel Kraft com asfalto | $e = 15 \mu\text{m}$ | 1,1 |
| Folha de alumínio sobre placa de gesso | $e = 15 \mu\text{m}$ | 21 |
| Folha de poliéster | $e = 25 \mu\text{m}$ | 42 |
| | $e = 90 \mu\text{m}$ | 13 |
| | $e = 190 \text{ a } 200 \mu\text{m}$ | 4 a 4,6 |
| Folha de poliéster reforçada com fibra de vidro | 0,0012 | 2,9 |
| Folha de polietileno | $e = 50 \mu\text{m}$ | 9,1 a 9,6 |
| | $e = 100 \mu\text{m}$ | 4,1 a 4,6 |
| | $e = 120 \mu\text{m}$ | 2,9 a 5 |
| | $e = 150 \mu\text{m}$ | 3,4 |
| | $e = 200 \mu\text{m}$ | 2,3 |
| | $e = 250 \mu\text{m}$ | 1,7 a 2,5 |
| Folha de PVC | $e = 50 \text{ a } 100 \mu\text{m}$ | 39 a 80 |
| | $e = 800 \mu\text{m}$ | 23 |
| Laca de óleo | 0,001 | 8 300 |
| Laca de poliuretano | 0,001 | 15 600 |
| Laca de PVC | 0,001 | 5 200 |
| Papel betuminoso | $e = 300 \mu\text{m}$ | 205 |
| Película livre de tinta de borracha | $e = 670 \mu\text{m}$ | 545 |
| Película livre de tinta texturada | $e = 375 \mu\text{m}$ | 2 100 |
| Pintura exterior acrílica (1 camada) | $e_{\text{seccal}} = 40 \mu\text{m}$ | 315 |
| Pintura de óleo | 0,001 | 13 500 |
| Pintura de tinta de borracha | $e = 670 \mu\text{m}$ | 145 |
| Pintura de tinta texturada | $e = 375 \mu\text{m}$ | 56 |
| Pintura de tinta plástica de acabamento mate | $e = 110 \mu\text{m}$ | 9 000 |
| Pintura de tinta plástica de acabamento mate aveludado | $e = 110 \mu\text{m}$ | 2 550 |
| Primário selante (1 camada) | $e = 30 \mu\text{m}$ | 360 |
| Resina epoxy | $e = 200 \mu\text{m}$ | 15 |
| | $e = 300 \mu\text{m}$ | 8,8 |
| Resina de poliéster reforçada com fibra de vidro | 0,0015 | 2,5 |
| Revestimento de argamassa "cerezitado" | 0,0015 | 69 a 97 |

Fonte: (Freitas 1998)

* A Permeância ao Vapor de Água (P_e) 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.

$$P_e = \frac{g}{\Delta P} \quad [\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \cdot 10^{-12}] \quad (\text{A1.2.15})$$

Para um elemento constituído apenas por um material homogéneo, o valor de P_e corresponde também à relação entre o Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de água (π) do material e a sua espessura (e) (Freitas, 1998):

$$P_e = \frac{\pi}{e} \quad [\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \cdot 10^{-12}] \quad (\text{A1.2.16})$$

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 (Freitas e Pinto 1998):

$$g = \sum_{j=1}^n \frac{\pi_j}{d_j} \cdot (p_i - p_e) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (\text{A1.2.17})$$

Onde:

g : Fluxo de difusão de vapor de água por unidade de superfície;

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

d_j : Espessura da camada $[\text{m}]$;

p_i e p_e : Pressões parciais de vapor de água no interior e exterior, respectivamente $[\text{Pa}]$.

A1.2.4. Pontes térmicas

A1.2.4.1. Definição

De acordo com a norma EN ISO 10211-1 pode definir-se ponte térmica como uma parte da envolvente do edifício onde a resistência térmica, de outro modo uniforme, é significativamente alterada. As pontes térmicas são zonas com resistência térmica inferior à da restante envolvente do edifício, conduzindo a perdas de calor mais elevadas do que na zona corrente da envolvente, devido a vários factores, tais como:

- à existência de zonas com elementos estruturais (topos de lajes, vigas e pilares), o que conduz a locais com resistência térmica inferior à zona corrente;
- a diferenças entre áreas internas e externas, como ocorre em ligações entre paredes e pavimentos e paredes e tectos;
- à existência de materiais com condutibilidade térmica diferente na envolvente do edifício;
- à existência de zonas onde o isolamento é interrompido;
- a uma mudança na espessura dos elementos construtivos;
- a outras situações com problemas nas ligações entre os diferentes elementos de construção.

A1.2.4.2. Razões para a ocorrência de pontes térmicas

As pontes térmicas surgem normalmente quando, por questões construtivas, um material ou materiais com baixo isolamento térmico, normalmente os elementos estruturais, interrompem um material ou materiais com uma maior capacidade de isolamento térmico (Davies 2001). Este fenómeno dá-se essencialmente, em construções convencionais, nas zonas de contacto entre a estrutura e as paredes sem isolamento contínuo. Os problemas associados com as pontes térmicas surgiram mais agravados após a introdução de isolamentos nas caixas-de-ar das secções de parede e pela dificuldade construtiva de se realizarem isolamentos contínuos, bem como pela diminuição de estanquicidade ao ar e isolamento dos sistemas de caixilharias e caixas de estores.

O aumento do nível de isolamento térmico nas zonas correntes de parede deveu-se à necessidade de reduzir o consumo de energia em edifícios, à redução do risco de ocorrência de condensações e crescimento de fungos e bolores e ao aumento do nível de conforto térmico no interior das habitações, durante o Inverno e o

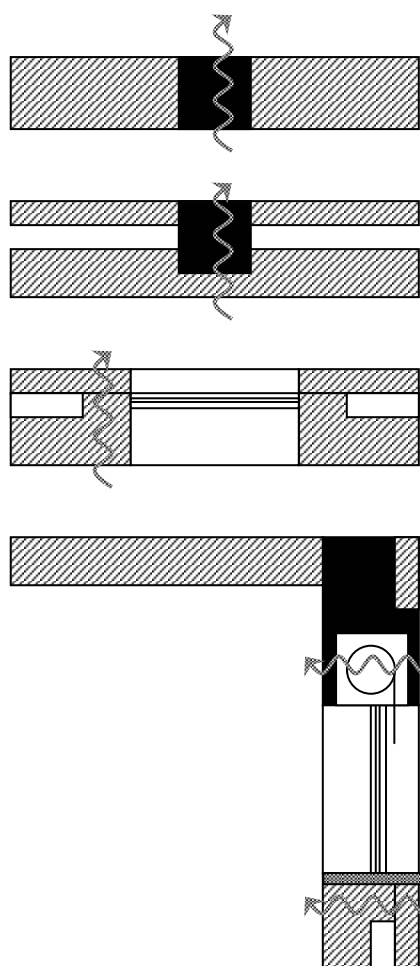


Figura A1.2.5. Exemplos de situações de pontes térmicas mais comuns em fachadas de edifícios portugueses convencionais

Verão. Verificou-se, no entanto, que, em edifícios onde foi colocado isolamento na caixa-de-ar, a ocorrência de condensações e o crescimento de fungos e bolores não diminuiu, tendo mesmo, em alguns casos, aumentado. Os principais motivos que podem explicar esta situação são o facto de, com algumas técnicas construtivas e nalguns pontos concretos, se favorecer o aparecimento de pontes térmicas, como nos exemplos representados na Figura A1.2.5 e de não ser dada atenção às exigências de ventilação dos edifícios.

Na última década a maioria dos Projectistas (Arquitectos e Engenheiros) e dos Promotores, tornaram-se mais cientes da influência adversa das pontes térmicas, conhecendo os princípios básicos para as evitar, pelo menos em projecto. No entanto, continuam a construir-se edifícios com grande número de pontes térmicas, muitas vezes não só por má concepção dos projectos, mas por má execução da obra, como nos casos representados na Figura A1.2.6. Sendo muito mais difícil a “eliminação” da ponte térmica uma vez o edifício concluído, a estratégia deverá ser a de fiscalizar e realizar a obra cuidadosamente, evitando os defeitos.

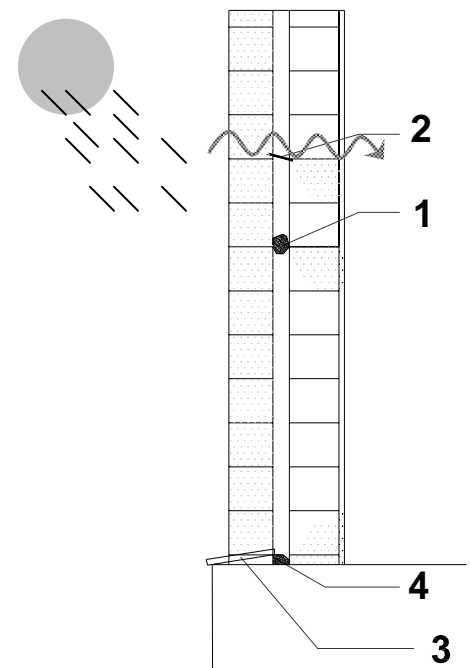
A1.2.4.3. Consequências das pontes térmicas

As principais consequências da ocorrência de pontes térmicas são:

- Incremento das perdas térmicas em zonas pontuais, que se tornam mais significativas com o aumento do nível de isolamento em secção corrente;
- Agravamento das condensações superficiais;
- Degradação dos revestimentos interiores (rebocos e tintas);
- Fissurações provocadas pela heterogeneidade das temperaturas superficiais interiores nas junções de materiais diferentes (alvenarias/pilares e vigas) pelas diversas solicitações térmicas, higrométricas e mecânicas, o que favorece as infiltrações de água e incrementam ainda mais as pontes térmicas existentes, ou criam ainda mais discontinuidades;
- A sujidade adere mais facilmente às superfícies frias (o que resulta em faces interiores das paredes exteriores com sujidades no pontos onde as pontes térmicas se localizam);
- Potenciam o desenvolvimento de fungos e bolores e diminuem assim a qualidade do ar interior.

Os problemas de condensação não ocorrem exclusivamente nas superfícies internas mais frias. Podem também ocorrer dentro dos materiais de construção, deteriorando-os e reduzindo a sua resistência térmica. Se a temperatura dos materiais de construção atingir o ponto de orvalho do ar do compartimento, antes de ser parado por uma barreira pára vapor eficaz, ocorrerão condensações. Este fenómeno é designado por condensação intersticial, sendo causado pela migração da humidade do ar interior do compartimento para o exterior.

São observados com muita frequência erros conceptuais em edifícios novos, mas estes são mais problemáticos em projectos de reabilitação. Em reabilitação de edifícios verifica-se que muitas pontes térmicas permanecem ou então são criadas e potenciadas quando se pretende aumentar a resistência térmica das paredes,

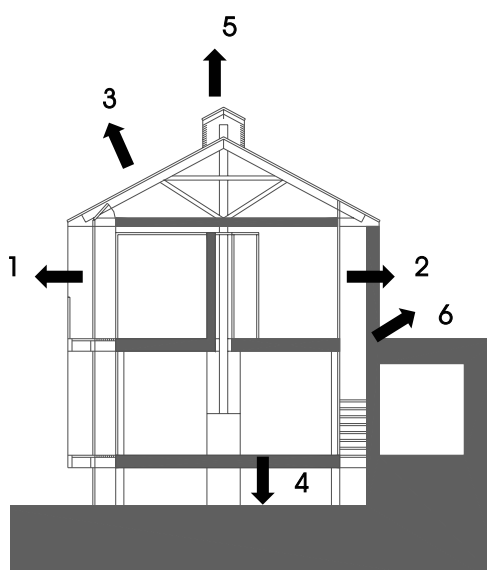


Legenda: 1: ligação de argamassa entre os panos; 2: má colocação de estribos de ligação; 3 e 4: inexistência ou obstrução, quer do canaleta de recolha de águas, quer do orifício de drenagem das águas que atravessam o pano exterior da parede dupla ou se condensam no interior da parede.

Figura A1.2.6. Exemplo de pontes térmicas em paredes duplas mal executadas

devendo por isso ser tida especial atenção ao seu tratamento, de modo a evitar ou reduzir o seu efeito nefasto, utilizando para tal soluções de isolamento adequadas, com tratamento dos pontos singulares.

Além disso, quer em edifícios novos, quer em edifícios reabilitados, a não consideração de forma adequada do efeito das pontes térmicas pode reduzir o desempenho térmico dos edifícios, sendo muitas vezes preferível não incrementar tanto o isolamento, quando não se consegue o tratamento equivalente em todos os pontos singulares. Apesar da influência das pontes térmicas não ser muito significativa nas perdas globais do edifício, cerca de 5% (FABUTE 2003) como se pode ver na Figura A1.2.7, os problemas construtivos que advêm do não tratamento das pontes térmicas pode pôr em causa a justificação do investimento no próprio isolamento das zonas correntes da envolvente, já que se pode tornar mesmo adverso, acarretando custos futuros de manutenção superiores aos custos de construção.



- Legenda:
- 1 – Portas e janelas $\approx 13\%$
 - 2 – Paredes $\approx 16\%$
 - 3 – Coberturas $\approx 30\%$
 - 4 – Solo $\approx 16\%$
 - 5 – Renovação do ar $\approx 20\%$
 - 6 – Pontes térmicas $\approx 5\%$

Figura A1.2.7. Tipos de perdas térmicas pela envolvente e percentagem da sua influência nas perdas térmicas globais

A1.2.4.4. Tipos de Pontes Térmicas

As pontes térmicas mais comuns são as pontes térmicas bidimensionais, designadas por "lineares", que ocorrem na ligação de dois ou mais elementos do edifício (por exemplo uma janela numa parede), ou nos locais onde a composição estrutural de um elemento do edifício é alterada (por exemplo um pilar numa parede). Isto resulta numa mudança do fluxo de calor e da temperatura da superfície na face interna do elemento.

Além das pontes térmicas lineares, há também pontes térmicas tridimensionais, que ocorrem quando uma parede com isolamento é perfurada por um elemento com condutibilidade térmica mais elevada (ponte térmica pontual) ou ocorrem em extremidades tridimensionais (cantos).

Se existem pontes térmicas lineares ou pontuais importantes ou se estas não podem ser evitadas, na fase de projecto ou após a construção ou reabilitação do edifício, é necessário ter em consideração as consequências da existência de pontes térmicas:

- realizando uma avaliação das perdas de calor extra ao calcular cargas térmicas, necessidades energéticas e níveis de isolamento dos edifícios;
- fazendo uma avaliação do risco de ocorrência de condensação e do crescimento de fungos e bolores devido à temperatura superficial mais baixa na face interna da zona onde ocorre a ponte térmica.

A1.2.4.5. Distribuição de temperatura ao longo de pontes térmicas

O fluxo de calor é sempre distribuído de forma a minimizar a dissipação do calor. Duma forma simplificada pode afirmar-se que o fluxo de calor procura o "caminho mais fácil", sendo esta "facilidade" medida em transmissão de calor. A transmissão ao longo da trajectória do fluxo "1" da Figura A1.2.8 é maior do que seria ao longo de uma linha recta, perpendicular à superfície, devido à maior condutibilidade do pilar. O calor flui na direcção

com maior gradiente de temperatura. Assim, as linhas representadas por posições geométricas de pontos com igual temperatura (isotérmicos) cruzam perpendicularmente as trajectórias do fluxo, formando uma malha, como se pode ver na Figura A1.2.9. (FABUTE 2003). Para a avaliação das pontes térmicas nesta secção de parede a superfície em secção horizontal deverá ser subdividida em secções que correspondem às linhas de trajectória de fluxo. Sabendo os fluxos de calor desde a superfície exterior até à superfície interior, que são constantes em estado estacionário, as temperaturas superficiais, poderão ser determinadas as temperaturas interiores ao longo da secção horizontal da parede. A determinação dum Coeficiente U médio - U_m - não é totalmente rigorosa, porque a construção da maioria dos elementos do edifício é diferente do modelo homogéneo bidimensional apresentado na Figura A1.2.9.

Estas diferenças resultam da:

- presença de materiais ou de partes tais como cavidades ou perfurações, com formas e condutividades térmicas significativamente diferentes das camadas e materiais correntes;
- diferenças de forma da superfície interna e externa (por exemplo cantos, ligação à janela (Figura A1.2.9), ligação entre pavimentos e tectos, conduzindo também a transferência de calor multi-dimensional.

Devido às irregularidades referidas acima, o fluxo de calor não será unidimensional mas terá características bi ou tridimensionais, tendo como resultado perdas de calor extra que não podem ser avaliadas através do cálculo unidimensional, através da determinação do coeficiente global de transferência de calor.

A maneira como a transferência de calor suplementar que ocorre através de elementos não homogéneos do edifício é calculada depende, em primeiro lugar, da forma como a transferência de calor unidimensional é definida. Isto pode ser feito com base nas convenções e simplificações relacionadas com a definição das superfícies a que correspondem valores de U diferentes.

Convencionalmente pode supor-se, como por exemplo no caso da ligação entre uma janela e uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar, que a Figura A1.2.10 mostra, que a quantidade de calor transferido pela ponte térmica pode ser calculada de forma simplificada por:

$$Q_1 = (U_m * A_t + U_f * A_f) * (t_i - t_e) \quad [W] \quad (A1.2.18)$$

Onde:

U_m e A_m : coeficiente global de transferência de calor médio e área total (medida pelo exterior) da parede dupla;

U_f e A_f : coeficiente global de transferência de calor e área (medida pelo exterior) da janela.

Nesta situação a quantidade de calor transferida é então determinada com base nas dimensões exteriores para todos os elementos do edifício. É possível descrever mais detalhadamente a

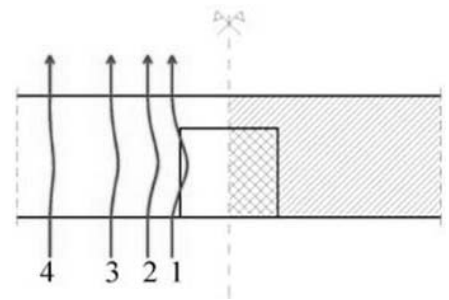


Figura A1.2.8. Desvio da trajectória da Transmissão térmica ocasionado por um pilar (FABUTE 2003)

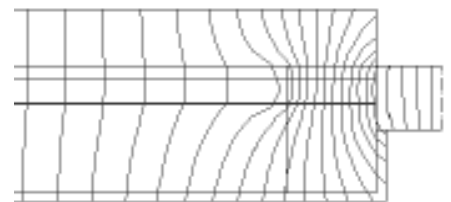


Figura A1.2.9. Modelo bidimensional da transmissão térmica na zona de ombreira numa fachada de parede convencional dupla (FABUTE 2003)

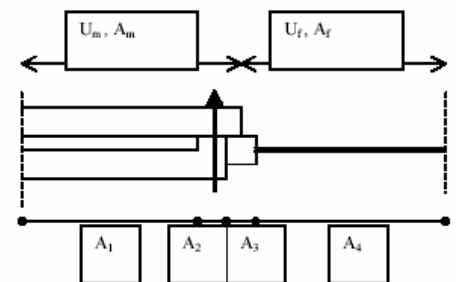


Figura A1.2.10. Modelo simplificado para permitir cálculo do Coeficiente U através de elementos da fachada (FABUTE 2003)

mesma, com base nas áreas internas (A_1, \dots, A_4) e nos correspondentes Coeficientes U (U_1, \dots, U_4):

$$Q_2 = (U_1 * A_1 + \dots + U_4 * A_4) * (T_i - T_e) \text{ [W]} \quad (\text{A1.2.19})$$

É claro que, uma vez que partem de suposições diferentes, os dois métodos conduzirão a resultados diferentes ($Q_1 \neq Q_2$) e diferentes também das perdas de calor reais (Q_{reais}) através da parede e do envidraçado. De facto, devido a transmissões marginais através de pontes térmicas, através dos flancos da ligação entre a parede e a janela, irão ocorrer perdas de calor superiores, tal como mostra a Figura 4.2.10, onde as linhas de fluxo de calor são mais densas na zona da parede onde existe a ponte térmica.

O valor desta perda de calor suplementar pode ser calculado introduzindo um coeficiente de transmitância térmica linear (ψ) e/ou um coeficiente de transmitância térmica pontual (χ), dependendo se as perdas de calor suplementares são bi ou tridimensionais. Note-se que as perdas de calor suplementares devido ao efeito das pontes térmicas tridimensionais podem ser entre 20 a 50% das perdas calculadas numa dimensão (FABUTE 2003).

No entanto, na maior parte dos casos, os cálculos são limitados a pontes térmicas lineares, porque estas são as mais comuns, sendo os cálculos tridimensionais apenas utilizados em casos excepcionais. Para calcular as perdas pelas pontes térmicas numa forma bidimensional, foi implementado o conceito do factor de concentração de perdas (f_c).

O valor de f_c pode ser obtido através da seguinte expressão (RCCTE, 1990):

$$f_c = \frac{\sum U_i A_i}{U_{cr} \sum A_i} \quad (\text{A1.2.20})$$

Onde:

f_c : Factor de concentração de perdas;

U_i : Coeficiente de Transmissão térmica de cada zona superficial homogénea;

A_i : Área de cada zona superficial homogénea;

U_{cr} : Coeficiente de transmissão térmica em superfície corrente.

O f_c pretende traduzir a heterogeneidade dos elementos construtivos da envolvente, sendo as heterogeneidades devidas, nomeadamente, às caixas de estore, vigas, topo das lajes e pilares (RCCTE 1990).

4.2.4.6. Pontes térmicas em fachadas leves e mistas

Em fachadas leves, com painéis sandwich, ou em fachadas mistas em que o isolamento é colocado pelo exterior da estrutura, as pontes térmicas são geralmente evitáveis, com excepção de alguns tipos de fixações metálicas e juntas que, se não forem devidamente detalhadas, podem servir para a ocorrência deste fenómeno. Em construções de estrutura metálica a estratégia deverá sempre ser a de colocar a estrutura totalmente no interior ou totalmente no exterior do material de isolamento na fachada, evitando assim que esta sirva

de ponte térmica. No caso das estruturas de madeira, devido à sua baixa condutibilidade, a posição da estrutura é mais livre, podendo coincidir com a fachada, já que neste caso a própria estrutura constitui um material isolante. No caso das fachadas tradicionais do tipo gaiola, com estrutura de madeira e materiais pesados no cerramento da parede, pode dar-se exactamente o fenómeno inverso ao da ponte térmica, que é uma resistência térmica superior à da parede em área muito menor do que a de superfície corrente.

A1.2.5. Inércia térmica

A1.2.5.1. Capacidade térmica

Para o estudo da influência das fachadas no conforto higrotérmico, existe um aspecto que poderá ser tão ou mais importante que a capacidade de isolamento das mesmas, se tivermos em conta as características do clima em Portugal. Se bem que a massa térmica não seja um exclusivo das fachadas, já que quer as lajes, quer as divisórias interiores podem ser elementos de armazenamento, no caso da habitação todas as contribuições de massa térmica são desejáveis. Por este facto, as fachadas deverão ser concebidas como elementos de massa térmica, contribuindo também para uma melhor gestão dos recursos energéticos com vista ao conforto. A massa térmica poderá igualmente funcionar como isolamento acústico e servir para aumentar a resistência mecânica da envolvente da habitação, pelo que será preferível a sua integração nos elementos de fachada do que nas divisórias interiores entre compartimentos. As divisórias interiores dentro de cada fogo, poderão até ser leves, nos casos em que o isolamento acústico não é tão necessário, contribuindo assim para uma construção mais sustentável.

A capacidade de um corpo armazenar calor chama-se capacidade térmica ou massa térmica. Os elementos construtivos leves têm por regra uma menor capacidade de armazenamento térmico do que os elementos pesados. Mas não só o peso do material vai ter influência, também o seu calor específico (ver Secção A1.1.3.4 deste anexo). Por exemplo uma cobertura ou uma parede de água, devido ao elevado calor específico da água pode, com um menor peso do que um elemento construtivo convencional ter uma capacidade térmica superior.

A capacidade térmica (C_t) de um elemento construtivo é então obtida a partir da seguinte expressão:

$$C_t = m \cdot c \quad [\text{Kcal}/^\circ\text{C}] \quad (\text{A1.2.21})$$

Com:

m – massa superficial do elemento construtivo [kg];

c – calor específico [Kcal/kg.°C].

A1.2.5.2. Fluxo de calor unidimensional dinâmico

A diferença entre os fluxos de entrada e saída no sistema parede, resulta na variação do calor armazenado. A variação do calor armazenado é proporcional à massa (m), ao calor específico do material (c) e à variação da temperatura (ΔT).

Para perceber este processo poderá subdividir-se a parede em camadas elementares, como se mostra na Figura A1.2.11. A resistência térmica entre duas camadas elementares é proporcional à distância entre as camadas (Δx), e inversamente proporcional à sua condutibilidade. O balanço energético é calculado para intervalos de tempo elementares. O balanço dos j elementos de camada ao longo dos i intervalos elementares de tempo é dado pela seguinte expressão (FABUTE 2003):

$$\frac{t_{i,j-1} - t_{i,j}}{R_{j-1,j}} - \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{R_{j,j+1}} = \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{\Delta t} \Delta x_j \rho_j c_j \quad (\text{A1.2.22})$$

Onde:

t : temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

Δx_j : espessura da camada j [m];

ρ_j : densidade da camada j [kg/m^3];

c_j : calor específico [$\text{Kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$];

Δt : intervalo de tempo elementar [s];

R : resistência térmica [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

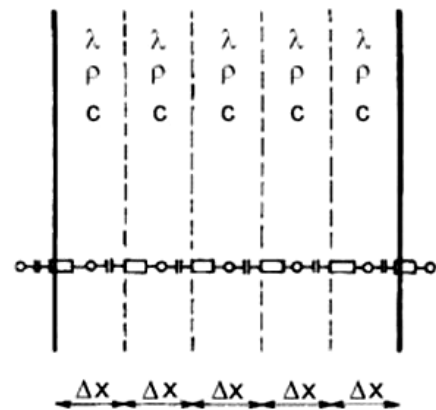


Figura A1.2.11. Divisão da parede em camadas (FABUTE 2003)

Os índices $j-1$, j , $j+1$, referem-se à posição geométrica das camadas, enquanto que $i-1$, i , $i+1$, aos intervalos de tempo consecutivos. O número de valores de temperaturas desconhecidas é o mesmo que o de equações.

A1.2.5.3. Fluxos de calor periódicos

As flutuações térmicas no exterior dos edifícios mudam ao longo do dia e ao longo do ano. As alterações podem ser suaves (em função da estação do ano) ou bruscas, (em função das condições climáticas – por exemplo nebulosidade, passagem de frentes frias ou quentes, ventos, etc) e podem ser inesperadas ou previsíveis (variação da temperatura no ciclo dia-noite correspondendo a um período de 24 horas). Neste último caso a transferência de calor pode ser calculada analiticamente. Serão apresentados alguns conceitos desta solução analítica, sem os expor muito detalhadamente.

Em geral, um processo periódico pode ser representado como na Figura A1.2.12 e descrito como se segue: Na primeira parte do período (a)), a temperatura de uma das superfícies fica mais alta que a temperatura da superfície oposta. Começa então o fluxo de calor em direcção à superfície oposta. Parte deste calor será “consumido” pela primeira camada do elemento, a qual está demasiado fria em comparação com a superfície oposta e tem de ser aquecida. O restante continua o seu caminho em direcção à camada seguinte, mas parte será “consumida” ao aquecer essa camada e assim sucessivamente. Desta forma, apenas um fragmento do fluxo inicial chega à superfície oposta, sendo possível não chegar nada, pois numa segunda fase a temperatura da superfície torna-se mais fria, desenvolvendo-se fluxos inversos da parede (b)), libertando o calor que foi acumulado na primeira parte do período.

Como a temperatura exterior não é constante, vai variando ao longo do ciclo do dia numa oscilação cujo período é de 24 horas, vai haver uma correspondência dessa variação na temperatura

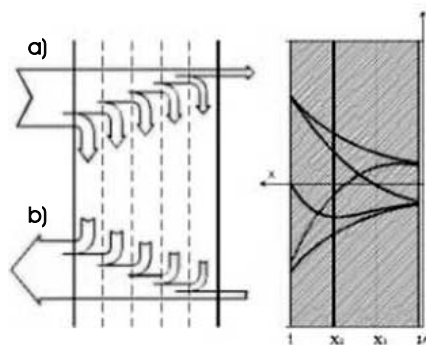


Figura A1.2.12. Representação gráfica dum fluxo de calor periódico através duma parede (FABUTE 2003)

interior. À oscilação sinusoidal das temperaturas exteriores corresponderá uma oscilação na temperatura interior, mas neste caso sofrendo um amortecimento e um atraso em função da capacidade térmica da parede. Considerando variações perfeitamente sinusoidais e uma parede simples homogénea, o atraso térmico pode ser calculado pela seguinte expressão (Sastre 2000):

$$A_t = \frac{t}{2} \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c}{\pi \cdot \lambda \cdot t}} \quad (\text{A1.2.23})$$

Onde;

A_t : Atraso térmico [h]

t : Período da onda térmica [24 horas];

d : Espessura da parede [m];

λ : Condutibilidade térmica [W/m.K];

c : Calor específico do material [W/kg.K];

ρ : Densidade do material [kg/m³];

Na Tabela A1.2.12 apresentam-se valores teóricos do Atraso térmico (A_t) calculados para uma espessura de 1m de diversos tipos de elementos e materiais homogéneos.

O efeito da massa térmica na oscilação da temperatura exterior tem um outro efeito, que é o de amortecer a amplitude da onda térmica. O coeficiente de amortecimento térmico ou factor de redução (μ) representa a razão entre a amplitude térmica da superfície exterior (Δt_{ext}) e a amplitude térmica da superfície interior (Δt_{int}) (Sastre 2000):

$$\mu = \Delta t_{\text{ext}} / \Delta t_{\text{int}} \quad (\text{A1.2.24})$$

O valor de μ será próximo de 1 no caso duma envolvente exterior muito leve e próximo de 0 no caso de envolventes com muita massa térmica. O valor duma parede de fachada homogénea pode ser determinado pela seguinte equação exponencial (Sastre 2000):

$$\mu = e^{\left(-d \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c}{t \cdot \lambda}}\right)} \quad (\text{A1.2.25})$$

Onde;

μ - Coeficiente de amortecimento térmico [adimensional];

t - Período da onda térmica [24 horas];

d - espessura da parede [m];

λ - Condutibilidade térmica [W/m.K];

c - Calor específico do material [W/kg.K];

ρ - Densidade do material [kg/m³];

Quando se trata dum elemento multicamada, formado por diferentes espessuras de diferentes materiais, o cálculo do factor de redução total (μ_t) da parede é dado pelo produto entre os diversos factores de cada camada (Sastre 2000):

$$\mu_t = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \dots \cdot \mu_n \quad (\text{A1.2.26})$$

Os fluxos de calor podem então ser apresentados como razões entre valores de duas funções harmónicas. O valor absoluto representa a razão entre as duas amplitudes (μ), enquanto o argumento é o atraso de fase entre os dois pontos correspondentes (isto é, dois picos) da função. Numa base de frequência angular

Tabela A1.2.12. Atraso térmico teórico para diversos materiais (Sastre 2000)

| Material (e = 1m) | A_t (h) |
|----------------------|-------------|
| Aço | 18,80 |
| Água | 61,80 |
| Alumínio | 2,50 |
| Ar em repouso (10°C) | 5,45 |
| Argamassa de cimento | 25,85 |
| Betão normal | 29-30 |
| Betão leve | 33,70 |
| Borracha | 80,00 |
| Madeira | 58,00-74,00 |
| Pedra | 21,8-23,12 |
| Poliestirenos | 6,93 |
| Tijolo maciço | 30,28 |

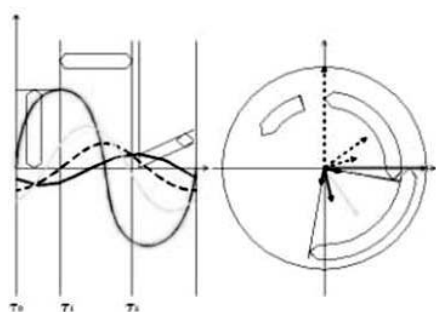


Figura A1.2.13. Representação gráfica do atraso (A_t) e amortecimento térmico (μ) através duma parede (FABUTE 2003)

(2π é o período correspondente) o atraso de fase pode ser transformado em atraso temporal e pode ser representado graficamente como no gráfico da direita da Figura A1.2.13. (FABUTE 2003). Aqui pode ver-se a temperatura versus tempo num sistema de de coordenadas: os vectores, apresentados num dado instante, representam a A_t no período de 24h, a projecção no eixo dos x é proporcional à temperatura, o ângulo entre dois vectores é proporcional ao μ .

A1.2.5.4. Armazenamento térmico convencional:

Devido à limitada profundidade de penetração do fluxo de calor, é normal que grande parte da capacidade acumuladora de calor em paredes e pavimentos de grande espessura esteja inactiva. O conceito de “massa térmica activa” foi implementado de modo a simplificar o projecto e poder otimizar as soluções construtivas sob o ponto de vista térmico. Quando se calcula a massa térmica activa, é necessário o cálculo da profundidade de penetração do fluxo de calor (ou seja a espessura onde variações consideráveis de temperatura são acompanhadas com o armazenamento/libertação do calor). A espessura depende do período: quanto maior é o período, mais espessa terá de ser a camada. Quando não é referido a duração do período, considera-se o período de 24h (FABUTE 2003).

A profundidade de penetração pode ser calculada de um modo preciso. No entanto, para simplificar, usa-se uma simples regra prática. A espessura efectiva (d^*) é o menor dos seguintes valores (FABUTE 2003):

- metade da espessura total da construção;
- a espessura entre a superfície interior e a primeira camada de isolamento térmico;
- 10cm (para 24h).

A massa térmica convencional efectiva de um elemento construtivo é definida pela sua capacidade térmica, Q_t e a sua área A , e assumindo um calor específico convencional, c_0 através da seguinte equação:

$$m^* = A \frac{Q_t}{c_0} \quad (\text{A1.2.27})$$

Onde:

m^* - Massa térmica superficial útil [kg/m^2];

Q_t - Capacidade térmica [J/K];

A - Área [m^2];

c_0 - Calor específico convencional [$1.000\text{J}/\text{Kg.K}$].

Note-se que em muitos casos a maior parte da capacidade de armazenamento térmico de paredes sólidas e pavimentos é inactiva, devido à limitada profundidade de penetração.

A profundidade activa pode também ser medida em resistência térmica (R_t), como se pode ver na Figura A1.2.14. Para um período de 24h ($\alpha=1$) a profundidade activa corresponde a uma $R_t=0,15\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$. Para um período inferior a 24h ($0\leq\alpha<1$), as camadas mais profundas não estão activas. De acordo com esta

regra, a espessura da zona activa é $d = \alpha * 0,15$. A massa térmica específica para 1 m^2 de elemento do edifício é dada pela seguinte expressão (FABUTE 2003):

$$m = e * \rho. \quad (\text{A1.2.28})$$

Onde;

m - Massa térmica específica [kg/m^2];

e - espessura da zona activa da parede [m];

ρ - Densidade do material [kg/m^3].

Em elementos multi-camadas, são possíveis duas opções:

- a zona activa é incorporada na primeira camada – neste caso a regra acima é aplicada;
- a espessura da zona activa excede a espessura da primeira camada – neste caso a profundidade activa na segunda camada é $x = \alpha_2 * R_2$. Aqui $R_2 = 0,15 - R_1$, onde este último é a resistência térmica da primeira camada. A massa térmica específica para 1 m^2 de elemento do edifício é dada por:

$$m = e_1 * \rho_1 + x \rho_2 \quad (\text{A1.2.29})$$

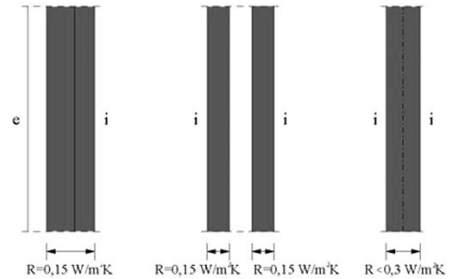


Figura A1.2.14. Representação gráfica das profundidades activas a partir da resistência térmica de diversos tipos de paredes (FABUTE 2003)

Em paredes divisórias espessas e em lajes de pavimento, as zonas activas, medidas em ambas as superfícies, não se sobrepõem uma à outra. O método de cálculo em compartimentos adjacentes é o mesmo que para elementos exteriores.

Em elementos finos as zonas activas, medidas em ambas as superfícies, podem sobrepor-se uma à outra. Neste caso metade da massa do elemento pertence ao compartimento adjacente.

Para a maioria dos materiais de construção convencionais o calor específico apresenta valores muito próximos (entre $0,16$ e $0,30 \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ - como se pode ver na Tabela A1.1.6). Na maior parte dos casos apenas se menciona a massa para a avaliação da capacidade térmica nas paredes construídas com materiais convencionais. Uma importante excepção é a madeira, cujo calor específico é entre $0,36$ e $0,60 \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Assumindo que também as resistências térmicas dos materiais convencionais são equivalentes, o RCCTE considera duma forma simplificada, que a capacidade térmica dum elemento construtivo corresponde apenas à sua Massa superficial, em kg/m^2 .

Tal como no método das Resistências térmicas referido anteriormente, a posição da massa superficial do elemento construtivo na construção define a capacidade térmica efectiva, ou massa superficial útil (M_i), que é a capacidade térmica dos elementos construtivos que vai efectivamente ter influência no ambiente interior durante o ciclo de um dia. Esta, para elementos de fachada (e também para elementos em contacto com outra habitação, com locais fechados não enterrados e com o solo), é determinada da seguinte forma (RCCTE 1990):

- Se estes elementos não possuem isolamento térmico contabiliza-se metade da sua massa $M_i = m/2$;

- Se existir um isolamento térmico (material de condutibilidade térmica inferior a $0,065\text{W/m}^\circ\text{C}$, com uma espessura que conduza a uma resistência térmica superior a $0,5\text{m}^2\text{C/W}$ considera-se somente a massa situada do lado interior do isolamento $M_i = m_i$;
- Em qualquer dos casos os valores de M_i só podem ser considerados até um limite de 150kg/m^2 .

A M_i de paredes interiores e lajes de piso que separam compartimentos úteis da mesma habitação é considerada na sua totalidade até um limite de 300kg/m^2 .

Em qualquer dos caso referidos anteriormente, se o revestimento apresentar uma resistência térmica compreendida entre $0,14$ e $0,5\text{m}^2\text{C/W}$, deve-se reduzir M_i em 50%.

Nos edifícios de habitação convencionais em Portugal, os elementos da envolvente exterior, e os interiores, incluindo paredes interiores e lajes de pavimento e tecto, acumulam e libertam calor. De uma forma geral, as lajes e divisórias interiores têm um papel mais importante, devido à grande massa do pavimento, em parte devido a absorverem e libertarem energia pelos dois lados das superfícies para os compartimentos adjacentes.

Em edifícios de escritórios, é bastante comum utilizar uma grande capacidade de armazenamento térmico das lajes de piso e tecto, mas envoltentes e divisórias interiores leves. Os edifícios de habitação com mais de 50 anos, apresentavam uma situação oposta aos de escritórios actuais, já que dispunham de paredes exteriores muito pesadas, em pedra ou adobe, mas com pavimentos e tectos leves, em madeira. Esta situação permitiria teoricamente uma inércia térmica semelhante a edifícios com paredes e lajes de piso pesadas, não fosse a ausência de isolamento térmico e a pouca estanquicidade das caixilharias nestes edifícios que impedia assim a obtenção de níveis de conforto equivalentes aos actuais. Este facto contrasta com a ideia generalizada que associa paredes exteriores pesadas (com elevada capacidade térmica) a uma grande inércia térmica. Isto verifica-se apenas se houver poucas aberturas e a cobertura e paredes forem devidamente isoladas.

Com lajes e paredes interiores pesadas pode incrementar-se a inércia térmica, mas se a envolvente exterior for convenientemente isolada durante a noite. Isto deve-se ao facto de, numa parede interior, toda a capacidade térmica contribuir para a inércia térmica pretendida, por se encontrar toda a sua superfície à mesma temperatura que o ambiente interior. Uma parede exterior é menos eficaz (a não ser que tenha isolamento pelo exterior, ou seja tratada como uma parede de absorção térmica, como por exemplo uma parede de Trombe) pois o gradiente de temperatura durante a noite e no início do dia é bastante elevado. Na Figura A1.2.15 representa-se esquematicamente a influência do gradiente de temperatura na capacidade térmica efectiva do pano exterior em comparação com o pano interior numa parede dupla da envolvente dum edifício.

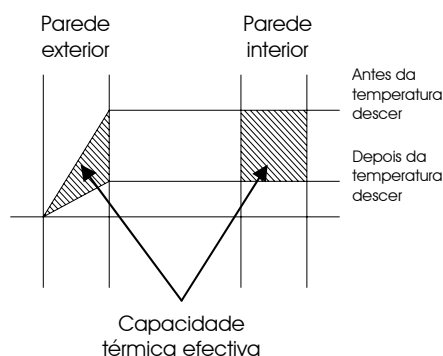


Figura A1.2.15. Influência do gradiente de temperatura na capacidade térmica efectiva (Davies 2001)

A1.2.5.5. Armazenamento térmico não-convencional

O uso de materiais com propriedades específicas para armazenamento térmico é uma possibilidade para aumentar a inércia térmica sem aumentar significativamente o peso do edifício. Por exemplo a utilização de água como meio de armazenamento térmico, pode aumentar a capacidade de armazenamento térmico. Em adição ao seu elevado calor específico (4,16kJ/kg.K comparando com 0,8 a 1,4kJ/kg.K dos materiais comuns dos edifícios), a eficiência é aumentada pelos fluxos convectivos, devido às diferenças de temperatura e densidade. Como resultado destes fluxos, a distribuição de temperatura da água torna-se homogénea. O problema é que a água, como se encontra em estado líquido à temperatura ambiente, terá de ser colocada em embalagens, além de ter de se tratar de forma a não desenvolver microorganismos, conforme é referido no Capítulo V.

Outra forma de armazenamento térmico não convencional será utilizar o calor latente das substâncias. O calor latente está associado às mudanças de estado da matéria. O “calor latente de fusão” é o calor necessário para uma matéria passar de estado sólido a líquido e o “calor latente de evaporação” é o necessário à passagem de estado líquido a gasoso (Bradshaw 1993). A libertação de calor latente dá-se nas mudanças de estado inversas, ou seja na solidificação e na condensação. O aproveitamento desta propriedade em certos materiais que mudam de fase a temperaturas próximas da temperatura de conforto, entre os 18 e os 25°C, pode ser utilizado em termos de soluções passivas de regulação térmica, sendo designados de PCMs. Na literatura inglesa P.C.M. corresponde às iniciais de “Phase Change Materials”.

Um PCM com uma temperatura de mudança de fase próxima da temperatura de conforto do compartimento é aplicável para a estabilização da temperatura interior. Aqueles com uma maior temperatura de mudança de fase podem ser utilizados para propósitos de aquecimento. Quanto mais alta é a temperatura de mudança de fase, mais valiosa é a energia armazenada, no entanto o número de horas/épocas em que se alcança a mudança de fase por radiação directa (unidades de armazenamento primário) ou por convecção (armazenador secundário ou remoto) será menor.

Existem vários tipos de PCMs passíveis de ser utilizados em construção, tais como:

- Sais e Hidratos de Sal;
- Metais e ligas;
- Polialcoóis;
- Parafinas;
- Cera natural;
- Óleo de coco.

Os PCMs podem ser colocados em contentores, montados como unidades com suporte próprio ou embebidos em agregados de elementos convencionais, tal como o cascalho no betão. Materiais compósitos (PCMs mais gesso, PCMs numa matriz de resina

sintética) facilitam a construção de elementos de suporte próprio (tais como elementos suspensos no tecto).

No Capítulo V apresenta-se uma solução existente de PCMs com parafinas em painéis sandwich de membrana têxtil. No Capítulo VI é proposta uma solução com óleo de côco em recipientes plásticos, que foi objecto de ensaios térmicos experimentais em Célula de Teste.

A1.2.5.6. Avaliação da Inércia Térmica numa habitação

A inércia térmica é a propriedade do espaço, isto é, do volume delimitado pela fronteira, representada pelas componentes com massa e com particular capacidade de armazenamento térmico, que torna possível armazenar o calor, gerindo-o em função da temperatura do ar (Fernandes e Maldonado 1991). A massa térmica de uma habitação constitui o somatório dos produtos das massas superficiais úteis pela sua respectiva superfície dos elementos que constituem a zona útil da habitação. A classe de inércia determina-se dividindo este somatório pela área de pavimento útil da habitação, com a expressão (CSTB annexes 1988):

$$I_t = \frac{\sum (M_i \cdot A_s)}{A_p} \quad (\text{A1.2.30})$$

A inércia obtida é assim classificada segundo a Tabela A1.2.13.

Tabela A1.2.13. Classes de Inércia numa habitação segundo CSTB

| Massa por metro quadrado habitável [kg/m ²] | Inércia |
|--|-------------|
| $I_t < 100$ | Muito fraca |
| $100 \leq I_t < 150$ | Fraca |
| $150 \leq I_t < 400$ | Média |
| $I_t \geq 400$ | Forte |

Fonte: (CSTB Annexes 1988)

O RCCTE simplifica estes valores, excluindo a classe de inércia muito fraca, como se pode ver na Tabela A1.2.14.

Tabela A1.2.14. Classes de Inércia numa habitação segundo RCCTE

| Massa por metro quadrado habitável [kg/m ²] | Inércia |
|--|---------|
| $I_t < 150$ | Fraca |
| $150 \leq I_t \leq 400$ | Média |
| $I_t > 400$ | Forte |

Fonte: (RCCTE 1990)

A maioria dos edifícios de habitação em Portugal tem inércia térmica média ou forte (RCCTE 1990). Para a inércia térmica média basta que a zona independente tenha uma laje de pavimento e outra de tecto com 150kg/m² cada uma, ou seja:

- Uma laje de pavimento aligeirada ou maciça sem alcatifa, ou, se tiver alcatifa, uma laje aligeirada com mais de 20cm de espessura ou maciça com mais de 10cm de espessura;
- Uma laje de tecto aligeirada ou maciça de qualquer espessura desde que não isolada – ou com tecto falso – pelo interior.

Ficam portanto excluídos da classe de inércia média, apenas os edifícios com soalhos ou tectos de madeira, tectos falsos, e lajes pouco espessas cobertas com alcatifa.

Se, além daqueles requisitos de lajes de tecto e pavimento, as paredes e divisórias corresponderem a 100kg/m^2 de área útil de pavimento, a inércia será forte. Para esta avaliação, já será necessário fazer a respectiva contabilização, pela expressão A1.2.30.

Pode pensar-se que quanto mais alta seja a massa térmica, maior é a capacidade da habitação em absorver um dado ganho de calor, menor sendo o risco de sobreaquecimento durante as horas de insolação ou reduzindo as Necessidades de Aquecimento. No entanto, deverá ser cuidadosamente ponderada a espessura das superfícies de armazenamento, já que se a espessura do material é excessiva, as camadas interiores deste não acumularão calor e tornam-se assim inúteis e até mesmo prejudiciais, pois a libertação do calor acumulado poderá ser feita durante horas em que este além de já não ser necessário pode revelar-se supérfluo, como já foi referido.

A equação do balanço de calor em edifícios, sugere que os ganhos solares (Q_s) e internos (Q_{int}), podem contrabalançar as perdas pela envolvente (Q_{tr}) e por renovação de ar (Q_v). Assim, se $Q_{tr} + Q_v < Q_s + Q_{int}$, não são teóricamente requeridos ganhos por sistemas mecânicos de aquecimento (Q_{HC}). Se $Q_{tr} + Q_v > Q_s + Q_{int}$, o sistema de aquecimento necessita de providenciar a diferença. Tal facto sugere que o factor de utilização dos ganhos (η) varia, de acordo com a curva de cima (A) na Figura A1.2.16, como função da razão entre cargas de ganho.

Estes valores idealizados podem ser aplicados, ora para um perfeito sincronismo entre ganhos e perdas (o que é impossível de obter na realidade), ora para um edifício sem capacidade de armazenamento térmico, em ambos estes casos, com uma necessidade de resposta permanente dum sistema de aquecimento mecânico.

Devido a variações de ganhos solares e internos, periódicas e estocásticas, existe normalmente um assincronismo entre os ganhos e as perdas. Quando os ganhos excedem as perdas, ou quando as perdas excedem os ganhos, a capacidade de armazenamento está a ser carregada ou descarregada, respectivamente (FABUTE 2003).

Este processo é acompanhado pela amplitude térmica interior, a qual deverá ser limitada no aspecto de conforto térmico. Como consequência, o factor de utilização real, sucumbe a valores ideais: quanto maior é a capacidade de armazenamento térmico e mais lenta é a resposta do sistema de aquecimento, mais baixo é o factor de utilização. Valores reais para as diferentes categorias de inércia estão no intervalo (B), dependendo dos factores acima referidos. A curva mais acima corresponde a uma inércia forte, a curva mais abaixo corresponde a uma inércia fraca e a curva do meio a uma inércia média.

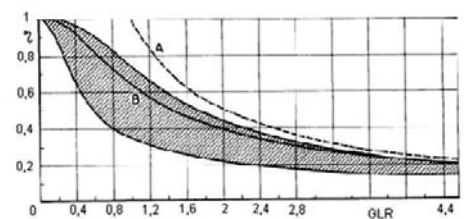


Figura A1.2.16. Factor de utilização dos ganhos (FABUTE 2003)

O GLR no eixo das abcissas corresponde ao quociente entre os Ganhos solares brutos (G_{SB}) e as Necessidades brutas de aquecimento (N_{BA}) (RCCTE 1990):

$$GLR = \frac{G_{SB}}{N_{BA}} \quad (A1.2.31)$$

O valor do factor de utilização dos ganhos pode ser obtido através da equação exponencial:

$$\eta = 1 - e^{\left(-\frac{K}{GLR}\right)} \quad (A1.2.32)$$

Onde:

η : Factor de utilização dos ganhos solares (adimensional)

GLR : Obtido pela expressão 4.2.33;

K : em função da classe de inércia: 0,7 : inércia fraca;

1 : inércia média;

1,3 : inércia forte.

Para calcular a oscilação da temperatura interior da zona útil duma habitação ao longo do dia, tem de se ter em conta o efeito de armazenamento térmico das paredes. Balcomb propõe um método de cálculo que é seguidamente descrito (Balcomb 1993). Trata-se dum método simplificado que apresenta resultados, com uma precisão que, relativamente aos métodos mais complexos de funções de transferência, apresentam um erro de apenas 5 a 8% (Mitjá 1986).

A capacidade de absorver a energia solar térmica, recebida pelos envidraçados, a partir da massa interior de um compartimento, libertando-a à noite, denomina-se como Capacidade Calorífica diurna mínima total (DHC). Este parâmetro também determina a capacidade de um edifício com ventilação nocturna, fechado durante o dia, absorver "energia de refrigeração nocturna". Este parâmetro pode ser calculado a partir da seguinte expressão (Givoni 1998):

$$DHC = \sum A_i \cdot dhc_i \quad (A1.2.33)$$

Onde:

DHC : Capacidade calorífica diurna mínima total (Wh/°C);

dhc_i : Capacidade calorífica diurna de cada superfície (Wh/°C.m²);

A_i : Área das superfícies (m²).

O método de Balcomb baseia-se no cálculo de um dia limpo, em que os ganhos solares e internos são suficientes para garantir uma temperatura mínima de conforto e portanto não existe recurso a sistemas mecânicos de aquecimento.

Balcomb define o conceito de Capacidade térmica diurna (DHC) como a quantidade de calor que o edifício pode armazenar durante a primeira metade dum período de 24 horas e devolver na segunda metade do período por grau centígrado. O balanço térmico do edifício durante o período diurno pode-se representar pela seguinte equação (Balcomb 1993):

$$\text{DHC} \cdot \Delta T_{\text{int}} = Q_s + Q_{\text{int}}/2 - Q_p/2 \quad (\text{A1.2.34})$$

Com:

DHC : capacidade térmica diurna (J/°C);

ΔT_{int} : Amplitude térmica diária interior (°C);

Q_p : Perdas térmicas diárias da habitação (J);

Q_s : Ganhos solares de um dia (J);

Q_{int} : Ganhos internos de um dia (J);

Supõe-se que as perdas térmicas do período diurno são a metade das correspondentes ao total do dia. Na realidade dependem da variação das temperaturas exterior e interior ao longo do dia, bem como da utilização ou não de elementos de isolamento térmico adicional durante a noite. O balanço para todo o dia é dado por:

$$Q_s + Q_{\text{int}} = Q_p \quad (\text{A1.2.35})$$

Combinando as duas equações:

$$\text{DHC} \cdot \Delta T_{\text{int}} = Q_s/2 \quad (\text{A1.2.36})$$

E finalmente:

$$\Delta T_{\text{int}} = Q_s/2 \cdot \text{DHC} \quad (\text{A1.2.37})$$

Dados experimentais realizados em casas solares passivas (Balcomb 1993) demonstraram que a amplitude térmica diária das temperaturas é superior ao valor obtido segundo as equações anteriores. Por este motivo o cálculo destas deverá ser feito introduzindo um factor de correcção, pelo que a equação final é:

$$\Delta T_{\text{int}} = 0,61 \cdot Q_s / \text{DHC} \quad (\text{A1.2.38})$$

A quantidade de calor por unidade de superfície que um material pode armazenar ao longo do dia e devolver durante a noite, por grau da diferença entre a temperatura do dia e da noite, denomina-se capacidade calorífica diurna da parede (dhc) e obtém-se a partir da seguinte expressão, tendo em conta as temperaturas superficiais e com ganhos obtidos através de radiação (Balcomb 1993):

$$\text{dhc}_r = \sqrt{\frac{P \cdot \rho \cdot C \cdot \lambda}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{(\cosh 2X - \cos 2X)}{(\cosh 2X + \cos 2X)}} \quad (\text{A1.2.39})$$

Onde,

$$X = d \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot C}{P \cdot \lambda}} \quad (\text{A1.2.40})$$

Com:

dhc_r : capacidade térmica diurna da parede por radiação [Wh/m².°C];

P : Período de oscilação, considerado de um dia [s];

ρ : Densidade do material [kg/m³];

C : Calor específico do material [J/Kg.°C];

λ : Condutibilidade térmica do material [W/m.°C];

d : Espessura do material [m].

A expressão 4.2.39 apenas tem em conta as temperaturas superficiais. Para incluir a resistência térmica superficial exterior terá de ser reescrita esta expressão. A inclusão da convecção no cálculo de dhc é dada pela seguinte expressão (Mitjá 1986):

$$dhc = \frac{dhc_i}{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot dhc_i}{h \cdot Q_p} + \cos \phi\right)^2 + \sin^2 \phi}} \quad (A1.2.41)$$

Com:

dhc : capacidade térmica diurna da parede incluindo convecção [$Wh/m^2 \cdot ^\circ C$];

dhc_i : capacidade térmica diurna da parede excluindo convecção calculada segundo A1.2.39 [$Wh/m^2 \cdot ^\circ C$];

h : Coeficiente de convecção [$J/kg \cdot ^\circ C$];

Q_p : Perdas térmicas diárias da habitação [J];

e onde;

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \tan^{-1} \left(\frac{\sin 2X}{\sinh 2X} \right) \quad (A1.2.42)$$

com;

X : calculado segundo a expressão A1.2.40.

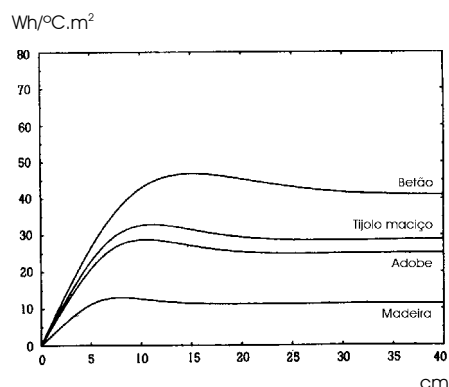


Figura A1.2.17. Capacidade térmica diurna para diversas paredes, em função da sua espessura (Mitjá 1986)

Na Figura A1.2.17 compara-se a eficácia de diferentes materiais como massa térmica. Cabe salientar da análise desta que a partir duma determinada espessura (por exemplo 15 a 20cm de betão, 10 a 15cm para o tijolo) se torna supérfluo utilizar mais massa térmica (retardamento excessivo da onda térmica e massa desperdiçada) (Mitjá 1986).

O último passo é classificar as diferentes massas térmicas do edifício, podendo dar-se dois casos para paredes (Mitjá 1986):

- 1. Massa com ganho por radiação:** A energia solar é transferida para o elemento de armazenamento térmico através de radiação solar ou térmica. A massa tem de estar situada no espaço que recebe a radiação solar ou formar parte duma das paredes envolventes. Não é necessário que receba a radiação solar directamente, mas terá de existir um contacto visual entre a superfície da massa térmica e as superfícies que recebem os raios solares. Para estes elementos o DHC calcula-se recorrendo à expressão A1.2.39 para o dhc_i ;
- 2. Massa com ganho por convecção:** A energia solar transfere-se para a massa de armazenamento térmico através da convecção natural. Para tal têm de existir portas ou outras aberturas, com uma área mínima de 4% da superfície do elemento de armazenamento, ou 2% se existirem aberturas separadas verticalmente, num mínimo de duas. Neste caso o DHC calcula-se recorrendo à expressão 4.2.41 para o dhc_i .

O DHC dos pavimentos situados em espaços que recebem directamente a radiação solar considera-se como no caso 2, referido anteriormente. Os pavimentos situados noutros espaços devem ser desprezados (Mitjá 1986).

Além da Capacidade calorífica diurna dos diferentes elementos construtivos do edifício também se deve ter em conta os correspondentes ao mobiliário. O seu valor pode ser estimado em $11 Wh/^\circ C$ por m^2 de superfície habitável (Balcomb 1993).

A1.3. Isolamento acústico

O isolamento acústico das construções é um fenómeno complexo, que depende de vários aspectos. Este trabalho não se centra propriamente nos aspectos de desempenho acústico das construções, mas ao relacionar conforto com impacto ambiental, e como a estratégia pretendida de redução do peso próprio das construções, nomeadamente das soluções construtivas de fachada, poderá ocasionar problemas acústicos, este é um aspecto que se deverá salvaguardar. Para a escolha das soluções construtivas a adoptar na Célula de Edifício Teste Proposta, tornou-se necessário fazer a estimativa do desempenho acústico dos elementos construtivos (essencialmente paredes de fachada) não convencionais propostos, bem como dos mais comuns na construção portuguesa, que serviriam como referência. A melhor forma de caracterizar estes elementos em termos de desempenho acústico seria fazer a estimativa do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, ponderado ($D_{n,w}$) e verificar a sua adequação à regulamentação

A1.3.1. Traçado da Curva de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea a partir do Modelo Misto

Para efeitos de estimativa do valor de $D_{n,w}$, os métodos utilizados em Portugal são o Método gráfico do LNEC (Martins da Silva 1978) e o Modelo Misto (Meisser 1978) (Mateus e Tadeu 1999). Optou-se aqui pela utilização deste último modelo para prever o desempenho das paredes de fachada e lajes de pavimento e cobertura em estudo nas Células de Edifício Teste, por ser, dentre os referidos anteriormente, aquele que apresenta valores com menor grau de incerteza.

Da energia sonora absorvida por uma parede, uma parte é dissipada sob a forma de calor, sendo a restante transmitida pela parede para outros locais. A transmissão de energia sonora pela parede depende de muitos factores, entre os quais se podem destacar:

- frequência do som incidente na parede;
- massa da parede;
- ângulo de incidência das ondas sonoras;
- porosidade da parede;
- rigidez das paredes.

A1.3.1.1. Leis da massa e da frequência – traçado da curva inicial

No caso de sons aéreos, os parâmetros com maior influência na transmissão de sons são a **massa** da parede e a **frequência** do som incidente.

Segundo a Lei da Massa Teórica, para um hipotético elemento, de rigidez nula, o índice de redução sonora para um som com uma determinada frequência, está directamente relacionado com a massa desse elemento. Uma parede pesada tem então, em princípio, um índice de atenuação sonora maior do que uma parede leve.

É possível estabelecer, através dum modelo inercial, uma lei da massa teórica que se traduz num acréscimo de isolamento sonoro do elemento de separação de 6dB por cada duplicação da massa, ou por duplicação da frequência do som. Deste modo, o isolamento sonoro de um elemento de separação, em situação de campo difuso pode ser dado pela seguinte expressão (Mateus e Tadeu 1999):

$$D_n = 20 \log (fm) - 47\text{dB} \quad (\text{A1.3.1})$$

Onde:

f: Frequência do som em Hz;

m: massa por unidade de superfície do elemento.

Da análise experimental efectuada por diversos autores, foi possível verificar que na zona controlada pela lei da massa o acréscimo médio de isolamento por duplicação de massa é geralmente inferior aos 6dB definidos pela lei teórica referida anteriormente.

A partir da análise experimental, Meisser admite um índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, para uma frequência de 500Hz e para uma massa de 100Kg/m² de 40dB (Meisser 1978).

$$D_n = 40\text{dB} \text{ para } m = 100\text{kg/m}^2 \text{ e } f = 500\text{Hz} \quad (\text{A1.3.2})$$

Considera igualmente uma lei experimental traduzida por um acréscimo de 4dB por cada duplicação da massa.

Tabela A1.3.1. Lei experimental da massa, com valores obtidos para uma frequência de 500 Hz, segundo Meisser

| Massa | |
|----------------------------|-------------|
| 25kg/m ² | 32dB |
| 50kg/m ² | 36dB |
| | - 4dB ↑ |
| 100kg/m² | 40dB |
| 200kg/m ² | 44dB |
| 400kg/m ² | 48dB |
| | + 4dB ↓ |

Segundo Mateus e Tadeu, a lei experimental da massa para um som de 500Hz pode ser expressa pela seguinte expressão, para $m \leq 200\text{kg/m}^2$ (Mateus e Tadeu 1999):

$$D_{n(500\text{ Hz})} = 13.3 \log (m) + 13.4\text{dB} \quad (\text{A1.3.3})$$

Para elementos de separação pesados, com $m \geq 200\text{kg/m}^2$, da análise experimental verifica-se que a lei da massa apresenta um maior coeficiente de proporcionalidade entre a massa e a absorção sonora, podendo neste caso utilizar-se a seguinte expressão (Mateus e Tadeu 1999):

$$D_{n(500\text{ Hz})} = 14.3 \log (m) + 11.1\text{dB} \quad (\text{A1.3.4})$$

Relativamente à descrição no domínio em frequência, Meisser considera uma lei da frequência experimental igualmente de 4dB, mas com um posterior ajustamento dos valores em frequência ao modelo analítico, considerando a lei da frequência teórica (6dB/oct) e as quebras de isolamento nas frequências próprias de vibração transversal por flexão e por efeito de coincidência para elementos simples (Meisser 1978). Para elementos duplos Mateus e Tadeu

referem uma lei da frequência teórica de 8dB/oit, tomando sempre como referência a lei da frequência experimental de 6dB/oit e para elementos triplos uma lei da frequência teórica de 12db/oit e experimental de 10dB/oit.

Os valores para o traçado inicial da curva por frequências, definida a partir de Meisser, considerando uma massa de 100kg/m² estão resumidos na Tabela 6.4.9, para paredes simples, duplas e triplas:

Tabela A1.3.2. Valores a considerar na curva para paredes com massa de 100kg /m²

| | Parede simples | Parede dupla | Parede tripla |
|--------------|----------------|--------------|---------------|
| 125Hz | 32dB | 28dB | 20dB |
| 250Hz | - 4dB ↑ 36dB | - 6dB ↑ 34dB | - 10dB ↑ 30dB |
| 500Hz | 40dB | 40dB | 40dB |
| 1000Hz | +4dB ↓ 44dB | +6dB ↓ 46dB | +10dB ↓ 50dB |
| 2000Hz | 48dB | 52dB | 60dB |

Em elementos duplos, dado o maior número de frequências próprias em jogo, esta lei experimental de 6dB/oit conduz, em geral, a um menor rigor na previsão do Índice de Isolamento Sonoro, quando comparada com a correspondente lei aplicável a elementos simples. Por outro lado, esta lei geralmente só é válida para frequências de som superiores à frequência de ressonância do conjunto massas/caixa-de-ar. Caso contrário, os elementos de separação duplos não se mostram vantajosos, do ponto de vista acústico, quando comparados com elementos simples com a mesma massa total (Mateus e Tadeu 1999).

Da análise experimental, efectuada por Mateus e Tadeu (Mateus e Tadeu 1999), verificou-se que um elemento de separação duplo apresenta geralmente um isolamento sonoro superior ao verificado para um elemento simples com a mesma massa superficial total. Em situações correntes, esta diferença (Dif), para uma frequência de 500Hz, é próxima de **4dB**, para caixas-de-ar de 2 a 4cm e panos de massa não muito diferentes. Pode atingir diferenças de cerca de **9dB**, para caixas-de-ar de 5 a 10cm e panos de massa também não muito diferentes com material absorvente a preencher a caixa-de-ar. Deverá assim ser corrigida a lei experimental da massa com a diferença correspondente (Mateus e Tadeu 1999):

$$D_{n(500\text{ Hz})} = 13.3 \text{ Log } (m) + 13.4\text{dB} + \text{Dif} \rightarrow m < 200\text{kg/m}^2 \quad (\text{A1.3.5})$$

$$D_{n(500\text{ Hz})} = 14.3 \text{ Log } (m) + 11.1\text{dB} + \text{Dif} \rightarrow m \geq 200\text{kg/m}^2 \quad (\text{A1.3.6})$$

Para elementos triplos poderá ser seguida a mesma lógica, neste caso somando os valores das duas caixas-de-ar. Os valores de Dif adoptados neste estudo são os resumidos na Tabela 6.4.10.

Tabela A1.3.3. Valores de acréscimo de isolamento pela existência de caixas-de-ar (Dif)
Panos desligados não muito diferentes

| Características da Caixa de ar | Dif (dB) |
|--|--------------|
| Cx de ar de 1 cm e panos de massas dif | + 2dB |
| Cx de ar de 2 a 4cm | + 3 a 4dB |
| Cx de ar de 5 a 10cm | + 5dB |
| A - Sub-total (caixa de ar) | |
| Material absorvente na caixa de ar | Dif (dB) |
| 1 cm de material absorvente | + 1dB |
| 2 a 4cm de material absorvente | + 2dB |
| 5 a 10cm de material absorvente | + 3 a 4dB |
| B - Sub-total (mat. absorvente) | |
| Panos muito diferentes (por exemplo Paredes Mistas ou Paredes de Trombe) | Dif (-) (dB) |
| A = 1 a 3 | (-) 2dB |
| A+B = 3 a 6 | (-) 3dB |
| A+B = 6 a 9 | (-) 4dB |
| C - Sub-total (mat. absorvente) | |
| | Dif (dB) |
| Total (A+B-C) | |

A1.3.1.2. Correções da curva inicial

Depois de marcar a curva inicial, a partir das leis experimentais da massa e da frequência, são efectuadas as correcções, nomeadamente as quebras nas frequências críticas e as eventuais quebras ocasionadas pelos modos próprios de vibração por flexão transversal do(s) painel(éis), nos elementos simples e nos elementos multi-camadas. Além destas correcções, deverão ser consideradas as quebras pelas frequências de ressonância do conjunto painéis/caixa-de-ar e pelas frequências de ressonância da(s) caixa(s)-de-ar, nos elementos multi-camadas.

Para ser consideradas no traçado do gráfico são normalmente consideradas todas as quebras que afectem os valores das frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000Hz) (Mateus e Tadeu 1999). Segundo Meisser entre 100 e 3200Hz (Meisser 1978) e segundo Martins da Silva entre 125 e 4000Hz (Martins da Silva 1978). A gama referida nas normas da CEN é entre 100 e 3150Hz para bandas de terço de oitava e de 125 a 2000Hz para bandas de oitava, tendo sido estas últimas as consideradas neste estudo. De seguida explica-se, de forma mais detalhada as correcções que é necessário fazer à curva da lei da massa

a) Pelos modos próprios de vibração por flexão transversal do painel

Um aspecto que diz essencialmente respeito ao desempenho acústico dos sistemas de construção leves e nos envidraçados são os modos próprios de vibração, por flexão transversal dos painéis. Estes fenómenos podem contribuir para a quebra de isolamento sonoro do elemento, mas ocorrem apenas nas placas finas. Em elementos de espessura não muito pequena, e de área significativa (por exemplo, paredes divisórias), as primeiras frequências próprias de vibração, relativas ao movimento transversal do painel por flexão transversal do painel, situam-se numa gama de frequências muito baixas, fora da zona com interesse para a acústica arquitectural, não afectando o isolamento sonoro desse elemento.

Os modos próprios de vibração por flexão transversal do painel podem ser determinados através da seguinte expressão (Mateus e Tadeu 1999):

$$f_{nm} = \frac{\pi}{2} * \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (\text{A1.3.7})$$

Onde:

a,b: comprimento e largura da placa (m);

n,m: número de modos de vibração;

ρ : massa por unidade de volume do material que constitui a placa (kg/m^3);

h: espessura da placa (m);

D: rigidez da placa (N.m), traduzida por:

$$D = \frac{h^3 E}{12 * (1 - \nu^2)} \quad (\text{A1.3.8})$$

Onde:

E: módulo de Young [N/m^2];

ν : coeficiente de Poisson.

O número de modos de vibração obtidos a partir da expressão anterior é teoricamente infinito. Contudo, os modos que influenciam significativamente o isolamento acústico são os primeiros modos de vibração, que se representam na Figura A1.3.1 (Mateus e Tadeu 1999).

Nas paredes propostas para a CET 1, já que os painéis (gesso cartonado e aglomerado de fibras de madeira e cimento) funcionam como um painel sandwich e a espessura do painel interior de gesso cartonado é duplicada, as frequências de vibração pelos modos próprios de vibração transversal por flexão não vão ter influência no isolamento acústico, sendo desprezáveis. No caso dos envidraçados, no entanto, terão de ser consideradas

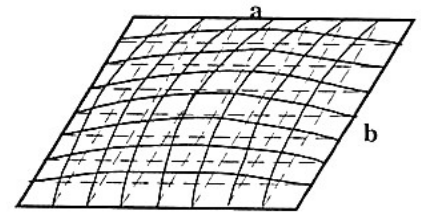
b) Pelo efeito de coincidência:

A **frequência crítica** é a frequência mais baixa a que ocorre o efeito de coincidência.

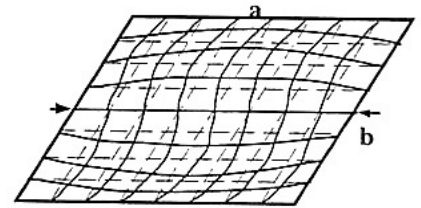
- A Frequência crítica de cada painel pode ser calculada a partir dos valores da Tabela A1.3.4 e dividindo pela espessura como se indica na seguinte expressão:

$$f_c = \frac{\text{Frequência crítica para uma espessura de 1 cm de material}}{\text{Espessura do material em cm}} \quad (\text{A1.3.9})$$

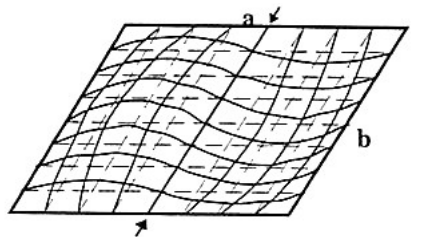
Na Tabela A1.3.4 são também apresentadas as respectivas quebras de isolamento por efeito de coincidência.



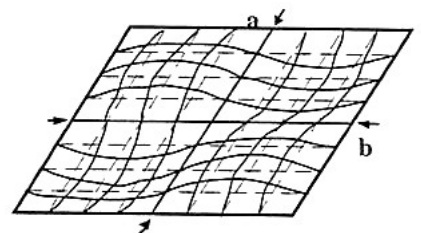
Modo de vibração com n=1 e m=1.



Modo de vibração com n=1 e m=2.



Modo de vibração com n=2 e m=1.



Modo de vibração com n=2 e m=2.

Figura A1.3.1. Modos próprios de vibração transversal por flexão com influência no isolamento acústico (Mateus e Tadeu 1999).

Tabela A1.3.4. Frequências críticas e quebra de isolamento por efeito de coincidência de diversos materiais para paredes de 1cm de espessura.

| Material | Massa volumica [kg/m³] | Quebra de isolamento por efeito de coincidencia [dB] | Frequência crítica [Hz] para uma espessura de 1cm |
|--------------------------------------|------------------------------|--|--|
| Aço | 7.800 | 10 | 1.000 |
| Aglomerado fibras de madeira/cimento | 1.350 | 8 | 6.000 |
| Alumínio | 2.700 | 10 | 1.300 |
| Betão de inertes correntes | 2.300 | 8 | 1.800 |
| Betão de escórias | 1.400 | 8 | 2.000 |
| Blocos de betão magro | 1.000 | 8 | 2.100 |
| Betão de argila expandida | 1.500 | 5-6 | 1.900 |
| Borracha | 1.000 | 4 | 85.000 |
| Gesso | 1.000 | 7 | 4.000 |
| Chumbo | 10.600 | 5 | 8.000 |
| Cortiça | 250 | 4 | 18.000 |
| Madeira | 600 | 6 | 6.000 a 18.000 |
| Poliestireno expandido | 14 | 5 | 14.000 |
| Tijolo furado | 1.427 | 9 | 2.000 |
| Tijolo maciço | 2.000-2.500 | 9 | 2.500 a 5.000 |
| Vidro | 2.500 | 10 | 1.200 |

Fonte: (Meisser 1978).

Normalmente não se contabiliza duma forma diferenciada os revestimentos das paredes de alvenaria ou das lajes no cálculo da frequência crítica, porque representam valores desprezáveis.

Os valores de quebra na frequência crítica referidos na Tabela A1.3.4 aplicam-se a paredes com panos desligados e de igual espessura bem como a paredes simples. No caso de panos do mesmo material mas de espessuras diferentes, por exemplo num vidro duplo acústico, o valor a considerar deverá ser reduzido de cerca de 2dB ao valor apresentado (10dB), o que implica 8dB para cada pano.

No caso de materiais cujos valores não estão tabelados, a frequência crítica pode ser calculada a partir da seguinte expressão (Mateus e Tadeu 1999):

$$f_c = \frac{c^2}{1,8138 * h} * \sqrt{\frac{\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad (\text{A1.3.10})$$

Onde;

c : velocidade do som [m/s];

h : espessura do elemento [m];

ρ : densidade do material [Kg/m³];

E : módulo de elasticidade [N/m²].

A frequência crítica pode também ser calculada a partir da seguinte expressão simplificada (Meisser 1978):

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 * h} * \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (\text{A1.3.11})$$

Onde;

c : velocidade do som [m/s];

h : espessura do elemento [m];

ρ : densidade do material [Kg/m³];

E : módulo de elasticidade [N/m²].

Se a frequência crítica estiver numa zona próxima das frequências médias da sensibilidade auditiva humana (entre 250 e 1000Hz), a queda de isolamento é muito acentuada, pelo que serão de evitar, sempre que possível, quebras nesta zona.

c) Frequência(s) de ressonância do conjunto das divisórias múltiplas

Quando existe excitação do conjunto de panos do elemento construtivo (necessariamente com caixa-de-ar), a uma frequência igual a um dos panos, ocorre uma grande acumulação de energia vibratória, aumentando assim significativamente a amplitude de vibração geral. A este fenómeno chama-se ressonância do conjunto. A frequência de ressonância (f_r) é a frequência para a qual a amplitude de vibração, devido à sua própria natureza estrutural, é máxima. Só deverá ser considerada se estiver dentro do intervalo das frequências com interesse para a acústica arquitectural, ou seja, entre os 100Hz e os 3.150Hz (NP 2073 1974).

No caso de paredes duplas em alvenaria convencionais, a frequência de ressonância encontra-se geralmente fora da zona audível, pelo que é desprezável. No caso de divisórias leves ou de envidraçados duplos correntes, devido às baixas massas dos dois painéis e devido às pequenas caixas-de-ar utilizadas, esta frequência situa-se no intervalo atrás referido, não podendo ser desprezada a sua contribuição no isolamento sonoro, ocorrendo quebras da ordem dos 6 a 8dB (Mateus e Tadeu 1999).

- **Panos duplos:** A ressonância do conjunto de painéis das divisórias duplas / caixa-de-ar é dada pela seguinte expressão (Mateus e Tadeu 1999):

$$f_{ress} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (A1.3.12)$$

Com;

c : velocidade de propagação do som = 340 [m/s];

m_i : massa superficial do painel i [kg/m²];

ρ : massa volúmica do ar ao nível do mar em kg/m³ [$\rho_{ar} = 1,22$ kg/m³];

d : espessura da lâmina de ar [m].

A partir da expressão anterior, tendo em conta um campo sonoro difuso, logo com uma velocidade de propagação de 1,4 vezes a velocidade do som, a frequência de ressonância do conjunto parede dupla / caixa-de-ar pode ser calculada a partir da seguinte expressão simplificada (Mateus e Tadeu 1999):

$$f_{ress} = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (A1.3.13)$$

Com:

d: espessura da caixa-de-ar [m];

m_1, m_2 : massa dos panos constituintes da parede [kg/m²].

- **Panos tripos:** Ressonância do conjunto (painéis das divisórias triplas/caixas-de-ar) O elemento triplo é constituído por três

massas m e duas caixas-de-ar com uma espessura total $(d_1 + d_2)$ igual a d .

A frequência de ressonância do conjunto é dada pela seguinte expressão (Mateus e Tadeu 1999):

$$(m_1 m_2 m_3)(f_{\text{ress}})^2 - [K_1 m_3(m_1 + m_2) + K_2 m_1(m_2 + m_3)]f_{\text{ress}}^2 + [K_1 K_2(m_1 + m_2 + m_3)] = 0 \quad (\text{A1.3.14})$$

Com:

$$K_1 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_1}; \quad (\text{A1.3.15})$$

$$K_2 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_2}. \quad (\text{A1.3.16})$$

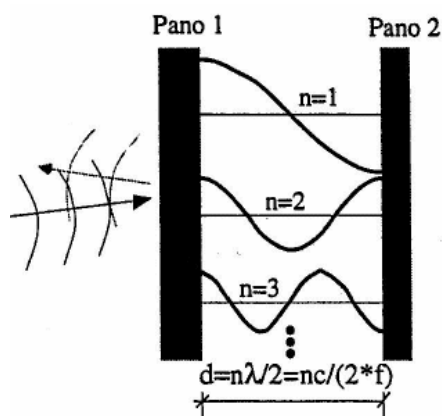


Figura A1.3.2. Frequências de ressonância numa caixa-de-ar (Mateus e Tadeu 1999)

À semelhança dos elementos duplos, também neste caso é possível considerar uma velocidade de propagação, resultante da incidência do som nos painéis com diferentes ângulos (campo difuso), de 1.4 vezes a velocidade do som. Nestas condições, as frequências de ressonância do conjunto obtidas pela equação anterior deverão ser multiplicadas por 1.4.

d) Quebra nas lâminas de ar das divisórias múltiplas

Nos elementos duplos e triplos, para além das quebras de ressonância por movimento conjunto do sistema, verificam-se outras quebras, devidas às reflexões múltiplas no interior da caixa-de-ar. Este fenómeno acontece quando a espessura da(s) caixa(s)-de-ar é igual a um valor múltiplo da metade do comprimento de onda ($n \cdot \lambda/2$). A onda é reflectida combinando-se positivamente com as ondas que aí chegam, como se mostra na Figura A1.3.2 (Mateus e Tadeu 1999). Nestas condições, para frequências de som incidentes iguais a $n \cdot c/(2 \cdot d)$, criam-se interferências entre as ondas incidentes e as ondas reflectidas no pano 2, aumentando assim a pressão sonora no interior da caixa de ar. A este fenómeno de ampliação do som é geralmente dado o nome de ressonância da caixa-de-ar (Mateus e Tadeu 1999). As frequências de ressonância da caixa-de-ar são assim dadas por:

$$f_1 = \frac{c}{2d}, f_2 = 2 \frac{c}{2d}, \dots, f_n = n \frac{c}{2d} \quad (\text{A1.3.17})$$

Com:

c : velocidade do som no ar ao nível do mar = 340 [m/s];

d : espessura da caixa-de-ar [m];

n : número natural (que pode tomar valores de 1,2,3,...,n).

Estas quebras atingem maiores valores na primeira frequência e tendem a decrescer nas frequências seguintes. A sua amplitude pode variar, dependendo sobretudo da absorção existente na caixa-de-ar, pela utilização de um material absorvente que permite melhorar as suas deficiências zona da frequência de ressonância. No caso dos envidraçados correntes, não é possível colocar um material absorvente, devido à sua não transparência, pelo que nestes casos as quebras podem atingir valores máximos, próximos de 3 a 4dB (Mateus e Tadeu 1999). No entanto, se a caixa-de-ar for

totalmente preenchida com um gel transparente, este efeito é praticamente anulado. Outra solução possível, apesar de menos eficaz, é a utilização de materiais absorventes em todo o perímetro da caixa-de-ar, sendo esta solução mais eficaz no caso de vidros duplos não paralelos. Qualquer uma destas soluções é economicamente pouco viável, pois sendo de difícil execução, não estão vulgarmente disponíveis no mercado, não se adaptando por isso a utilizações comuns na construção de habitação.

No caso de paredes de alvenaria e outras situações comuns poderá admitir-se um valor de **2dB** para a primeira quebra.

A1.3.1.3. Representação gráfica do Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução aérea normalizado, ponderado

a) Elementos construtivos simples:

Para a determinação do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, ponderado de um elemento simples através do método misto, é traçada uma curva (f , R – frequência, atenuação sonora) tendo em conta a massa da parede, a sua rigidez e as perdas internas.

O traçado da curva é feito do seguinte modo, tal como se pode ver no exemplo da Figura A1.3.3:

1. Determinar o índice de atenuação dado pela lei experimental da massa (a 500Hz);
2. Traçar a recta de declive de 4dB por oitava correspondente à lei da frequência experimental;
3. Determinar e representar as perdas internas do material na respectiva frequência crítica;
4. A partir do ponto correspondente ao isolamento na frequência crítica é traçada uma curva de isolamento de 10dB/oit, do ponto de cruzamento desta com a curva lei experimental da frequência é traçado um novo troço, com 6dB/oit de inclinação;
5. A partir dos 100Hz, ou ligeiramente acima das primeiras frequências de ressonância, caso estas se localizem próximo ou acima dos 100Hz, traça-se o primeiro troço com uma inclinação de 6dB/oit.

A marcação das quebras nas Frequências críticas e de ressonância são sempre realizadas a partir da curva da lei da frequência (com 4dB/oit.).

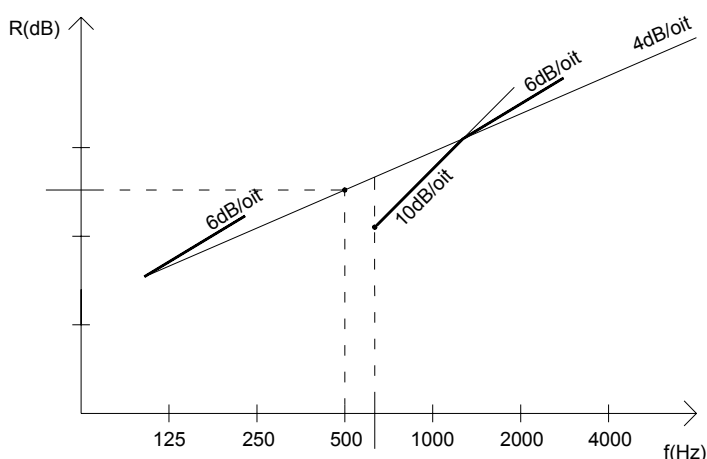


Figura A1.3.3. Marcação das inclinações na Curva de atenuação sonora de Paredes Simples

b) Elementos construtivos duplos

Nos panos dos elementos duplos, devem utilizar-se materiais de massa e rigidez diferentes, de modo a que estes não tenham a mesma frequência crítica e as quebras localizadas não coincidam, sendo assim inferiores às dos elementos com massas iguais.

A determinação do $D_{n,w}$ de um elemento construtivo duplo através do método misto é feita do seguinte modo, como se pode ver no exemplo da Figura A1.3.4:

1. Determinar o índice de atenuação dado pela lei experimental da massa (a 500Hz);
2. Adicionar o eventual acréscimo de isolamento referente à diferença de isolamento para um elemento simples com a mesma massa (Dif). Este valor depende da espessura da caixa-de-ar e da existência, ou não, de um material absorvente no seu interior, bem como do tipo de panos utilizados;
3. Traçar a recta de declive de 6 dB por oitava correspondente à lei da frequência experimental;
4. Se os elementos componentes das paredes, lajes ou envidraçados, forem de espessura reduzida, considerar os modos próprios de vibração por flexão transversal do painel, se este se encontrar simplesmente apoiado nos quatro lados;
5. Determinar a frequência de ressonância do conjunto massa / caixa-de-ar e marcar a respectiva perda, se esta se encontrar dentro da gama de frequências com interesse para a acústica arquitectónica. Em soluções construtivas pesadas esta frequência é normalmente inferior a 100Hz, pelo que poderá ser desprezada. Para envidraçados duplos correntes, que possuem painéis com massas baixas e caixas-de-ar pequenas, a frequência de ressonância do conjunto massa – caixa-de-ar situa-se acima dos 100Hz, provocando uma quebra entre 6 a 8dB;
6. Determinar e representar as frequências críticas dos panos de parede, laje ou envidraçado considerando as respectivas perdas de isolamento características para cada material;
7. Determinar e representar as frequências de ressonância da caixa-de-ar, considerando as perdas de isolamento respectivas;

8. Traçar a curva do índice de atenuação sonora. A partir dos pontos correspondentes às quebras de isolamento na frequência crítica, na frequência de ressonância do conjunto massa / caixa-de-ar e nas frequências de ressonância da caixa-de-ar, é traçada uma curva de isolamento de 10dB por oitava até encontrar a curva da lei experimental da frequência. A partir dos pontos de cruzamento é traçado um novo troço de 8dB de inclinação, tal como mostra a Figura 6.4.23;
9. A partir dos 100Hz, ou ligeiramente acima das primeiras frequências de ressonância, caso estas se localizem próximo ou acima dos 100Hz, traça-se o primeiro troço com uma inclinação de 8dB por oitava.

A marcação das quebras nas Frequências críticas e de ressonância são sempre realizadas a partir da curva da lei da frequência (com 6dB/oit).

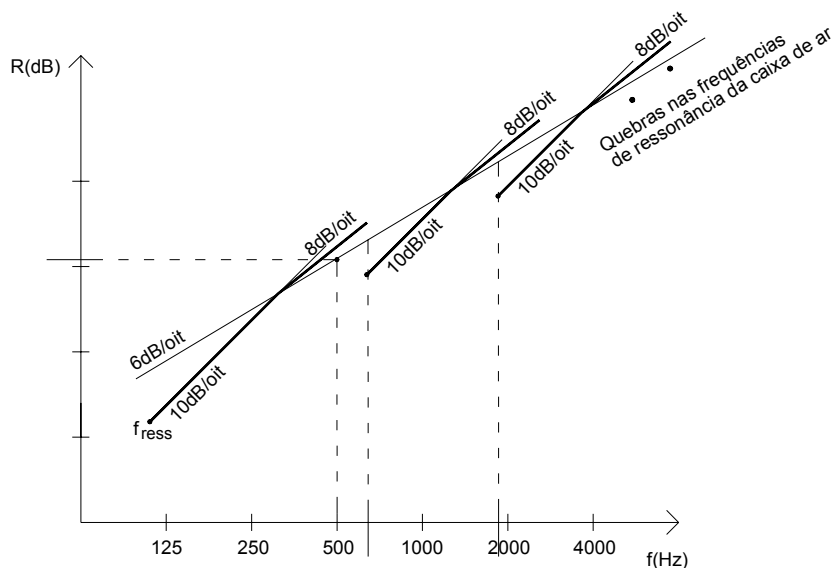


Figura A1.3.4. Marcação das inclinações na Curva de isolamento sonoro de Paredes Duplas

c) Elementos construtivos triplos

Nos elementos triplos, tal como nos elementos duplos, devem utilizar-se, de preferência, materiais de massa e rigidez diferentes, de modo a que os diversos painéis não tenham a mesma frequência crítica.

A determinação do $D_{n,w}$ de um elemento construtivo triplo através do método misto é feita do seguinte modo, como se pode ver no exemplo da Figura A1.3.5:

1. Determinar o índice de atenuação sonora dado pela lei experimental da massa (a 500Hz);
2. Adicionar o eventual acréscimo de isolamento referente à diferença de isolamento para um elemento simples com a mesma massa (Dif.). Este valor depende da espessura das caixas-de-ar e da existência, ou não, de material absorvente no seu interior, bem como do tipo de painéis utilizados;

3. Traçar a recta de declive de 10dB/oit correspondente à lei da frequência experimental;
4. Se os elementos componentes das paredes, lajes ou envidraçados, forem de espessura reduzida, considerar os modos próprios de vibração por flexão transversal do painel, se este se encontrar simplesmente apoiado nos quatro lados;
5. Determinar as frequências de ressonância do conjunto massa / caixa-de-ar e marcar a respectiva perda se esta se encontrar dentro da gama de frequências com interesse para a acústica arquitectónica. Em soluções construtivas pesadas esta frequência é normalmente inferior a 100Hz, pelo que poderá ser desprezada. Para envidraçados triplos, como possuem painéis com massas reduzidas e caixas-de-ar pequenas, a frequência de ressonância do conjunto massa / caixa-de-ar situa-se acima dos 100Hz, provocando quebras entre 6 a 8dB;
6. Determinar e representar as frequências críticas dos panos de parede, laje ou envidraçado considerando as respectivas perdas de isolamento características para cada material;
7. Determinar e representar as frequências de ressonância das caixas-de-ar, considerando as perdas de isolamento respectivas;
8. Traçar a curva do índice de atenuação sonora. A partir do ponto correspondente ao isolamento na frequência crítica na frequência de ressonância do conjunto massa / caixa-de-ar e nas frequências de ressonância da caixa-de-ar, é traçada uma curva de isolamento de 14dB/oit até encontrar a curva da lei experimental da frequência. A partir deste ponto é traçado um novo troço de 12dB/oit de inclinação;
9. A partir dos 100Hz, ou ligeiramente acima das primeiras frequências de ressonância, caso estas se localizem próximo ou acima dos 100Hz, traça-se o primeiro troço com uma inclinação de 12dB/oit.

As marcações das quebras nas Frequências críticas e de ressonância são sempre realizadas a partir da Curva da lei da frequência (com 10dB/oit.).

Na Figura A1.3.5 representa-se a evolução em frequência das curvas de atenuação sonora com as respectivas quebras, devidas às correcções referidas, para elementos simples, duplos e triplos.

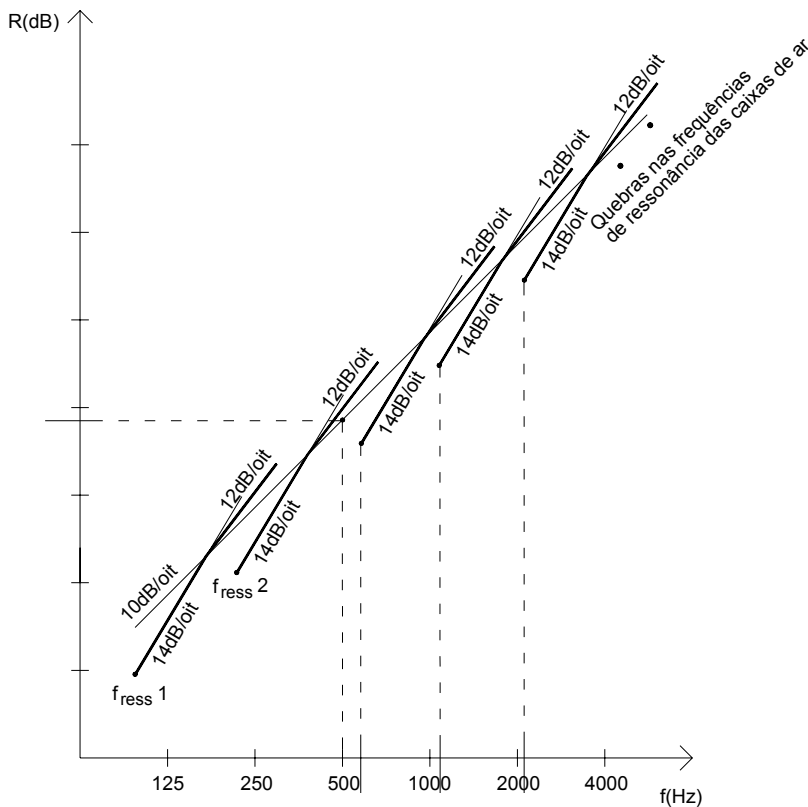


Figura A1.3.5. Marcação das inclinações na Curva de isolamento sonoro de Paredes Triplas

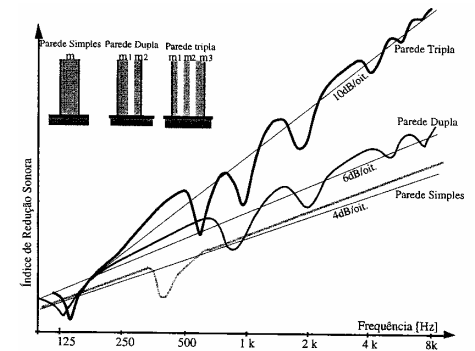


Figura A1.3.6. Aspecto final das Curvas de atenuação sonora (Mateus e Tadeu 1999)

Em qualquer dos casos referidos anteriormente (paredes simples, duplas ou triplas) os valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, ponderado $D_{n,w}$, deverão ser obtidos através da comparação das curvas estimadas descritas anteriormente ($f - R$), com uma curva convencional de referência que se apresenta na Figura A1.3.7. Para isso sobre põe-se a curva de referência à curva dos valores estimados, considerando que o desvio desfavorável para uma determinada banda de frequência ocorre quando o valor estimado é inferior ao de referência. Os valores de R devem ser incrementados em intervalos de 1 dB.

Na comparação das duas curvas deve ser satisfeita a seguinte condição, segundo a Norma ISO 717-1, o somatório dos desvios desfavoráveis deve ser inferior a 32dB e ser o mais próximo possível de 32dB para gama estimada em terços de oitava e inferior a 10dB e ser o mais próximo possível de 10dB para gama estimada em oitavas.

Conseguido este ajustamento, o $D_{n,w}$ é dado pelo valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500Hz.

| f [Hz] | Oitava [dB] |
|--------|-------------|
| 125 | R |
| 250 | R+7 |
| 500 | R+13 |
| 1000 | R+16 |
| 2000 | R+17 |

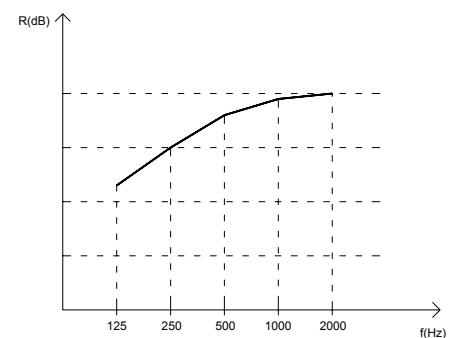


Figura A1.3.7. Curva de referência para os valores estimados em frequências de oitava para a obtenção do Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea

A1.3.2. Traçado da Curva de Isolamento sonoro a Sons de Condução Aérea em elementos heterogéneos

A estimativa do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea dum elemento de separação heterogéneo, composto por elementos simples ou múltiplos que apresentem diferentes características de isolamento sonoro ao longo do seu

desenvolvimento em superfície, como é o caso das paredes exteriores, constituído por portas e janelas, pode fazer-se utilizando a seguinte metodologia (Mateus e Tadeu 1999):

Se se considerar uma parede de área A , composta por uma superfície 1, de área A_1 com coeficiente de transmissão τ_1 , e por uma superfície 2, de área A_2 com coeficiente de transmissão τ_2 , a potência sonora transmitida por cada elemento pode ser calculado pelas expressões:

$$W_{t1} = \frac{W_i}{A} A_1 \tau_1 \quad (\text{A1.3.18})$$

e

$$W_{t2} = \frac{W_i}{A} A_2 \tau_2 \quad (\text{A1.3.19})$$

Onde;

W_i – potência sonora incidente

Nestas condições a potência sonora total transmitida pela parede é dada pela soma das duas transmissões, ou seja:

$$W_t = \frac{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2}{A} W_i \quad (\text{A1.3.20})$$

Deste modo, pode definir-se um coeficiente global de transmissão sonora, que será dado por:

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} = \frac{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2}{A} \quad (\text{A1.3.21})$$

O índice de isolamento Sonoro (R), para uma dada frequência ou banda de frequências, pode então ser calculado por:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{A}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2} \quad (\text{A1.3.22})$$

Se a parede for constituída por n elementos de áreas $A_1, A_2, \dots; A_i, \dots, A_n$, e por coeficientes de transmissão, respectivamente, de $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$, a equação de isolamento sonoro, para uma dada frequência ou banda de frequências, transforma-se na expressão:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \left(\frac{\sum_1^n A_i}{\sum_1^n A_i \tau_i} \right) \quad (\text{A1.3.23})$$

Ou ainda na expressão:

$$R = 10 \log \left(\frac{\sum_1^n A_i}{\sum_1^n \frac{A_i}{10^{(R_i/10)}}} \right) \quad (\text{A1.3.24})$$

Onde R representa o índice de isolamento sonoro do elemento i , para uma dada frequência ou banda de frequências.

Uma outra forma de calcular o índice de isolamento sonoro de um elemento de separação descontínuo, composto de elementos simples ou múltiplos que apresentem diferentes características de isolamento sonoro ao longo do seu desenvolvimento em superfície, pode fazer-se através do ábaco da Figura 6.4.27 (Martins da Silva 1978).

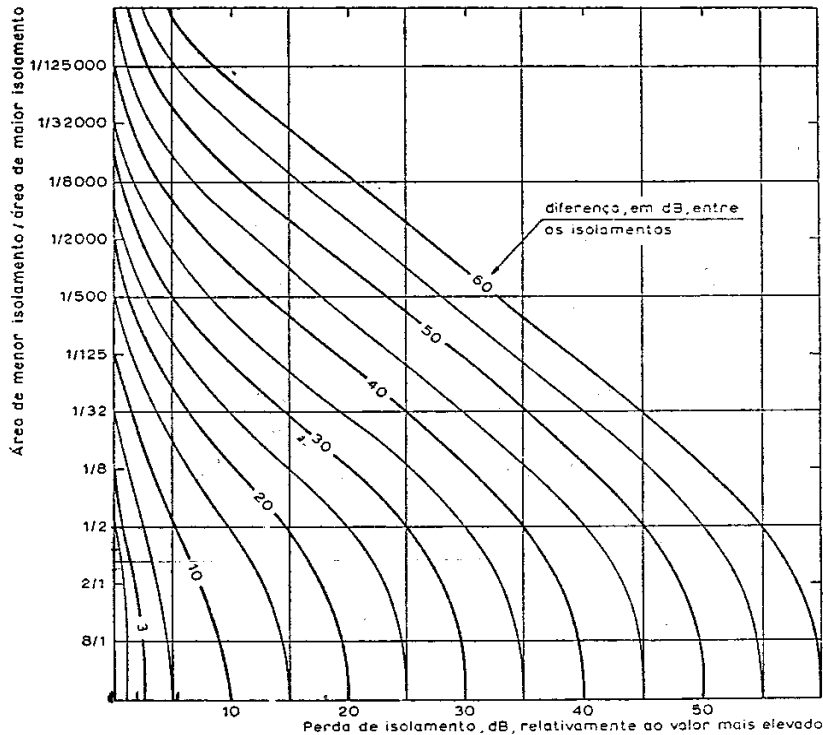


Figura A1.3.8. Ábaco para determinar as perdas de isolamento pela existência de elementos com diferentes atenuações (Martins da Silva 1978)

A1.3.3. Transmissão marginal

Relativamente aos sons de condução aérea, a transmissão marginal pode ser estimada com base no disposto na Norma EN 12354-3, sendo apresentado seguidamente um resumo da metodologia aí referida

Relativamente aos sons de condução aérea, a transmissão marginal pode ser estimada com base no disposto na Norma EN 12354-3, através da seguinte expressão:

$$D_{2m,n,w} = R_w + 10 \log \left(\frac{A_0}{S} \right) - TM \quad (A1.3.25)$$

Com;

R_w : Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea medido em ensaios laboratoriais;

$10 \log \left(\frac{A_0}{S} \right)$: Influência da superfície de interesse do elemento de compartimentação;

TM: Transmissão marginal

O Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado, de fachadas, $D_{2m,n,w}$, além de depender do Isolamento sonoro a sons de condução aérea medido em obra R_w , também depende da forma das projecções dadas por balcões ou varandas. A influência de balcões ou varandas no

$D_{2m,n,w}$ tanto pode ser positiva ou negativa, sendo quantificada por meio de um termo correctivo que contabiliza a forma da fachada, ΔL_{fs} , definida como a diferença entre o nível de pressão sonora medido a 2m da fachada adicionado de 3dB e o nível de pressão sonora medida na superfície externa da fachada. Esta expressão destina-se a avaliar qual a contribuição da transmissão marginal a partir de valores medidos em obra:

$$D_{2m,n,w} = R'_w - 10\text{Log}(S / A_0) + \Delta L_{fs} \quad (\text{A1.3.26})$$

$$D_{2m,nT,w} = R'_w - 10\text{Log}(T / T_0) + \Delta L_{fs} \quad (\text{A1.3.27})$$

Onde:

ΔL_{fs} : diferença do nível externo devido à fachada, dada pela seguinte expressão:

$$\Delta L_{fs} = (L_{1,2m} - L_{1,2S} + 3) \quad (\text{A1.3.28})$$

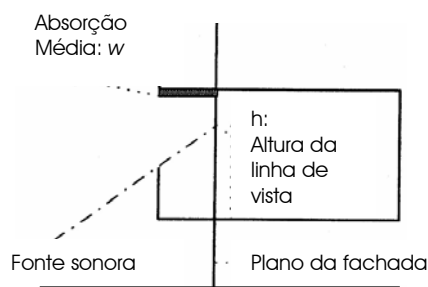


Figura A1.3.9. Obtenção do índice de avaliação da transmissão marginal

Os valores de ΔL_{fs} podem ser retirados da Tabela A1.3.5, em função da altura de linha de vista (h) que se determina em função da intersecção da onda sonora incidente entre o emissor e o receptor e o plano vertical do receptor, tal como se mostra na Figura A1.3.9.

Os valores de ΔL_{fs} são também dados em função da absorção média (w) dos planos horizontais projectados sobre o plano vertical da fachada. O valor de w refere-se ao índice de absorção sonora como definido na norma ISO 11654 e sempre que não existam planos horizontais sobre a fachada o valor de w é nulo. O valor de w corresponde ao valor máximo ($\geq 0,9$) para planos horizontais muito reflectantes (por exemplo palas fechadas com acabamento liso), enquanto que com planos horizontais pouco reflectores o valor mínimo ($\leq 0,3$) corresponde a planos horizontais pouco reflectores (por exemplo sombreadores de lâminas). O valor intermédio é de 0,6, correspondente ao intervalo de absorção média compreendido entre 0,3 e 0,6.

Ao ser sido assumido que em todas as situações o campo sonoro difuso, é provável que exista uma pequena diferença entre a estimativa e as medidas "in-situ". Assim, a média dessa diferença foi calculada e considerada na expressão utilizada para calcular o índice de isolamento sonoro normalizado das fachadas

A transmissão marginal é apenas contabilizada nos ensaios de caracterização acústica "in-situ", pois nos ensaios em laboratório esta transmissão não é contabilizada. Como tal é necessário utilizar métodos pragmáticos de estimativa da transmissão marginal, de forma a possibilitar uma aproximação entre os valores calculados em laboratório e os obtidos "in-situ".

Tabela A1.3.5. Obtenção do índice de avaliação da transmissão marginal em fachadas

| | Fachada Plana | Varanda | | | Varanda | | | Varanda | | | Varanda | | |
|-------------------------|---------------|---------------|-----|-----|---------|-----|-----|---------|-----|-----|---------------|---------------|---------------|
| | | | | | | | | | | | | | |
| w | Não se aplica | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 |
| $h < 1,5\text{m}$ | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | Não se aplica | Não se aplica | Não se aplica |
| $1,5 < h < 2,5\text{m}$ | 0 | Não se aplica | | | -1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 3 | Não se aplica | | |
| $h > 2,5\text{m}$ | 0 | Não se aplica | | | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 6 |

| | Varanda | | | Varanda | | | Varanda | | | Terraço | | | | | |
|-------------------------|---------|-----|-----|---------|-----|-----|---------|-----|-----|------------------|-----|-----|-------------------|-----|-----|
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Parapeito Aberto | | | Parapeito Fechado | | |
| w | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 |
| $h < 1,5\text{m}$ | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| $1,5 < h < 2,5\text{m}$ | -1 | 1 | 3 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 |
| $h > 2,5\text{m}$ | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 |

1º Critério para o cálculo da transmissão marginal

O cálculo da transmissão marginal está dividido em três categorias:

- Para valores do índice de isolamento a sons aéreos com $R_w \leq 35\text{dB}$ a contribuição da transmissão marginal é desprezável, ficando $R'_w = R_w$;
- Para valores do índice de isolamento a sons aéreos que observem a condição em que $35 < R_w \leq 45\text{dB}$ a contribuição da transmissão marginal traduz-se na redução do índice de isolamento sonoro de 3dB, ou seja $R'_w = R_w - 3$;
- Para valores do índice de isolamento a sons aéreos com $R_w > 45\text{dB}$ a contribuição da transmissão marginal pode ter uma influência muito significativa na redução do índice em causa, não sendo assim fácil a previsão de R'_w .

2º Critério para o cálculo da transmissão marginal

- Quando a massa superficial do elemento de separação é igual à do elemento adjacente, a transmissão directa é igual à transmissão por via indirecta, implicando que o índice de isolamento sonoro decresça em média 3dB, ou seja $R'_w = R_w - 3$;
- Quando a massa superficial do elemento de separação é muito menor do que a do elemento adjacente, a propagação da energia sonora ocorre fundamentalmente pelo elemento de separação, o que originará uma influência no isolamento sonoro determinado, devido à transmissão marginal, praticamente desprezável, ficando $R_w = R'_w$;
- Por último, quando a massa superficial do elemento de separação é muito maior do que a do elemento adjacente, a energia sonora propaga-se quase na sua totalidade por esse elemento, diminuindo a eficácia do sistema de compartimentação principal.

O índice de isolamento sonoro global corresponde aos diferentes encaminhamentos considerados, ou seja, de forma a poder

contabilizar todos os encaminhamentos, com base nos valores dos índices de redução sonora parciais R_{ij} , utiliza-se a seguinte expressão:

$$R'_w = -10 \log \left[10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right] \quad (A1.3.29)$$

Os índices R_{ij} , expressos em decibel, relativos aos encaminhamentos de propagação de energia sonora por via marginal, podem ser determinados com base nas seguintes expressões:

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (A1.3.30)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (A1.3.31)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (A1.3.32)$$

Em que:

$R_{F,w}$: índice de redução sonora do elemento marginal F, no compartimento emissor, em dB;

$R_{f,w}$: índice de redução sonora do elemento marginal f, no compartimento emissor, em dB;

$\Delta R_{Ff,w}$: acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de um revestimento adicional, colocado nos elementos marginais do espaço emissor e/ou receptor, em dB;

$\Delta R_{Fd,w}$: acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento marginal do espaço emissor e/ou no elemento de separação, no lado do espaço receptor, em dB;

$\Delta R_{Df,w}$: acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento de separação no lado do espaço emissor e/ou no elemento marginal do espaço receptor, em dB;

K_{Ff} : índice de redução de transmissão de vibrações (i.e. energia sonora) pelo encaminhamento Ff, em dB;

K_{Fd} : índice de redução de transmissão de vibrações (i.e. energia sonora) pelo encaminhamento Fd, em dB;

K_{Df} : índice de redução de transmissão de vibrações (i.e. energia sonora) pelo encaminhamento Df, em dB;

S_s : Superfície do elemento de separação, em m²;

l_f : comprimento da linha de junção entre o elemento de separação e os elementos marginais F e f, em metros;

l_0 : comprimento da linha de junção de referência ($l_0 = 1$ m).

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (A1.3.33)$$

Em que:

$R_{s,w}$ – índice de redução sonora do elemento de separação, determinado em laboratório, em dB;

$\Delta R_{Dd,w}$ – acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento de separação do espaço emissor e/ou receptor, em dB.

A1.3.4. Valores estimados de $D_{n,w}$ para as soluções de parede estudadas

Tabela A1.3.6 apresenta-se um resumo dos valores estimados de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, ponderado ($D_{n,w}$) de diversas soluções de parede calculados segundo a metodologia descrita anteriormente. As representações esquemáticas das soluções avaliadas apresentam-se no Anexo 2.

Tabela A1.3.6. Níveis de Isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado, ponderado, previsto, de alguns elementos construtivos ($D_{n,w}$)

| Elemento | Designação | Constituição | Isolamento Sonoro a Sons Aéreos $D_{n,w}$ [dB(A)] |
|-------------------------------|-------------|----------------------------------|---|
| Paredes Simples s/ Isolamento | PS1.1/15 | A15+R2 | 55 |
| | PS1.1/20 | A20+R2 | 57 |
| | PS1.1/40 | A40+R2 | 62 |
| | PS2.1/11 | M11 | 46 |
| | PS3.1/15 | H0.5+B15+H0.5 | 48 |
| | PS3.1/40 | R0.5+B40+H0.5 | 56 |
| | PS4.1/15 | C15 | 54 |
| | PS4.1/20 | C20 | 57 |
| | PS5.1/11 | R2+T11+R2 | 46 |
| | PS5.1/15 | R2+T15+R2 | 46 |
| Paredes Simples c/ Isol. Int. | PS5.1/22 | R2+T22+R2 | 55 |
| | PS1.2/40 | A40+L5+G1.3 | 66 |
| | PS2.2/11 | M11+L5+G1.3 | 48 |
| | PS4.2/20 | C20+L5+G1.3 | 61 |
| Paredes Simples c/ Isol. Ext. | PS1.3/20 | R2+X5+A20+R2 | 57 |
| | PS3.3/15 | R2+ X5+B15+H0.5 | 50 |
| | PS3.3/20 | R2+ X5+B20+H0.5 | 52 |
| | PS4.3/20 | R2+X5+C20+R2 | 56 |
| | PS5.3/22 | R2+X5+T22+R2 | 53 |
| Paredes Duplas | PD1.1/11+11 | R2+T11+J5+T11+R2 | 51 |
| | PD2.1/11 | M11+J5+T11+R2 | 51 |
| | PD3.1 | M11+J5+C20+R2 | 55 |
| | PD1.2/11+11 | R2+T11+J5+XP4+T11+R2 | 52 |
| | PD1.2/15+11 | R2+T15+J5+XP4+T11+R2 | 51 |
| | PD2.2/11 | M11+J5+XP4+T11+R2 | 52 |
| | PD3.1 | M11+J5+XP4+C15+R2 | 53 |
| | PD5.2 | A12+J5+XP4+T11+R2 | 52 |
| | PMD2.1 | V1.2+J5+N5+B15+H0.5 | 53 |
| | PMD4 | E3+J5+XP4+C20+R2 | 53 |
| Paredes Triplas | PT2 | AB0.5+J9.5+R2+T15+J5+XP4+T11+R2 | 44 |
| | PT(L)3 | V1.2+J9.5+V1.9+N8+F2+J0.5+2xG1.3 | 50 |
| Lajes de Pavimento | LP1 | D1.2+P0.5+V1.9+F2+N16+V1.2 | 52 |
| | LP2 | D1.2+P0.5+C4+Y16+S1.6 | 50 |
| | LP3 | D1.2+P0.5+C4+Z26+S1.6 | 49 |
| | LC1 | N8+V1.2+J15+Y16+S1.6 | 53 |
| | LC2 | N8+V1.2 | 42 |
| | LC3 | C4+Z20+S1.5 | 48 |

Nota: Na constituição de cada parede os números correspondem à espessura em cm e as letras ao material. Os materiais utilizados são os indicados na legenda seguinte:

| | | | | | |
|---|----------------------|---|-----------------------------|----|----------------------------------|
| A | Alvenaria de Granito | J | Lâmina de ar | V | Aglomerado de Madeira/Cimento |
| B | Alvenaria de Adobe | L | Lã de Rocha | W | Barrotes de Madeira |
| C | Betão Armado | M | Tijolo Maciço | X | Poliestireno Expandido Extrudido |
| D | Pavimento Flutuante | N | Aglomerado Negro de Cortiça | Y | Laje Alveolar |
| E | Placas de Pedra | P | Poliétileno Reticulado | Z | Laje Aligeirada |
| F | Fibra de Coco | R | Reboco | AB | Vidro |
| G | Gesso Cartonado | S | Estuque | AC | Betão Cavernoso |
| H | Cal | T | Tijolo Furado | AD | Blocos de Betão |