

SISTEMAS DE FACHADA

Neste Capítulo faz-se a apresentação dos diversos sistemas de fachada, com uma maior incidência nas implicações energéticas dos mesmos. Para isso é feita uma classificação das fachadas com base no peso próprio*. As questões higrotérmicas são mais detalhadamente desenvolvidas, nomeadamente pela influência da posição das diversas camadas e tipos de materiais na sua composição. O que se pretende concluir em termos de redução do impacto ambiental é que os materiais leves podem ser utilizados com vantagens na camada superficial de revestimento da envolvente exterior e os materiais pesados preferentemente no interior, pelo contributo que dessa forma podem ter em termos de regulação térmica.

* O critério adoptado neste estudo para classificar uma envolvente de fachada exterior como pesada ou leve é o de ter um peso próprio superior ou inferior a 150kg/m^2 , respectivamente. Poderia ter-se introduzido uma classificação intermédia, para o intervalo entre 150 e 300kg/m^2 , que levaria ao termo de parede de peso médio, mas este conceito poderia levar a alguma confusão, daí que se optou apenas por distinguir entre paredes pesadas, paredes leves e paredes onde se misturam paramentos pesados e leves a que se optou por chamar de paredes de peso misto (PM - Paredes Mistas). Por outro lado, considerou-se que paredes exteriores com pesos muito superiores a 300kg/m^2 , não carecem de sentido em construções contemporâneas, excepto em situações de reabilitação, sendo essa a razão porque foram igualmente estudadas.

4.1. A envolvente exterior opaca pesada

Far-se-á a distinção entre duas classes de paredes exteriores pesadas, que correspondem a uma evolução histórica dos sistemas construtivos:

- **Paredes simples:** tipo de parede mais comum na construção em Portugal até há cerca de 50 anos, antes da introdução das caixas-de-ar e dos materiais de isolamento. Com a introdução de materiais de isolamento tornou-se possível melhorar bastante as propriedades térmicas e acústicas destas paredes. A posição ideal para a sua colocação, sob o ponto de vista térmico, é pelo exterior da parede, o que nem sempre é viável em reabilitação. A colocação de isolamento pelo interior torna-se inevitável na maior parte dos casos de reabilitação, mas deverá sempre que possível ser evitada em construção nova, já que desta forma se perde a capacidade de armazenamento térmico da parede. Em determinadas situações de reabilitação será mesmo preferível dispensar o isolamento, pois as vantagens da massa térmica poderão ser superiores ao incremento do isolamento térmico;
- **Paredes multi-camadas:** são as paredes mais comuns na construção em Portugal, actualmente, com predominância para as paredes duplas de alvenaria de tijolo furado com caixa-de-ar parcialmente preenchida com materiais de isolamento térmico, nas quais se contabiliza apenas a parede interior como massa térmica efectiva. Uma solução bastante comum é a de parede de alvenaria interior de tijolo furado associada a uma parede exterior pesada de material face-à-vista, como tijolo maciço, perfurado ou pedra.

Os materiais de construção pesados utilizados em paredes são produzidos em diversas dimensões e formas, no entanto, até há cerca de 50 anos, pela falta de maquinaria pesada, estas dimensões estavam limitadas à capacidade que os trabalhadores tinham em transportar e manusear estes na obra. Por exemplo um bloco é usualmente definido como uma unidade que pode ser manuseada com as duas mãos, enquanto um tijolo pode ser manuseado apenas com uma. Durante os últimos anos, com a introdução de gruas e outros equipamentos mecânicos, uma nova categoria de elementos pesados começou a ser utilizada, os elementos de fachada pré-fabricados. Também nas pedras se torna hoje mais fácil utilizar placagens de grandes dimensões, pelo que os sistemas de fachada não têm actualmente grandes limitações construtivas, pelo menos em obras de grande dimensão.

4.1.1. Paredes simples pesadas

As paredes simples pesadas, normalmente desempenhando um papel estrutural, são características de todas as construções de habitação até meados do século XX. Apesar de já praticamente não se construir com paredes simples, excepto em zonas não habitáveis dos edifícios, também foram consideradas neste estudo, porque a reabilitação de muitos edifícios passa por estas soluções e também se pretende comparar com as novas paredes multi-

camadas, de forma a avaliar se aquelas perderam efectivamente qualquer pertinência sob todos os pontos de vista energéticos.

4.1.1.1. A pedra estrutural

A pedra utilizou-se e ainda se utiliza em construção de diversas formas:

- Como elemento resistente em paredes;
- Como elemento resistente em coberturas;
- Como elemento de revestimento (geralmente em paredes e pavimentos);
- Como matéria-prima para o fabrico de outros materiais de construção (cerâmica, vidro, aglutinantes – cal, gesso, cimento, inertes – argamassas e betões, isolamentos térmicos, eléctricos, etc.

A utilização estrutural de pedra em paredes (essencialmente em fachadas exteriores) é a que diz respeito a esta secção. O corte esquemático mais característico duma parede resistente em alvenaria de pedra foi apresentada no Capítulo III, Figura 3.4.6. A grande espessura, geralmente superior a 40cm, está ligada, não apenas ao facto destas paredes serem resistentes, mas também à necessidade de fornecerem uma suficiente capacidade de isolamento térmico e acústico, bem como disporem de massa térmica. Denotando já algumas preocupações térmicas e de impermeabilização, nas paredes de pedra seca de construção tradicional portuguesa, principalmente no Norte do País, era utilizada palha a seco para vedar as juntas, impedindo a passagem de ar frio ou água através destas.

A introdução de isolamento nas construções, levou a que a recuperação de habitações, com paredes simples em pedra, fosse feita com introdução de isolamento pelo interior, como se pode ver no exemplo da Figura 4.1.1.a). Tal solução aumenta a resistência térmica da parede, mas limita drasticamente a sua massa térmica superficial útil, pelo que constitui uma solução muito desfavorável do ponto de vista do desempenho térmico. Por outro lado, a colocação de isolamento pelo exterior, Figura 4.1.1.b) impede a manutenção da pedra à vista e é uma solução difícil de implantar em construções antigas, já que vai aumentar o seu perímetro exterior, sobrepondo-se por exemplo aos edifícios contíguos, quando estes são alinhados, ou às cantarias que orlam em muitos casos as fenestranças.

Uma outra hipótese que se pode sugerir é a utilização de vidro ou um plástico transparente pelo exterior em soluções de parede de pedra maciça, exemplo da Figura 4.1.1.c). Esta solução, do tipo paredes de Trombe, está limitada a construções novas e é viável apenas para paredes orientadas a Sul, ou fachadas convenientemente sombreadas, e permite otimizar os ganhos térmicos e a inércia térmica. Mas neste caso saímos do âmbito das paredes simples para as paredes duplas mistas, pelo que se irá aprofundar esta solução noutra secção.

A pedra como material de construção tem origens muito remotas e esteve associada à construção de diversos tipos de edifícios, mas

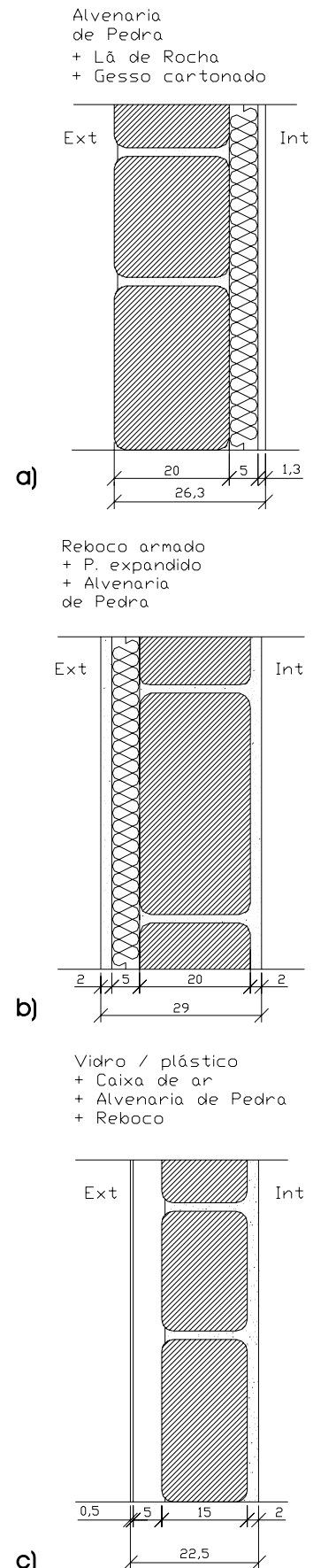


Figura 4.1.1. Soluções de reabilitação higrótérmica de paredes simples de pedra: a) isolamento interior; b) isolamento exterior; c) parede de Trombe

essencialmente aos mais representativos, desde os dólmene e antas da pré-história até às catedrais da Idade Média.

“As primeiras construções de pedra prescindem da funcionalidade habitável, para assumir funções principalmente rituais e religiosas” (Fernandez 1996). Nestas primeiras obras de pedra o sistema construtivo simples baseava-se no princípio de pórtico, com os elementos verticais a trabalhar à compressão e os horizontais de cobertura à flexão. Nos dólmene, como no exemplo da Figura 3.3.8 do Capítulo III, a sobreposição duma grande pedra horizontal sobre pedras verticais para formar um abrigo, tornava necessário lapidar as superfícies de contacto das pedras. O uso da pedra assim talhada, como recurso para cobrir um espaço, determina por si mesmo a dimensão e distancia entre os pilares ou colunas das salas hipóstilas da arquitectura egípcia. Com a redução do diâmetro das peças verticais consegue-se, com a mesma dimensão da peça horizontal, incrementar a distância entre os apoios. Nas construções micénicas, colocam-se peças entre os pilares e o elemento horizontal, o que forma um pseudo-arco.

A capacidade de cortar a pedra e a utilização de grampos metálicos permite um duplo desenvolvimento tecnológico: por um lado, a execução de estruturas de parede com blocos de pedra resistente talhada e, por outro, placas de pequena espessura. A placagem permite que se acabem os edifícios com uma pedra de qualidade superior mas de menor resistência, como o mármore. A arquitectura grega é a que melhor representa na antiguidade esta técnica construtiva. Assim se desenvolveram alvenarias perfeitamente talhadas, para evitar a utilização de argamassa e unindo-se entre si com grampos metálicos.

Os romanos começam a utilizar menos a pedra e a substituí-la construtivamente pelo tijolo ou a utilizá-la com um aparelho mais pobre, assente com argamassa de cal. O revestimento exterior, em pedra regular e de qualidade, era fixo à parede de suporte por argamassa e grampos metálicos. Na época augusta, ou em zonas onde a pedra disponível tinha mais qualidade, continuava a utilizar-se a pedra em alvenaria de junta seca, uma técnica herdada dos gregos. Na época romana, será também de realçar a utilização de arcos, abóbadas e cúpulas em alvenaria de pedra e tijolo revestido a pedra, especialmente em obras de engenharia.

Com o Românico dá-se basicamente um processo evolutivo das técnicas romanas. O Gótico constitui no entanto um período à parte, onde a construção em pedra estrutural alcançou a sua máxima leveza e complexidade, mesmo comparando com épocas posteriores. Aparece o conceito de estrutura nervurada, com as cargas assentes sobre elementos lineares hierarquizados, dando origem ao quase desaparecimento dos panos de parede, trocados pelos elementos estruturais e envidraçados.

O Renascimento, com o seu regresso às formas clássicas, concentrou-se mais na linguagem formal que na investigação estrutural, ainda que se destaquem algumas cúpulas, pela sua esbeltez e altura. Nesta época retomam-se especialmente as



Figura 4.1.2. Fachada do Palácio do Raio, de André Soares, em Braga

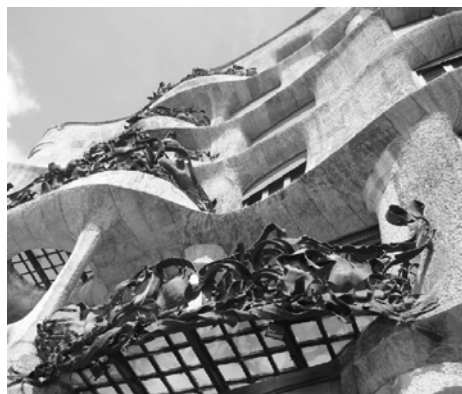


Figura 4.1.3. Fachada da Casa Milà de Gaudí, em Barcelona

técnicas de placagem romanas, com grampeamento metálico e argamassa.

“Com o Barroco, a pedra une-se ao impulso cenográfico e é empregue profusamente – em singular harmonia – tanto na arquitectura como na escultura” (Fernandez 1996). No entanto, não há grandes inovações técnicas, o mesmo acontecendo com o Neoclassicismo. Aqui, voltam-se a repetir as técnicas e formas dos Gregos e Romanos. Na Figura 4.1.2 pode ver-se um exemplo de uma casa apalaçada do período Barroco, em Braga, o Palácio do Raio, projectado pelo Arquitecto André Soares e construído em 1754.

Com o Modernismo surge alguma inovação na utilização da pedra, não apenas pela inovação formal, mas também pelos aspectos construtivos, introduzindo-se a estrutura metálica, como elemento portante ou em situações mistas de pedra / ferro portantes, como no exemplo de Otto Wagner da Estação de Karlplatz das Figuras 3.1.1 e 3.1.2 ou de Gaudi na Casa Milá, que se pode ver na Figura 4.1.3.

Com o movimento moderno, a pedra como material estrutural passa a ser menos utilizada, ou pelo menos já não constitui o material mais representativo. Este facto deve-se não apenas à referência ao passado, com o qual se pretende estabelecer uma ruptura, mas igualmente pelas técnicas construtivas que se pretendem industrializadas e por isso mais ligeiras, com a utilização do aço, do vidro e do betão armado. Não deixa no entanto de haver exemplos de utilização de pedra em construções representativas do modernismo, como o Pavilhão da Alemanha de Mies Van der Rohe em Barcelona (Figura 4.1.4), ainda que partilhando o seu protagonismo com o aço e o vidro.

Um pouco em ruptura com o movimento moderno, ou pelo menos em descontinuidade, alguns autores, como Keneth Frampton com o termo de “regionalismo crítico”, fazem referencia a um novo entendimento da arquitectura referenciada no seu contexto regional, fazendo uso de materiais e sistemas construtivos vernaculares, pelo que, em zonas onde a pedra é um material abundante e se continuou a utilizar na construção “popular”, encontram-se hoje em dia exemplos de arquitectura “erudita” nos quais a utilização de pedra estrutural se apresenta inclusivamente com aspectos inovadores. Alguns exemplos disto podem-se apontar no Norte de Portugal, onde coexistem uma arquitectura popular ou, melhor dito, tradicional, de pedra e algumas intervenções de arquitectos, que de certa forma constituem reinterpretações com aplicações de sistemas construtivos de pedra, como nos exemplos de Souto de Moura. No entanto, a utilização de pedra estrutural deixou praticamente de se fazer, por falta de tradição no cálculo deste tipo de estruturas*, relegadas para material de acabamento, por questões económicas, mas também por simplificação e segurança, já que os programas de cálculo estrutural se baseiam nas estruturas reticuladas de betão armado ou aço.



Figura 4.1.4. Pavilhão da Alemanha, de Mies Van der Rohe, em Barcelona

* “Nas Escolas de arquitectura e engenharia da Europa deixou de se explicar o cálculo de paredes portantes de pedra. Se acaso se recordava a sua existência e se procedia à sua dissecação e nomenclatura, era sobretudo para se ser erudito, para formação histórica ou com vista a intervenções de restauro. O vazio tecnológico era duplo: por um lado, os projectistas careciam de capacidade de desenho e de cálculo das estruturas em pedra e por outro, carecia-se de mão de obra especializada para a sua correcta execução. O escasso domínio das técnicas de alvenaria de pedra é por si só vinculante e deixa o técnico na tessitura de restringir a sua capacidade projectual, ou seja, reincidir na repetição mimética de soluções anteriores, talvez não de todo adequadas. A arquitectura não resiste a uma abordagem cheia de idealismo mas vazia de rigor técnico. Necessita avançar-se no conhecimento do material, no domínio dos vínculos reais que se apresentam em toda a construção, de forma que o arquitecto logre a síntese entre ideia e realidade, entre significado e matéria” (Fernandez 1996).

Na Tabela 4.1.1 apresentam-se valores médios de resistência à compressão das rochas mais comuns utilizadas na construção em Portugal.

Tabela 4.1.1. Resistência à compressão características de algumas rochas

Material	Resistência à compressão [Kgf/cm ²]
Granito, gneisse, pórfiro	1784,51
Xisto, ardósia	713,80
Basalto	2039,44
Mámore	1580,57

Fonte: ver Tabela 4.1.11

4.1.1.2. Terra estrutural (taipa e adobe)

Passaram-se já cerca de 12.000 anos desde que as primeiras casas de terra foram construídas em Jericó. Constitui a base da arquitectura mesopotâmica e egípcia. As vantagens da terra são a incombustibilidade, a sua capacidade de regulação de humidade, o isolamento térmico, a economia e, essencialmente, o seu reduzido impacte ambiental. No entanto é susceptível de ser atacada por roedores, não sendo indicada para a construção de grandes edifícios enquanto material estrutural, pela fraca estabilidade face a acções sísmicas, caso não seja reforçada, desagregando-se facilmente com acções mecânicas deste tipo. Existem várias formas de utilizar a terra em construção, mas os principais são a taipa, o adobe, o bloco prensado e o tabique.

Taipa: constituída por terra húmida de características argilosas, comprimida entre taipais (amovíveis), tradicionalmente de madeira, retirados depois de se completar a secagem, originando paredes ou muros homogêneos e monolíticos.

O material mais aplicado na confecção da taipa é a terra argilosa, embora se possa utilizar qualquer outra, pois a mistura de argila com terra franca, a 1/3 do seu volume, já dá uma boa taipa. A terra franca reconhece-se apertando-a na mão, porque mantém a forma dos dedos marcada. Quando a argila existe em pequenas quantidades e a terra é arenosa, faz-se uma calda com o barro, que serve para regar a terra magra; em alternativa pode-se juntar leite de cal à terra arenosa, permitindo assim confeccionar a taipa.

Para preparar a terra é necessário destorroá-la e passá-la à ciranda, retirando-lhe as pedras com dimensões superiores a uma noz e substâncias vegetais, como raízes. Para se verificar a qualidade desta, tendo em vista a confecção de uma boa taipa, era feito um ensaio, constituído pelas seguintes fases (Segurado, 1908):

1. Amassava-se a terra com água, colocando-a por camadas num molde prismático de madeira, com 0.5m de lado;
2. cada camada, bem comprimida, tinha uma espessura de 0.1m;
3. depois de cheio, o molde era tapado com um taipal de madeira;
4. ao fim de uma semana, a terra que já estava bem seca, era retirada do molde e deixada em repouso;
5. passados alguns meses, examinava-se a evolução da sua consistência;

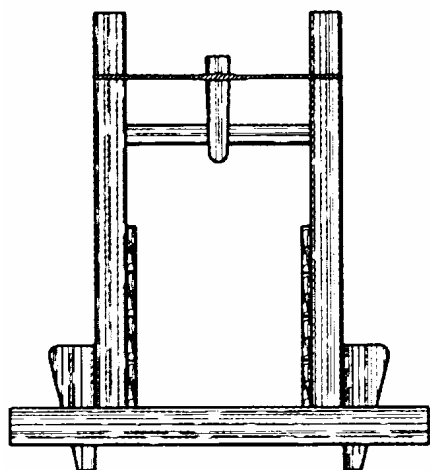


Figura 4.1.5. Caixilho para os taipais ou enxaiméis (Berge 1992)

6. da análise dos resultados empregava-se ou não aquela terra na confecção da taipa.

Os moldes utilizados na confecção da taipa eram formados por taipais de madeira, designados por enxaiméis. Estes taipais, com cerca de 3.0 a 4.0m de comprimento e 1m de altura eram dispostos paralelamente, de forma a deixarem entre si um intervalo de 0.5 a 0.6m, correspondente à espessura pretendida para a parede. Habitualmente, os taipais possuíam umas argolas de ferro que facilitavam o seu transporte e colocação. Para que os taipais fossem mantidos na vertical, utilizava-se uma série de caixilhos de desarmar, como o da Figura 4.1.5, sendo cada um deles constituído por um sarrafo de madeira horizontal e dois prumos, fixos inferiormente por cunhas e superiormente por uma corda que se mantinha torcida com o auxílio de um pau. Depois dos caixilhos estarem armados e colocados na sua posição, iniciava-se a construção da parede propriamente dita, colocando entre os taipais a terra ligeiramente húmida, em camadas de pequena espessura, cerca de 0.1m em média, que se calcavam com maços apropriados, até que aquele valor fosse reduzido a metade. Os maços utilizados para compactar a taipa tinham a forma de cunha, os utilizados para aplanar e regularizar a sua superfície eram cilíndricos.

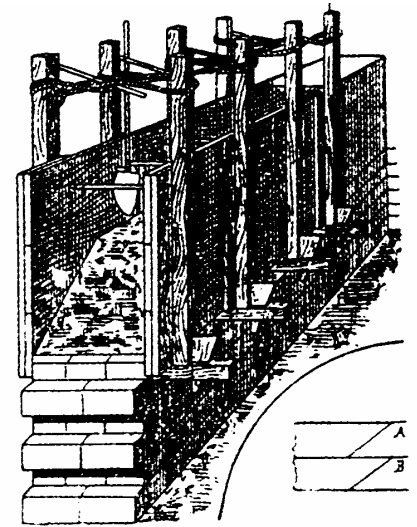


Figura 4.1.6. Montagem do taipal sobre a alvenaria de fundação (Berge 1992)

Quando havia que mudar os taipais, para se colocarem as novas camadas de terra, interrompiam-se as camadas em execução, com uma inclinação nas faces superiores e nas juntas que variava entre 45° e 60°, como se pode ver na Figura 4.1.6, caso as paredes não fossem tapadas nos topos, como no exemplo da Figura 4.1.7. Em cada fiada, os taipais deviam cobrir por completo as faces laterais da parte inclinada do troço anterior, além disso, as juntas inclinadas do novo troço não se deviam sobrepor às existentes, nos troços da fiada antecedente. Quando se retiravam os sarrafos que suportavam os caixilhos, ficavam nas paredes uns vazios ou agulheiros, que eram tapados no final da construção. Nalguns casos, a matriz de taipa era complementada com fragmentos de pedras de pequenas dimensões, colocados entre as juntas das fiadas, de modo a aumentar a resistência mecânica da parede.

As paredes de taipa eram quase sempre rebocadas com argamassa de cal ordinária, que só podia ser aplicada em tempo seco e com a taipa completamente seca (o que durava cerca de quatro meses). Antes da aplicação do reboco, devia-se picar e humedecer ligeiramente a superfície da parede. Depois de rebocada, a parede podia finalmente ser caiada. A caição deveria ser repetida (renovada) periodicamente, porque influenciava decisivamente o estado de conservação do edifício. A durabilidade da taipa podia ainda ser aumentada se na confecção fosse humedecida com leite de cal.

Os vãos das portas eram guarnecidos com tijolo, pedra ou madeira, sendo as vergas ou padieiras de madeira, na maior parte das vezes.



Figura 4.1.7. Construção de parede em taipa

Quando as paredes exteriores tinham grande comprimento e não existiam paredes interiores que fizessem um adequado contraventamento, recorria-se por vezes à construção de contrafortes, ou gigantes, pelo exterior, que eram maciços geralmente de alvenaria, de forma triangular, posicionados perpendicularmente à parede, que melhoravam substancialmente as condições de equilíbrio da parede. Os contrafortes apoiavam num alicerce apropriado e tinham um dos lados (vertical) solidarizado com a parede. Quando atingiam alturas significativas, as paredes podiam também ser reforçadas, total ou parcialmente, com um esqueleto de madeira embebido no interior. Tendo em vista aumentar a capacidade resistente global do edifício, as ligações entre as paredes de taipa deviam ser reforçadas com ferrolhos metálicos.



Figura 4.1.8. Casa com paredes de cortiça aglutinada com terra na Várzea de Stº André, fotografias de vista exterior e pormenor da parede (Pinho 2000)

Dois operários podiam construir cerca de 8m^3 de taipa em 12 horas de trabalho, desde que a terra se encontrasse nas proximidades do local de construção.

Através de ensaios à compressão, demonstra-se que a resistência seca diminui à medida que diminui a percentagem de argila. No entanto, uma grande percentagem de argila aumenta a fissuração, já que torna a parede muito retráctil. Para obviar este fenómeno, juntava-se por vezes palha à taipa, que funcionando como um elemento aglutinador, reduzia aquele efeito e melhorava o comportamento higrotérmico e mecânico da parede. A adição de pequenas percentagens de um ligante hidráulico também poderá ajudar ao incremento da resistência mecânica à compressão.

Fernando Pinho apresenta um exemplo de uma construção, com mais de 150 anos, cujas paredes são uma espécie de taipa em terra negra, extraída da Várzea de Stº André, próxima da localização do edifício, parcialmente preenchidas com pedaços de cortiça, alguns dos quais com mais de 0,20m de espessura e algumas pedras (Pinho 2000). As paredes exteriores têm cerca de 0,60 a 0,70m de espessura, sendo apresentadas fotografias de uma vista exterior e pormenor da mesma na Figura 4.1.8.

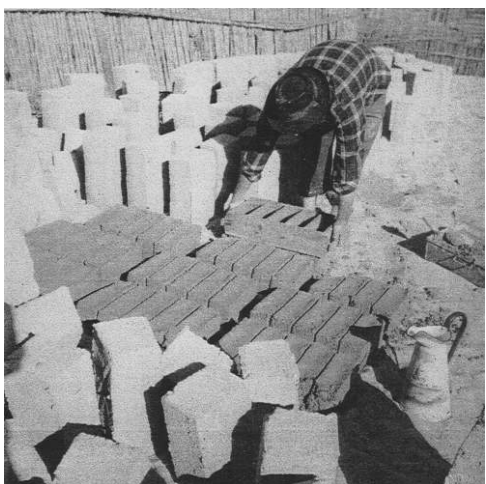


Figura 4.1.9. Desenformagem dos blocos de adobe para secagem ao sol (AAP 1988)

Adobe: a palavra Adobe tem origem na palavra árabe “túb” que significa tijolo. Em português utiliza-se a palavra Adobe para os blocos de terra crua, com eventual mistura de algumas fibras vegetais, diferenciando-se do tijolo cozido, a que se chama apenas tijolo. No fabrico dos blocos de adobe utiliza-se terra bastante argilosa (até 30%) mas muito arenosa, à qual se junta água até à obtenção duma pasta semi-dura (15 a 30% de água), sendo modelados à mão ou preparados num molde. Uma vez desenformados, operação que se pode ver na Figura 4.1.9, os blocos de adobe são secos ao sol. A construção em adobe segue tradicionalmente as mesmas regras de outras construções de blocos ou de tijolo. Constrói-se geralmente com os blocos contrafiados para maior travamento e resistência, como se pode ver na Figura 4.1.10 durante a execução de paredes para os ensaios realizados em Células de Teste. Para a sua união pode utilizar-se argamassa de argila ou de cal. Deverão sempre estar

completamente secos no momento do assentamento, pois caso contrário a argamassa de assentamento poderá secar mais rapidamente e deixar espaços abertos entre os blocos (Domínguez Alonso 1998).

Bloco de Terra Prensada: esta versão moderna do bloco de adobe emprega terras cujas características estão bastante próximas das da taipa, mas podem ser um pouco mais argilosas (até 25%), com menos cascalho, mas sempre muito arenosas. O material é prensado um pouco húmido, em prensas que podem ser de vários tipos. A prensa “Cinva-Ram”, Figura 4.1.11, criada em 1956 na Colômbia, pelo Engenheiro Raul Ramirez, foi a primeira a ser divulgada e fabricada industrialmente sob licença, no mundo inteiro. Contribuiu largamente para actualizar a construção em blocos de terra prensada (Dethier 1993). Esta prensa foi ultrapassada actualmente por uma série de compressoras mais competitivas, manuais ou mecânicas, hidráulicas ou de compressão estática. Uma transposição recente do bloco de betão introduz a densificação por vibração, que uma ligeira compressão vem depois completar. Os blocos de terra prensada podem ser não estabilizados ou estabilizados por adição duma pequena percentagem de ligante hidráulico, cimento ou cal. Na Tabela 4.1.2 apresentam-se valores de resistência à compressão de blocos compactados estabilizados e não estabilizados.

Tabela 4.1.2. Resistência à compressão simples de adobe e de adobe com cimento (4%)

Composição	Resistência à compressão
	Provetes cilíndricos 8 (diâm.) x 12 (alt.) cm
	Velocidade de carga – 0,0208 mm/s [Mpa]
Adobe	2,67
Adobe com ligantes hidráulicos (4% cimento)	3,934

Composição	Resistência à compressão
	Blocos de adobe 29,5 (comp.) x 14 (alt.) x 9,3 (larg.) cm
	Velocidade de carga – 0,0208 mm/s [Mpa]
Adobe	1,542
Adobe com ligantes hidráulicos (4% cimento)	1,804

Composição	Resistência à compressão
	Provetes paralelepípedicos 14,75 (comp.) x 14 (alt.) x 19,6 (larg.) cm
	Velocidade de carga – 0,0208 mm/s [Mpa]
Adobe	2,149
Adobe com ligantes hidráulicos (4% cimento)	2,741

Fonte: (Hakimi et al.)

Nota: A composição da terra de base utilizada para os ensaios referidos é de 19% de argila, 38% de Silte, 30% de Areia e 13% de Seixo compactada a aproximadamente 11kN, com uma densidade média húmida de 2,11 no caso dos provetes cilíndricos, de 2,22 nos blocos sem ligantes hidráulicos e de 2,20g/cm³ nos blocos com cimento.

Pela análise dos valores de resistência à compressão apresentados, poderá afirmar-se que os provetes cilíndricos apresentam resistências bastante mais elevadas que os blocos na dimensão real, o que seria de esperar. A adição de 4% de cimento também contribui para o aumento da resistência em qualquer dos casos estudados. O maior problema das construções em terra está no mau desempenho em termos de resistência à tracção. No caso



Figura 4.1.10. Construção de parede em alvenaria de adobe



Figura 4.1.11. Prensa para fabrico de blocos de terra prensada “Cinva-Ram” (The Dirt cheap builder 2004)

dos ensaios à tracção, são apresentados valores na Tabela 4.1.3. Nestes pode-se ver que a resistência à tracção é cerca de 10 vezes menor que a resistência à compressão para os mesmos provetes.

Tabela 4.1.3. Resistência à tracção por ruptura de adobe e de adobe com cimento (4%)

Composição	Resistência à tracção Provetes cilíndricos 8cm (diâm.) x 12cm (alt.) Velocidade – 0,0208mm/s [Mpa]
Adobe	0,223
Adobe com ligantes hidráulicos (4% cimento)	0,346

Composição	Resistência à compressão Blocos de adobe 29,5cm (comp.) x 14cm (alt.) x 9,3cm (larg.) Velocidade – 0,0208mm/s [Mpa]
Adobe	0,153
Adobe com ligantes hidráulicos (4% cimento)	0,204

Composição	Resistência à compressão Provetes paralelepípedicos 14,75cm (comp.) x 14cm (alt.) x 19,6cm (larg.) Velocidade – 0,0208mm/s [Mpa]
Adobe	0,165
Adobe com ligantes hidráulicos (4% cimento)	0,206

Fonte: (Hakimi et al. 1996)

Tabique: o tabique, ou taipa de pau a pique é feito geralmente com terra muito argilosa, misturada com palha ou outras fibras vegetais locais e é utilizado como guarnição de estruturas de suporte, geralmente em madeira. A argamassa é aplicada sobre ripas de madeira entrançadas ou pregadas, ou enrolada à volta de varetas, entalada entre os pilares, na ossatura da construção. Esta técnica é muito antiga e já foi referida como tradicional na construção de habitação em Portugal, antes do século XVII, no Capítulo III.

Durabilidade e cuidados a ter: a água é sem dúvida o principal problema que tem a construção com terra. A água nos adobes e taipas apresenta vários problemas, dentre os quais se podem referir os seguintes:

- A percentagem de água para a composição da pasta;
- O desgaste face à chuva;
- As infiltrações do terreno;
- A condensação de vapor nas paredes.

Para o fabrico dos adobes e taipas tem de utilizar-se a quantidade de água adequada para que se possa fazer a pasta, tendo o cuidado de não exceder a quantidade, pois dessa forma pode produzir-se uma sedimentação anómala. O problema é tanto maior quanto menos componente argiloso possua. Durante a secagem, nos adobes pouco argilosos há um grande risco de desagregação quando chove, o que se evita com a cobertura da construção, mas desta forma alonga-se muito a secagem, especialmente em climas húmidos e frios (Domínguez Alonso 1998).

Deve igualmente ser tido em conta que mesmo após a completa secagem, se deverá continuar a proteger as construções em terra,

especialmente quando esta fica exposta no exterior. Na protecção contra a chuva existem dois tipos bem diferenciados de estratégias: o desenho de protecções superiores e os revestimentos. Os primeiros não tapam visualmente o material desde o exterior, como sejam os beirais, alpendres ou consolas que evitam os escorrimentos e os salpicos, bem como os sistemas de caleiras e tubos de queda sobredimensionados apropriados para as fortes chuvadas que podem suceder nos meses quentes. Os revestimentos exteriores, por sua vez, não permitem a leitura do material desde o exterior, mas podem ser mais eficazes, mesmo em climas chuvosos. Estes podem ser de dois tipos: aderidos à parede ou independentes desta. Em climas secos e pouco chuvosos, o caiado periódico pode ser suficiente. As pinturas especiais com bases impermeabilizantes apenas são eficazes quando se pode garantir que não haja condensações interiores.

As infiltrações de água procedente do terreno devem tratar-se de forma particular em cada circunstância. Existem duas soluções clássicas eficazes: incorporar barreiras ou construir drenos perimetrais para drenagem. Para obviar este fenómeno, nas construções tradicionais de terra compactada era construído previamente um alicerce ou sapata de alvenaria ordinária ou de tijolo, com cerca de 0.25 a 0.6m de altura, sempre saliente em relação ao solo.

Quando existe uma diferença de temperaturas entre as duas faces de uma parede de adobe, é muito provável que suceda uma diferença de pressões parciais de vapor de água e por isso se produza uma passagem de água das zonas quentes para as frias. Se nalguma zona da parede a temperatura em que se encontra é igual à de saturação, o vapor de água que a atravessa condensa. Esta água, em estado líquido, pode reagir com o adobe, modificando o valor do coeficiente de condutibilidade térmica, podendo também migrar por capilaridade entre os interstícios do adobe. As condensações internas podem ser evitadas de duas formas (Domínguez Alonso 1998):

- uma térmica, com maior resistência ao calor, ou seja com maior espessura e menor condutibilidade;
- de difusão, dando maior resistência à passagem do vapor de água, o que se pode conseguir:
 - a) através da introdução de barreiras de vapor, de difícil localização pelo facto de deverem ser colocadas pelo lado mais quente e este poder ao longo do ano inverter-se;
 - b) incorporando substâncias que fechem os alvéolos dos adobes, tais como substâncias gordas ou coagulantes.

4.1.1.3. Tijolo estrutural

O tijolo é uma evolução natural do bloco de adobe, distinguindo-se deste pela cozedura que lhe confere maior resistência e durabilidade. A técnica da cozedura de cerâmica tem a sua origem provavelmente no fim do Neolítico, no entanto só mais tarde viria a ser aplicada em materiais de construção na forma de tijolos*. Os tijolos, são materiais cerâmicos, obtidos por cozedura em fornos a temperaturas elevadas (mais de 900°C), duma pasta

* Em princípio a técnica da cozedura dos tijolos deveria ter sido conhecida e aplicada desde a invenção da arte da Olaria, mas parece que na prática só começou a ser aplicada muito mais tarde. A razão reside sem dúvida no facto de o tijolo não cozido (adobe), nos climas da Ásia Menor e do Egipto, oferecer já suficiente resistência à erosão. A cozedura dos tijolos, requerendo a utilização de quantidades apreciáveis de combustível terá sido considerada como um luxo supérfluo. Não era senão em edifícios com certo prestígio que eram utilizados tijolos cozidos (APICC 1996).

formada por argila, areia e água. O processo de fabrico deste material é detalhadamente descrito no Anexo 1.

* Os Romanos deram um grande impulso à indústria do tijolo que espalharam pelo seu vasto império. O emprego deste material era corrente entre eles, até em formas não muito simples, por exemplo os tijolos curvos para colunas cilíndricas (APICC 1996).

A construção com tijolo foi introduzida em Portugal pelos Romanos*, que utilizavam uma alvenaria argamassada. A alvenaria de cimento romano era em grande parte dos casos efectuada com tijolo, ou com tijolo e pedra. O cimento aplicava-se depois de amassado, dispondo-se em seguida as pedras e os tijolos sobre ele. Depois esta mistura era batida, mas apenas durante os primeiros instantes, em que ainda estava fresca. Os principais cuidados a ter na construção de uma alvenaria de cimento romano eram a limpeza perfeita dos materiais e dos locais onde iam ser aplicados. A alvenaria assim construída era conservada húmida por meio de regas frequentes.

Na Idade Média, depois da queda do Império Romano, mantém-se a construção em tijolo, principalmente nos séculos XV e XVI na construção de edifícios públicos, igrejas, palácios, casas de habitação na cidade e no campo, fortalezas militares e também construções rurais. A intensificação das construções em tijolo tem particular relevância em Itália, cuja influência se estenderia ao resto da Europa. Na Inglaterra, a fabricação de tijolos, abandonada depois da ocupação romana, torna-se técnica corrente. Surgem exemplos na Rússia, em França, na Bélgica e especialmente na Holanda, onde a construção em tijolo se destaca substancialmente de outros sistemas construtivos. A utilização do tijolo intensificou-se substancialmente após a Revolução Industrial, com a mecanização e a aplicação dos novos conhecimentos científicos no estudo das pastas, na cozedura, evoluindo para a sistematização e a produção em grandes quantidades. Em 1850 foram inventados os tijolos furados, que permitiram aumentar o rendimento dos pedreiros, bem como reduzir o peso no transporte. Também nos meados do século XIX foi inventado o forno túnel (de funcionamento contínuo), que só viria a ser utilizado um século mais tarde e que hoje em dia tem vindo a substituir os fornos Hoffmann, por permitir a mecanização total. A mecanização está também actualmente presente nas outras fases da produção, nomeadamente na extracção das matérias-primas, na preparação da pasta, no corte das peças, até ao acondicionamento e embalagem dos produtos acabados e sua colocação nos parques de armazenamento.

** A Norma Portuguesa NP 80 define como tijolo maciço aquele cujo volume de argila cozida não é inferior a 85% do seu volume total aparente, e como tijolo perfurado aquele que possui furos perpendiculares ao seu leito com área não inferior a 15% da área da face correspondente nem superior a 50% da mesma área (Pina dos Santos 1990).

Os tijolos estruturais, maciços (burros) ou perfurados** face-à-vista, vulgarmente utilizados na construção portuguesa têm em média as dimensões de 0,23 x 0,11m por uma altura que pode variar entre 0,03 e 0,09m, mais habitualmente 0,07m (APICC 1996), e a espessura das juntas não ultrapassa habitualmente 0,01m. Tal como acontece com a pedra, a utilização de tijolo maciço e perfurado face-à-vista não se faz actualmente em paredes exteriores simples (Figura 4.1.12), também por razões térmicas e económicas. É no entanto possível a sua utilização simples em espaços não habitáveis, como garagens ou anexos ou em espaços úteis aplicando isolamento exterior ou interior, mas no último caso desperdiçando a sua capacidade de armazenamento térmico. Neste último caso tem a vantagem de poder ser um

material estrutural e ficar aparente sem necessidade de reboco. Um pedreiro pode assentar até 800 tijolos por dia em paredes espessas e contínuas, 700 quando existem vãos e ângulos, e somente 500 se existem pilastras e muitas aberturas. Para cada dois ou três pedreiros é necessário um servente, e para cada oito, um amassador.

Os valores da resistência à compressão de paredes de alvenaria de tijolo (Tabela 4.1.4), pelo facto de não serem materiais homogéneos, apresentam-se geralmente como valores de projecto e com distintas classes de compressão:

Tabela 4.1.4. Tensões de ruptura à compressão de tijolos para alvenaria e tensões de segurança das alvenarias

Classes de compressão	Valores mínimos individuais [Kgf/cm ²]		Valores médios individuais [Kgf/cm ²]		Valores de projecto [Kgf/cm ²]	
	Tijolos maciços e perfurados	Tijolos furados	Tijolos maciços e perfurados	Tijolos furados	Tijolos maciços e perfurados	Tijolos furados
A	140	45	190	60	160	50
B	100	30	150	45	120	35
C	70	15	120	30	90	20

Fonte: (APICC 1996) e (Brazão Farinha e Correia dos Reis 2000)

Natureza da alvenaria	Tensões de segurança de alvenarias de tijolo [Kgf/cm ²]			
	Argamassa de cal 1:3	Argam. de cal hidráulica 1:3	Argamassa de cimento 1:6	Argamassa de cimento 1:4
Tijolos furados tipo A	6	15	15	15
Tijolos furados tipo B	5	10	10	10
Tijolos furados tipo C	5	5	5	-
Tijolos maciços e perfurados tipo A	10	20	30	45
Tijolos maciços e perfurados tipo B	10	20	30	30
Tijolos maciços e perfurados tipo C	6	20	20	-

Fonte: (Brazão Farinha e Correia dos Reis 2000)

O tijolo furado é actualmente o material predominante na construção em Portugal, seja em paredes exteriores e interiores, seja em abobadilhas para lajes de betão aligeiradas. Em paredes a sua utilização é geralmente de carácter não estrutural. As suas dimensões em paredes são geralmente entre 30cm (comprimento) x 20cm (altura) podendo a espessura variar de 3 e 4cm para forras em correcções de pontes térmicas, até 22cm. As dimensões mais comuns para a espessura são contudo as de 7, 9, 11 e 15cm (APICC 1996). No entanto, a sua utilização como parede exterior simples, já não é regulamentarmente viável nas zonas climáticas portuguesas, se bem que, especialmente no Sul e em construções precárias, ainda se continue a utilizar tijolo simples em paredes exteriores, nomeadamente em dimensão de 22cm (Figura 4.1.13. e 4.1.14.a) ou tijolos de formato especial, como o duplex e triplex, com interrupções na parte central, onde se reduzem as ligações rígidas entre as superfícies exteriores e interiores (Figura 4.1.14.b). O assentamento não tem de ser tão cuidadoso como no caso do tijolo face-à-vista, pois os tijolos furados têm de ser revestidos com reboco, quer interior, quer exteriormente. Geralmente utiliza-se

Tijolo maciço

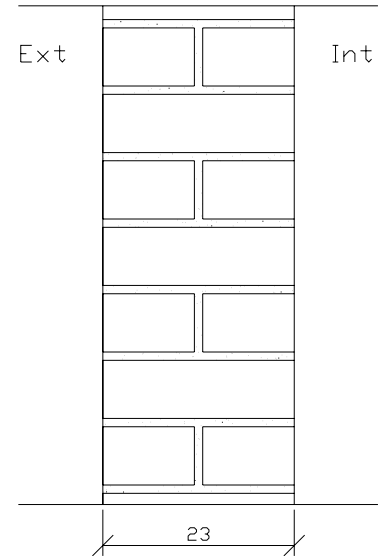


Figura 4.1.12. Parede em tijolo maciço travado

Reboco
+ Tijolo perfurado
+ Reboco

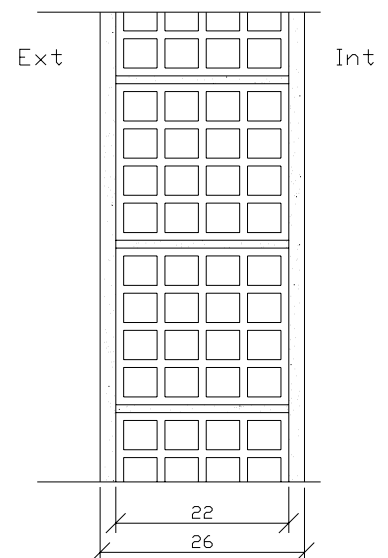


Figura 4.1.13. Parede simples em tijolo perfurado rebocada nas duas faces

argamassa de reboco à base de cimento afagada ou estanhada e pintura.

As paredes em tijolo, quer seja furado, perfurado ou maciço, constroem-se geralmente com as peças contrafiadas para maior travamento e resistência. No caso das paredes maciças ou de tijolo perfurado face-à-vista, a sua colocação sem contrafiar implica a colocação de uma armadura metálica de reforço.

4.1.1.4. Betão estrutural

Definia-se como beton, hoje betão (simples), o aglomerado que se obtinha pela mistura de saibro ou cascalho com argamassa hidráulica. Apesar do betão ser um material que remontava já aos Egípcios, os Romanos foram os principais impulsionadores das construções em betão, (opus caementicium), existindo ainda diversos exemplos que perduraram até hoje. Com a queda do Império Romano, desapareceu também a aplicação deste material, para voltar a aparecer em meados do século XIX. A primeira fábrica de cimento Portland foi fundada na Inglaterra em 1825. Em Portugal, o cimento Portland começou a ser fabricado em 1866, numa fábrica sediada em Alcântara, com uma produção média diária de 28 barricas de 150kg (Pinho 2000).

Uma das principais vantagens do betão é a sua resistência à compressão. Uma desvantagem é a sua pouca resistência à tracção. A sua baixa resistência à tracção pode no entanto ser compensada através da utilização de armaduras de ferro, que dessa forma permitem igualmente a sua utilização trabalhando à flexão, em vigas. Na Tabela 4.1.5 apresentam-se os valores de resistência à compressão e tracção de betão normal e de outros betões.

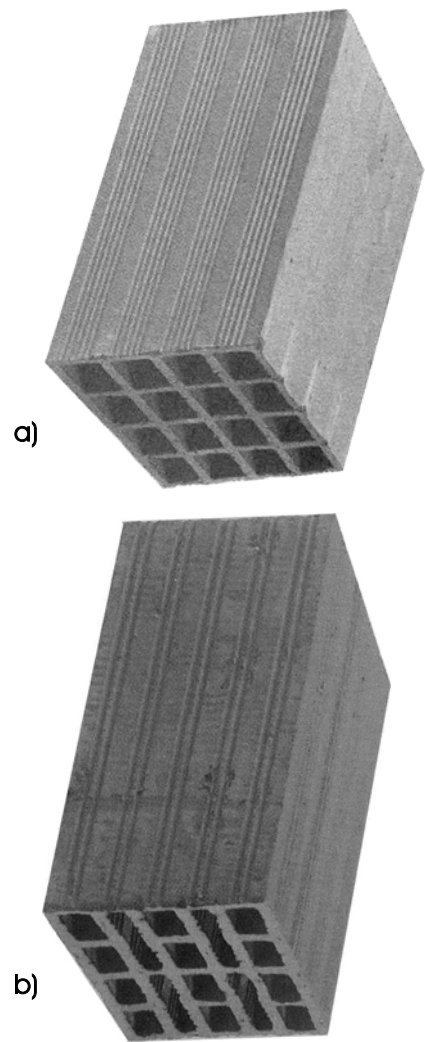


Figura 4.1.14. Exemplos de Tijolos furados: a) tijolo de 22cm, b) tijolo triplex

Tabela 4.1.5. Tensão de compressão de segurança de alvenarias de betão e betão maciço

Material	Resistência à compressão (Kgf/cm²)
Alvenaria de Blocos de 2ª qualidade	5-7
Alvenaria de Blocos de boa qualidade	10
Alvenaria de Blocos de superior qualidade	15
Betão simples traço 1:4:8 (170 kg/m³)	20
Betão simples traço 1:3:6 (220 kg/m³)	25
Betão simples traço 1:2:4 (265 kg/m³)	30-40

Fonte: (Brazão Farinha e Correia dos Reis 2000)

a) **Betão armado:** a invenção do betão armado ocorreu em 1848, quando Luís Lambot fabricou uma barca com uma combinação de ferro e betão, em substituição da madeira. O registo da patente do betão armado só ocorreu em Portugal em 1895.

No início do século XX, o betão utilizava-se somente em obras submersas, sendo quase desconhecidas quaisquer outras aplicações no nosso país (Pinho 2000). Só durante o século XX se começaram a realizar paredes de betão, inicialmente mais em muros e obras de grande dimensão e apenas na segunda metade se generalizou o betão armado na construção de habitações, mas geralmente apenas na

realização dos elementos estruturais principais, compondo uma malha reticulada. A utilização em paredes contínuas limita-se geralmente à execução de geometrias mais complexas ou a paredes de contenção de terrenos. Existe no entanto alguma tradição modernista, que remonta a Le Corbusier, na utilização do betão aparente, explorando a textura e expressividade que este pode transmitir. A utilização do betão aparente, apesar dos problemas de durabilidade e patologias que esta solução pode trazer (Figura 4.1.15), não demove alguns projectistas de continuar a utilizar o betão armado aparente em construções de habitação, enfatizando a expressividade que este material pode transmitir, quer pela sua textura rugosa, especialmente quando utilizadas cofragens em madeira; ou lisa, quando utilizadas cofragens em painéis de aglomerados prensados ou metálicas, onde nalguns exemplos se deixam aparentes os pontos de ancoragem, como se pode ver em muitas obras de Tadao Ando, como já foi referido no Capítulo III. Na Figura 4.1.16 mostra-se uma vista interior da Casa Isawa, localizada em Ashiya, Japão.



Figura 4.1.15. Patologia com aço exposto no topo duma laje em betão aparente

- b) **Betão pré-moldado:** uma outra forma de utilizar o betão em paredes é através de peças pré-moldadas. Existem dois tipos de pré-moldados de betão em fachada: a construção com blocos e a construção com painéis.

A construção com blocos de betão é uma evolução recente da construção de adobe. Existem diversos sistemas e tipos de blocos: blocos de betão normal maciços e furados, blocos de betão com inertes leves maciços ou furados, betão celular autoclavado (ACC - Autoclaved Cellular Concrete)*. As furações são de características diversas, variando com os fabricantes e os tipos de blocos. As dimensões mais comuns existentes no mercado nacional são 40, 50, 60cm (comprimento) x 20cm (altura) x (5 ou 7,5 para forras), 10, 12, 15, 20, 24, 30cm (espessura). Estas dimensões variam de acordo com o tipo de material e fabricantes, pelo que são apenas indicativas. As densidades são também variáveis: 400 a 800kg/m³ para o Betão autoclavado, 950 a 1150kg/m³ para Betão de argila expandida e 2200 a 2400kg/m³ para betão normal. Os pesos próprios dos blocos furados variam com o tipo de furação

A construção com painéis de betão é um tipo de solução mais recente que os blocos de betão, sendo um sistema mais apropriado a edifícios de grande dimensão. Com o recurso a guias para a montagem das fachadas e tendo em conta soluções modulares repetitivas, podem ser economicamente competitivas face às alvenarias. Existem diversos tipos de painéis de betão, tais como: de ACC, de betão reforçado com fibra de vidro (GRC - Glassfibre Reinforced Concrete), de betão normal e de betão com agregados leves. Podem também ser utilizados painéis sandwich. Não são soluções de dimensões standard, variando entre empresas fabricantes e podendo ser inclusivamente feitos à medida, consoante a



Figura 4.1.16. Vista interior da Casa Isawa de Tadao Ando, em Ashiya, Japão. (El Croquis nº58 1993)

* O betão celular autoclavado, cuja produção industrial remonta aos anos 20 é um betão leve, poroso, cuja estrutura celular é obtida através da reacção química expansiva do pó de alumínio com uma pasta resultante da mistura de inertes e ligantes (cimento portland), moldados e misturados com água. A cura do betão é feita através duma autoclavagem durante 10 a 12 horas sob a acção de vapor a uma temperatura e pressão elevadas (www.fa.utl.pt).

especificação das obras a instalar. As medidas máximas dos painéis de betão normal simples são aproximadamente 10 x 3 x 0,07 a 0,08m; dos painéis de betão de agregados leves 8 x 3 x 0,07 a 0,08m; dos painéis GRC 3,5 x 1,5 x 0,015m (comprimento, largura e espessura respectivamente). Para os painéis Sandwich as espessuras são de 0,15 a 0,3m para o betão normal e betão de agregados leves e 0,07 a 0,2m para o GRC, dependendo da espessura do isolamento (Catálogo Soplacas n.d.).

Sob o ponto de vista construtivo são possíveis soluções de parede simples, quer de blocos, quer de painéis, ainda que seja preferível a sua utilização em paredes duplas ou pelo menos com isolamento pelo exterior. A sua utilização é mais comum em termos de acabamento exterior face-à-vista. No entanto, sob o ponto de vista ambiental, quer as placas, quer os blocos referidos anteriormente, serão de evitar em utilizações de acabamento exterior com espessuras acima de 7cm, já que existem materiais naturais e portanto de menor energia incorporada a preços equivalentes. Apenas o baixo peso e elevada resistência do GRC pode permitir que este seja uma solução ambientalmente interessante para exterior, comparável às placas de aglomerado de madeira/cimento, ainda que a energia incorporada seja superior, devido à fibra de vidro. Esta solução seria no entanto de integrar noutro grupo de estudo, nas fachadas leves, ou em revestimentos leves de fachadas pesadas (soluções de parede mista), que serão referidos posteriormente.

Nos blocos de maior espessura e peso a hipótese mais viável é colocá-los pelo interior do isolamento, aparentes (porque essa é uma das suas vantagens), em soluções que podem servir como armazenamento térmico.

As principais vantagens dos blocos de betão são a sua reação ao fogo (M0), o desempenho acústico e a massa térmica, no caso dos blocos maciços. Apesar da energia incorporada específica ser em regra geral inferior às paredes de tijolo, o que torna os blocos de betão mais interessantes sob o ponto de vista ambiental do que os tijolos, os materiais locais pesados, como a pedra ou a terra compactada serão, neste aspecto, ainda mais vantajosos, por serem materiais naturais pouco transformados.

4.1.1.5. Resumo das principais propriedades das Paredes Simples pesadas

Na Tabela 4.1.6 apresentam-se algumas das características das Paredes Simples referidas anteriormente, como uma síntese das propriedades com maior influência nos aspectos de conforto e impacto ambiental, que se apresentam mais detalhadamente nos Anexos 1 e 3.

Tabela 4.1.6. Propriedades de algumas Paredes Simples comuns

Designação	Constituição	Isolamento Sonoro – $D_{n,w}$ [dB(A)]	Coefficiente U [W/m ² .°C]	Energia Incorporada [kWh/m ²]	Peso específico [kg/m ²]	Massa superficial útil – M_u [kg/m ²]	Custo específico [€/m ²]
PS1.1/15	A15+R2	55	4,09	117	468	150	97
PS1.1/20	A20+R2	57	3,82	130	598	150	101
PS1.1/40	A40+R2	62	3,05	182	1118	150	111
PS2.1/11	M11	45	3,91	627	209	105	23,8
PS3.1/15	H0.5+B15+H0.5	49	0,92	42	245	123	23,7
PS3.1/40	R0.5+B40+H0.5	56	0,38	80	620	150	27,1
PS4.1/15	C15	54	4,07	386	345	150	36
PS4.1/20	C20	57	3,65	515	460	150	48
PS5.1/11	R2+T11+R2	44	2,47	375	177	89	36,8
PS5.1/15	R2+T15+R2	45	1,98	483	213	107	38
PS5.1/22	R2+T22+R2	55	1,53	672	276	138	46,4
PS1.2/40	A40+L5+G1.3	66	0,69	169	1053	11	115
PS2.2/11	M11+L5+G1.3	48	0,69	692	222	11	38,8
PS4.2/20	C20+L5+G1.3	61	0,7	580	473	11	63
PS1.3/20	R2+X5+A20+R2	57	0,66	270	599	150	123,3
PS3.3/15	R2+ X5+B15+H0.5	50	0,42	211	275	150	43,15
PS3.3/20	R2+ X5+B20+H0.5	52	0,38	218	350	150	45,15
PS4.3/20	R2+X5+C20+R2	56	0,66	694	500	150	81,3
PS5.3/22	R2+X5+T22+R2	53	0,52	812	277	150	56,7

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	H	Cal	S	Estuque
B	Alvenaria de Adobe	J	Lâmina de ar	T	Tijolo Furado
C	Betão Armado	L	Lã de Rocha	V	Aglomerado de Madeira/Cimento
E	Placas de Pedra	M	Tijolo Maciço	X	Poliestireno Expandido Extrudido
F	Fibra de Coco	N	Aglomerado Negro de Cortiça	AB	Vidro
G	Gesso Cartonado	R	Reboco		

4.1.2. Paredes multi-camadas pesadas

4.1.2.1. Tipologias

As paredes multi-camadas pesadas são o sistema actualmente mais comum de parede, sendo normalmente compostas de dois panos - paredes duplas. O que caracteriza a parede multi-camada é normalmente a existência de uma ou mais caixas-de-ar, que actualmente são muitas vezes preenchidas total ou parcialmente por materiais isolantes térmicos ou acústicos. Neste caso, apenas o elemento isolante é um elemento leve, que no entanto não tem qualquer função estrutural nem de protecção mecânica, sendo este aspecto que vai distinguir esta solução das soluções mistas apresentadas posteriormente.

Como já foi referido, a partir dos anos 50, o tijolo furado aparece em todas as soluções construtivas características das respectivas épocas. Nos anos 50 introduziram-se as paredes duplas de tijolo no interior e pedra ou tijolo maciço face-à-vista exterior, mas sem isolamento na caixa-de-ar. Nos anos 60 as paredes duplas passaram a ser totalmente de tijolo, com o tijolo de maior espessura no exterior. Nos anos 70 a qualidade regrediu e os panos passaram a ser ambos de reduzida ou média espessura. Apenas no anos 80 se voltou a utilizar panos de espessura maior no exterior



Figura 4.1.17. Parede dupla em tijolo maciço e pedra aparentes no Auditório da Casa das Artes, de Souto de Moura, no Porto

e nesta altura começam a ser utilizados materiais isolantes térmicos na caixa-de-ar.



Alvenaria de pedra
+ Caixa de ar
+ Isolamento
+ Tijolo furado
+ Reboco

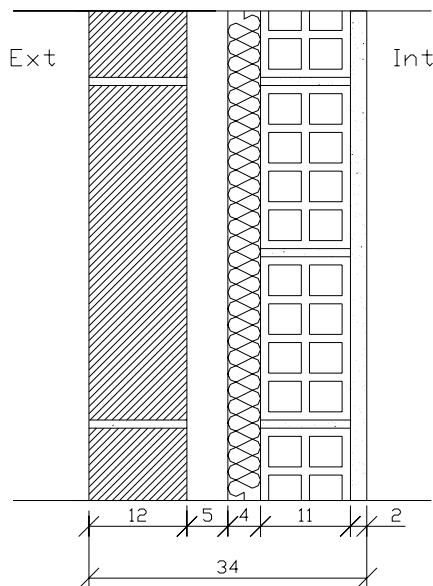


Figura 4.1.18. Parede dupla em pedra aparente e tijolo perfurado. Vista duma ombreira em obra e secção construtiva da mesma

Actualmente, a variedade de paredes multi-camadas é quase infundável, mas a presença do material isolante na caixa-de-ar é uma constante, ou pelo menos deveria ser no sentido de dar cumprimento aos valores regulamentares referidos no RCCTE (RCCTE 1990).

As Figuras 4.1.17 e 4.1.18 mostram exemplos da adaptação da solução de parede em alvenaria de pedra à vista exterior a situações de parede dupla, solução com a qual se permite o incremento da Resistência térmica, a redução do custo, mas não a redução do impacte ambiental, face a uma parede simples tradicional totalmente em pedra.

4.1.2.2. Resumo das principais propriedades das paredes multi-camadas pesadas

As características das paredes multi-camadas pesadas são uma conjugação das propriedades das paredes simples já apresentadas, se bem que nestas aumente o grau de complexidade da análise sob todos os pontos de vista energéticos e de conforto, o que se pode ver na Tabela 4.1.7. Nesta apresentam-se algumas das características das Paredes Duplas referidas anteriormente, como uma síntese das propriedades de algumas paredes duplas, com maior incidência nos aspectos de conforto e impacte ambiental. O facto do isolamento se encontrar na maioria dos casos pelo lado interior da principal massa da parede faz com esta se desperdice em termos de armazenamento térmico. Este tipo de parede é essencialmente vantajoso em termos acústicos. Por essa razão, a energia incorporada nestas paredes é sempre relativamente elevada, comparativamente às soluções de isolamento pelo exterior.

Tabela 4.1.7. Propriedades de Paredes Duplas pesadas comuns

Designação	Constituição	Isolamento Sonoro - $D_{n,w}$ [dB(A)]	Coefficiente U [W/m ² .°C]	Energia Incorporada [kWh/m ²]	Peso específico [kg/m ³]	Massa superficial útil M_u [kg/m ²]	Custo específico [€/m ²]
PD1.1/11+11	R2+T11+J5+T11+R2	50	1,27	672	276	138	50,6
PD2.1/11	M11+J5+T11+R2	51	1,43	963	347	138	48,6
PD3.1	M11+J5+C20+R2	55	1,66	1181	708	150	82,8
PD1.2/11+11	R2+T11+J5+XP4+T11+R2	52	0,52	802	277	138	59,9
PD1.2/15+11	R2+T15+J5+XP4+T11+R2	51	0,49	910	313	138	61,1
PD2.2/11	M11+J5+XP4+T11+R2	52	0,54	1093	348	138	57,9
PD3.1	M11+J5+XP4+C15+R2	53	0,58	1182	594	150	80,1
PD5.2	A12+J5+XP4+T11+R2	52	0,57	498	451	138	118,1

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	H	Cal	R	Reboco
C	Betão Armado	J	Lâmina de ar	T	Tijolo Furado
F	Fibra de Coco	M	Tijolo Maciço	X	Poliestireno Expandido Extrudido

4.2. PRINCIPAIS COMPONENTES DA ENVOLVENTE EXTERIOR OPACA LEVE

O critério adoptado neste estudo para classificar uma envolvente exterior como leve é o de ter um peso próprio inferior a 150kg/m^2 .

Os materiais de construção leves são produzidos em diversas dimensões e formas. O peso nunca é condicionante, mas apenas a dimensão, principalmente no caso das placas, que estão limitadas à capacidade que os trabalhadores tenham em transportar e manusear estas na obra e ao transporte rodoviário. Por exemplo a largura não ultrapassa geralmente $1,80\text{m}$ e o comprimento 3m . As grandes dimensões das placas pode criar no entanto problemas para a construção ao ar livre, quando existe vento.

Tal como nas paredes de fachada pesadas, as paredes de fachada leves também se podem dividir entre paredes de panos simples e paredes multi-camadas, mas neste caso os panos são chamados de painéis, pela sua menor espessura. As fachadas simples não são viáveis em construções de habitação, pois não oferecem praticamente nenhum isolamento térmico e acústico. Torna-se assim necessário introduzir como mínimo um segundo painel afastado do primeiro e deixando entre estes uma caixa-de-ar (Figura 4.2.1).

Nas fachadas multi-camadas leves aparece ainda um segundo conceito, que é o de painel sandwich (Figura 4.2.2). As modernas construções de fachadas leves utilizam geralmente este sistema. Este termo tem a ver com a existência de uma ligação entre dois painéis que os mantém afastados uma determinada distância, mas ao mesmo tempo ligados, formando um novo painel, de maior espessura e resistência. O núcleo deste painel composto, pode ser um material de isolamento, tal como lã mineral, poliestireno expandido, etc., ou ligações mecânicas pontuais, deixando uma caixa-de-ar entre estes. Os painéis sandwich podem vir prontos de fábrica de tal modo que na obra se faça apenas a sua montagem, ou podem ser construídos em obra. Neste último caso as ligações entre painéis podem fazer-se por ligações pontuais de reforço estrutural da fachada e os intervalos desta preenchidos ou não por um material de isolamento.

Um outro aspecto importante a considerar nas fachadas leves, especialmente em climas com muita pluviosidade, são os problemas de condensações e de humidade estagnada na placa exterior, pelo que se torna recomendável que o revestimento exterior não seja o mesmo do painel exterior do composto sandwich, mas seja colocado afastado. Surge desta forma o painel triplo composto de um painel sandwich e dum painel de revestimento localizado pelo exterior da caixa-de-ar ventilada (Figura 4.2.3). Obtém-se assim uma solução de fachada tripla, que constitui, de entre as soluções de parede leve, o tipo mais adequado ao clima temperado, sendo por isso a mais divulgada, quer em construções de madeira, quer em construções metálicas, em Portugal. O sistema de caixa-de-ar ventilada exterior aplica-se

Placa aglomerado madeira/cimento
+ Caixa de ar
+ 2 Placas de Gesso cartonado

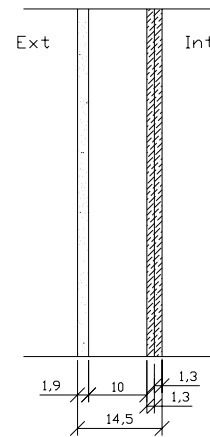


Figura 4.2.1. Parede dupla leve

Placa aglomerado madeira/cimento
+ Aglomerado negro de cortiça
+ Fibra de Côco
+ 2 Placas de Gesso cartonado

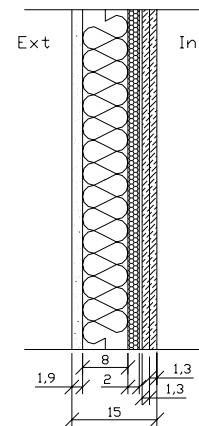


Figura 4.2.2. Parede dupla leve tipo painel sandwich

Placa de aglomerado madeira/cimento 12mm
+ Caixa de ar
+ Placa de aglomerado madeira/cimento 19mm
+ Aglomerado negro de cortiça
+ Fibra de Côco
+ Caixa de ar
+ 2 Placas de Gesso cartonado 13mm

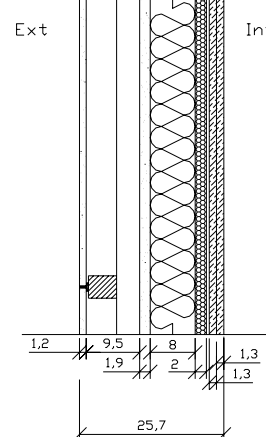


Figura 4.2.3. Parede tripla leve composta de painel sandwich e painel de revestimento ventilado

também no caso de paredes mistas, quando o pano de revestimento exterior é de um material que se degrada facilmente com o contacto prolongado com água, como as chapas metálicas ou os painéis derivados de madeira. Com esta solução, a circulação de ar permite que a humidade não se acumule, secando rapidamente o painel exterior. Por outro lado, esta solução também funciona melhor no Verão, para fachadas muito expostas ao Sol, não permitindo que o pano interior aqueça tanto, dissipando-se mais rapidamente o calor do revestimento.

4.2.1. Madeira

A presença da madeira em aplicações estruturais foi constante na construção em Portugal até finais do século XIX e princípio do século XX. Recorreu-se a ela desde as primeiras construções, quando os meios disponíveis eram escassos e continuou a estar presente em construções vernaculares.

Enquanto nos países frios e com abundantes florestas, nomeadamente os países nórdicos, a madeira constituía e constitui ainda a totalidade da estrutura e paramentos das construções, nos países com menores recursos em madeira, como o caso de Portugal, esta era utilizada maioritariamente nas estruturas e soalhos de pavimentos, nas estruturas de coberturas e em janelas e portas, onde ela se revelava insubstituível.

As utilizações estruturais da madeira são hoje em dia pouco comuns em habitação em Portugal. Actualmente, a sua utilização é maioritariamente não estrutural, em soalhos, parkets, portas e armários interiores, bem como em apainelados interiores e mesmo exteriores, normalmente contraplacados.

As paredes em reguados de madeira assentes sobre estrutura de madeira são características de algumas zonas litorais portuguesas, constituindo uma evolução das paredes de colmo descritas na secção seguinte. Nestas construções, a cobertura, continuou no entanto a ser de colmo, ou evoluiu, noutros casos, para a telha.

As vantagens que apresenta o uso da madeira estruturalmente são numerosas: a sua imediata capacidade para ser posta em carga, o bom comportamento à flexão, a facilidade que oferece para absorver defeitos de execução, o baixo peso próprio, além do aspecto ambiental. A energia incorporada é muito baixa, além de ser um material reutilizável, reciclável e biodegradável, quando se utilizam madeiras locais e pouco transformadas.

O uso estrutural da madeira apresenta no entanto algumas desvantagens, tais como: alguns problemas de durabilidade, ser desadequado para edifícios em altura, poder apresentar algumas deformações ao longo do tempo, ser combustível e necessitar manutenção periódica. Existem no entanto tratamentos e mesmo produtos derivados de madeira que apresentam características mecânicas e durabilidade muito mais elevada do que a madeira natural. Tal é o caso da madeira laminada colada e da madeira

laminada em tiras (PSL: Parallel Strand Lamber) e da madeira microlaminada (LVL: Laminated Veneer Lumber).

Não existem materiais estruturais alternativos à madeira que possam apresentar um melhor compromisso entre os desempenhos em ambiental, mecânico e estético, pelo que a sua utilização será sempre de considerar, especialmente em habitação unifamiliar ou em edifícios de pequena altura.

Far-se-á a distinção entre duas classes de paredes exteriores leves em madeira, que correspondem a uma evolução histórica dos sistemas construtivos:

- **Paredes maciças:** Tipo de paredes pouco comuns em habitação em climas temperados, já que, apesar duma resistência térmica que pode facilmente ser elevada, devido à baixa condutibilidade térmica, a ausência de massa, mesmo na construção tradicional, implica espessuras muito elevadas, além de ser difícil e caro conciliar num mesmo material as funções estrutural e de cerramento.
- **Paredes compostas:** Paredes mais comuns na construção leve tradicional, consistindo num material de suporte pontual com função estrutural e um material de cerramento diferenciados. A partir do fim do século XIX, a estrutura de madeira deu lugar a estruturas metálicas e de betão armado, ainda que no caso da habitação, a madeira continuasse a ser mais utilizada. Geralmente a estrutura de madeira fica no interior de dois materiais de cerramento que formam respectivamente a face interior e exterior da parede. Actualmente a caixa-de-ar entre estes dois panos é quase sempre preenchida com materiais de isolamento, ainda que em construções anteriores ao século XIX era frequentemente preenchida com materiais pesados, como a argila ou o tijolo, em sistemas mistos, como nos frontais (ver Capítulo III – secção 3.5.2.3).

4.2.1.1. Paredes maciças

No caso das paredes de madeira é complicado utilizar soluções de parede maciça, pois torna-se difícil garantir com esta solução resistência mecânica e estanquicidade, especialmente se falarmos a longo e mesmo a médio prazo. Existe no entanto uma solução de parede simples em madeira, que raramente se utilizou ou utiliza em Portugal, que são as chamadas paredes de troncos. É uma solução tradicional em países setentrionais com climas muito frios e abundantes bosques. Neste sistema, a utilização de madeira é muito intensiva, pelo que não é uma solução economicamente viável em zonas onde o recurso à madeira é mais escasso. Quando os troncos são dispostos horizontalmente, que é a solução mais comum, pode comparar-se a uma construção em alvenaria de blocos de grande dimensão.

Desde o ponto de vista estático a madeira utiliza-se duma forma pouco racional neste tipo de solução, já que não se aproveita a capacidade resistente no sentido longitudinal das fibras. A resistência da madeira é 20 a 30 vezes inferior transversalmente do que longitudinalmente. Existem alguns casos de colocações de

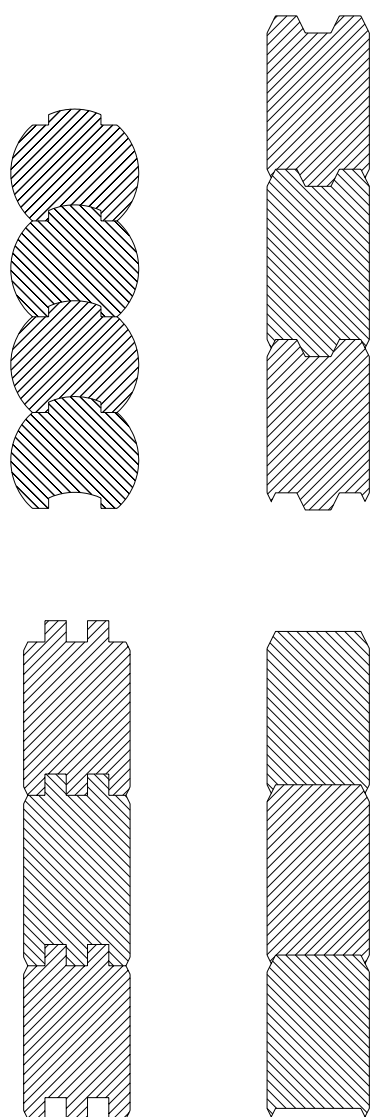


Figura 4.2.4. Secções tipo de paredes de troncos com encaixes

troncos verticais, que já exploram a capacidade resistente da madeira, neste caso por excesso.

A forma redonda e ligeiramente cónica dos troncos e a sua própria natureza orgânica dificulta a sua união e estanquicidade. Os diâmetros mais habituais de secção circular são 110, 120, 130, 140, 150, 170, 190, 210, 220 e 230mm (Peraza Sánchez 1995).

Numa evolução mais recente o tronco mecaniza-se e tende a formas mais quadradas, incrementando a superfície de encosto e melhorando a estabilidade e estanquicidade. As espessuras mais habituais de secção rectangular são 70, 95, 120, 145mm (Peraza Sánchez 1995).

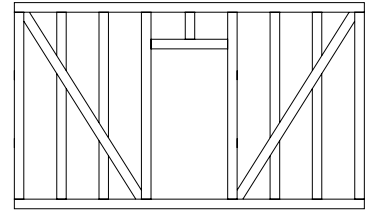
O comprimento das peças é variado, entre blocos de 120-150mm até troncos de 3 a 15m. Para permitir uma melhor união a seco ou a aplicação de material selante é possível fazer encaixes nas peças, que podem ser de diversos tipos, tal como se representa na Figura 4.2.4. Os materiais selantes utilizados actualmente são tiras de tela betuminosa ou fibras inorgânicas que substituíram os tradicionais orgânicos como a lã impregnada de resina, a corda ou o musgo.

4.2.1.2. Paredes compostas – Sistemas de reforço estrutural

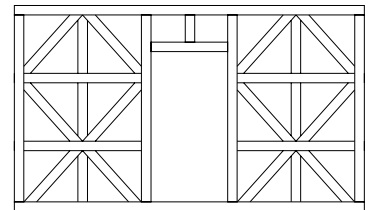
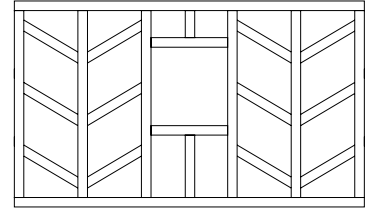
Os sistemas de reforço estrutural das paredes, também chamados de gaiolas, são necessários para estabilizar os materiais de cerramento, permitindo desta forma que a sua espessura seja mais reduzida. Também estes sistemas tiveram uma evolução, se bem que a grande transformação se operou depois da Revolução Industrial, tendendo a otimizar os sistemas, reduzindo o peso próprio. Faz-se assim aqui apenas uma distinção entre os sistemas de gaiolas anteriores ao século XIX (heavy timber) e os actuais (light framing). Em qualquer dos casos existem geralmente peças de suporte e peças de travamento (diagonais) formando as Cruzes de Stº André já referidas no Capítulo III, ou outros desenhos, os quais se exemplificam na Figura 4.2.5. As características dos sistemas de reforço são as seguintes:

- a) **Gaiolas de grande secção (heavy timber ou post and beam):** paredes com estrutura em barrotes de madeira travadas por peças estruturais de grande secção. O sistema de gaiolas é um sistema universal e presente em muitas épocas e áreas geográficas. Este sistema é o sistema tradicional, que se utilizava no Ocidente em todas as construções de madeira até ao século XIX e início do século XX e que, como já foi referido no Capítulo III, serviu para a reconstrução da Baixa Pombalina de Lisboa. Em Portugal, os intervalos livres entre a madeira, eram preenchidos com adobe, tijolo ou pedra, constituindo os já referidos tabique e frontal. As principais características deste sistema são as seguintes:
 - Utiliza-se a madeira como elemento estrutural puro, com a estrutura independente do cerramento e com os esforços no sentido longitudinal da madeira, aproveitando a sua maior resistência ou com sistema misto, onde a estrutura é preenchida com outro material, pesado e resistente à compressão - tabique;

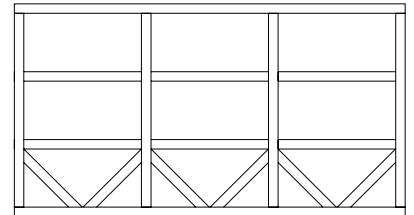
- Admite grandes vãos e permite construção em altura, até 6 pisos no caso de sistema misto tipo tabique;
- Utilizavam-se madeiras locais sem secar;
- Tradicionalmente as peças eram cortadas no local, mas actualmente são cortadas e preparadas industrialmente, sendo apenas montadas em obra;
- Permite uma fácil desmontagem e reutilização.



- b) **Gaiolas leves (light framing):** paredes com estrutura em régua de madeira ou derivados de pequena secção. Tem origem no sistema de gaiolas pesadas, mas baseia-se em peças mais ligeiras que compõem planos de parede estrutural que se suportam pela disposição em configurações de planos ortogonais. Esta é a solução que se revela mais económica, ainda que por si só não seja eficiente do ponto de vista acústico e térmico, essencialmente pela falta de massa, pelo que a introdução de isolamentos é necessária, mas nunca lhe confere inércia térmica. Por essa razão, num clima temperado será sempre recomendável utilizar esta solução em complemento com elementos pesados em sistemas de parede mista, que se referirão posteriormente noutra secção deste capítulo ou com lajes pesadas.



Este sistema tem a sua origem na América do Norte e surge no século XIX como consequência de dois factores: a disponibilidade de produtos industriais normalizados (madeira serrada e ferragens) e a necessidade de dispôr de um sistema rápido de construção para a colonização do Oeste dos Estados Unidos (Peraza Sánchez 1995).



As características deste sistema que o tornam distinto das gaiolas tradicionais são as seguintes:

- Criam-se estruturas modulares formando planos que ao unir-se funcionam como uma estrutura espacial;
- Emprega-se um grande número de elementos verticais (prumos), com uma diminuição das secções (as mais comuns são 38x89 e 38x140mm), pelo que se distribui e alterna as cargas através de muitos elementos, espaçados em média 40cm. Estima-se em 0,01m³ por m² (aprox. 5,5kg/m² em pinho) de fachada a contribuição destes elementos (em 38x89mm) neste sistema para fachadas estruturais, ainda que este valor possa variar em função do comprimento da parede, da existência de vãos, do tipo de vãos, do espaçamento entre os prumos, etc. Para fachadas não estruturais (apenas auto-portantes) estima-se em 0,007m³ por m² de fachada (em 38x89mm) (aprox. 3,85kg/m² em pinho);
- As peças costumam ser normalizadas, o que facilita a modulação, reorganização, reutilização e reduz custos;
- Uniões simples, sem juntas nem encaixes especiais, bastando o emprego de pregos e agrafos;
- Não exige mão-de-obra especializada, pelo que permite a auto-construção;
- O tempo de construção é reduzido pela pré-fabricação e montagem a seco;

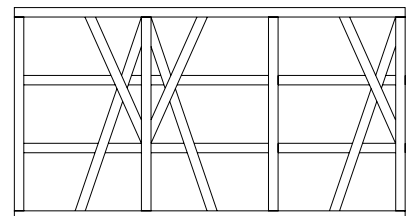
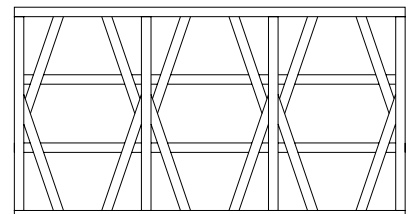


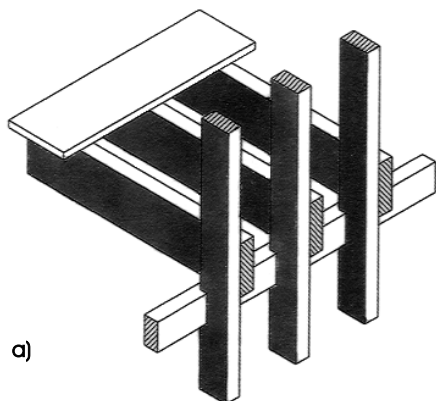
Figura 4.2.5. Exemplos de soluções de travamentos em paredes de gaiolas

- Pode construir-se em qualquer época do ano, ainda que se tenha que ter cuidado com o grau de humidade que pode criar variações dimensionais devido a dilatações.

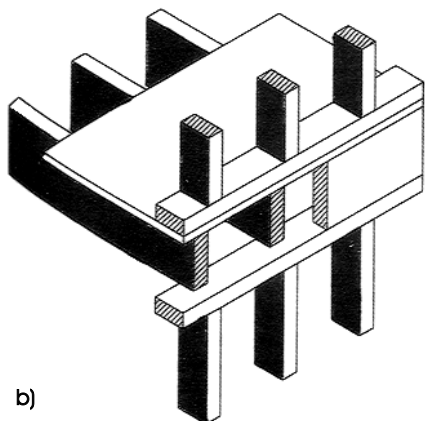
Existem dois tipos de sistemas construtivos de gaiola leve:

- **Tipo balão (balloon framed):** neste sistema os montantes das paredes exteriores são contínuos em toda a altura, e as vigas do pavimento fixam-se aos montantes, como se pode ver na Figura 4.2.6.a);
- **Tipo Plataforma (Platform system):** neste sistema, derivado do anterior a altura dos montantes coincide com a altura do pé-direito, como se pode ver na Figura 4.2.6.b), sendo mais fácil a montagem e apresentando uma maior flexibilidade.

As estruturas de madeira deverão ser protegidas pelo exterior com um papel respirante que proteja da água mas seja permeável ao vapor.



a)



b)

Figura 4.2.6. Sistemas construtivos de gaiolas leves: **a)** Tipo Globo e **b)** Plataforma (Peraza Sánchez 1995)

4.2.1.3. Paredes compostas - Sistemas de cerramento

Referimos anteriormente as soluções de reforço estrutural das paredes. O cerramento é o material ou os materiais que, como o nome indica, servem para cobrir e impermeabilizar a obra, incluindo o material isolante, e o eventual revestimento exterior (caso não cumpra também esse papel) e pode contribuir também como elemento de contraventamento do sistema de suporte estrutural. Far-se-á referência nesta secção aos painéis de madeira e derivados mais comuns no cerramento e acabamento de fachadas. Referem-se separadamente os painéis de cerramento das paredes e os acabamentos, já que estes poderão eventualmente ser em materiais distintos ou forrados com materiais distintos, que não madeira ou derivados desta, constituindo assim soluções híbridas. Por exemplo o cerramento e acabamento interior poderá ser em gesso cartonado, em contraplacado, em aglomerado folheado, em painel de aparas de madeira aglutinadas com cimento, etc. O acabamento exterior poderá ser em contraplacados especiais (marítimo), em reguados de madeira tratada, mas também em chapas metálicas, em painéis plásticos, etc., revestindo ou não os derivados de madeira. Os materiais de isolamento serão também tratados noutra secção, ainda que também façam parte do cerramento. Refere-se nesta secção apenas algumas características dos painéis de madeira e derivados.

Nas aplicações exteriores deverão ser sempre previstas juntas de dilatação com um mínimo de 2 a 3mm. Os painéis são geralmente colocados verticalmente, de forma a facilitar a colocação. No caso de colocação na horizontal, as juntas verticais deverão ser contrafiadas (Peraza Sánchez 1995).

Na Tabela 4.2.1 apresenta-se um resumo da separação mínima dos painéis de cerramento em madeira e derivados, bem como do Gesso cartonado para afastamentos de suportes entre 400 e 600mm:

Tabela 4.2.1. Espessura mínima de painéis de madeira e derivados para suportes espaçados 400 e 600mm

Tipo de cerramento	Suportes a 400mm	Suportes a 600mm
Painel contraplacado	6,0	7,5
Painel aglomerado	10,0	12,5
Painel de aparas de madeira (OSB)	6,35	7,9
Painel de fibras (MDF)	9,5	11,1
Painel aglomerado madeira/cimento	8*	32*
Reguado	17,5	17,5
Gesso cartonado	9,5	12,7

Fonte: (Canadian Wood-Frame Construction, 1991); *(Catálogo VIROC)

As características dos sistemas de cerramento (painéis e reguados) de madeira ou derivados desta são as seguintes:

a) **Painéis contraplacados:** os painéis de contraplacado são formados por camadas de madeira contrafiadas, com as fibras geralmente formando ângulos de 90° entre as distintas camadas. O painel fica definido em função de:

- Espécie ou grupo de espécies das madeiras utilizadas;
- Qualidade das chapas de madeira das duas superfícies, ainda que para algumas aplicações também se defina a das madeiras interiores;
- Tipo de colagem.

Existem várias classificações, nomeadamente as Americanas, as Finlandesas e as Europeias. A classificação em Portugal mais comum tem como base a americana e define quatro tipos de contraplacado: o marítimo (colado com resinas sintéticas próprio para exteriores), decorativos (para interiores), de cofragem (revestido a filme fenólico), anti-derrapantes (revestido a filme fenólico anti-derrapante) e suportes de solos. Além destes, a classificação americana refere ainda os estruturais, os interiores colados com colas para exteriores e os exteriores especiais ou recobertos. A classificação que se utiliza com mais frequência na Europa é a que se baseia na Norma EN 314.2, relativa ao lugar para os quais é apropriada a sua aplicação:

- Ambiente exterior não coberto (WBP e BR);
- Ambiente exterior coberto (semi-exterior, MR);
- Ambiente interior seco (INT).

As dimensões standardizadas na Europa são de 2500, 2100mm (comprimento) x 1500, 1250 ou 1050mm (largura) x 4 a 30mm de espessura.

Quando as folhas de madeira interior (3, 5 ou 8 folhas consoante espessura do contraplacado) são todas da mesma espécie diz-se contraplacado natural, quando são utilizadas espécies distintas diz-se contraplacado artificial. As espécies mais comuns utilizadas são o mogno e o pinho.

Nas faces exteriores podem ser utilizados diversos acabamentos, sendo geralmente utilizadas folhas de madeira envernizadas. Em contraplacados nacionais, as espécies de madeira mais utilizadas nas faces exteriores, que têm a função de acabamento, são as seguintes: mogno, tola, pinho, castanho, carvalho, eucalipto e okoumé

(www.jpleitao.pt e www.fa.utl.pt). Podem também ser utilizados outros acabamentos, como chapas metálicas.

A densidade do painel corresponde à densidade da madeira a partir da qual o contraplacado é feito. O valor mais comum é de 550 kg/m^3 . O $D_{n,w}$ para um contraplacado de 30mm de espessura é de 27dB(A) (Peraza Sánchez 1995).

b) Painéis aglomerados: os aglomerados, tal como os contraplacados, podem ser de várias qualidades e ter por isso várias aplicações, entre as quais (Peraza Sánchez 1995):

- Aglomerados para usos gerais;
- Aglomerados para utilização em ambientes secos interiores (incluindo mobiliário);
- Aglomerados para construção: a) em ambiente seco; b) em ambiente húmido (hidrófugos: de côr verde);
- Aglomerados especiais: a) estruturais de elevado desempenho; b) resistencia melhorada a ataques biológicos (insectos, xilófagos, fungos, térmitas, etc); c) ignífugos (M1, M2 ou M3: de côr vermelha); d) para isolamento acústico; e) outros.

Os aglomerados podem ser apresentados com as superfícies em bruto ou ter acabamentos superficiais, em uma ou nas duas faces, tais como:

- Bruto ou lixado;
- Folheados de madeira;
- Laminados decorativos de poliéster, PVC ou melamina;
- Papéis decorativos impregnados: papéis de densidades ligeiras e médias impregnados com melaminas;
- Lacas;
- Vernizes;
- Folhas de aço, cobre ou alumínio.

Os materiais utilizados no fabrico dos aglomerados são:

- Partículas de madeira (partículas, geralmente de pinho, choupo ou eucalipto, com uma relação entre o comprimento e a espessura da fibra entre 60/1 e 120/1);
- Colas (Urea-formol; Urea-melamina-formol; Fenol-formaldeído);
- Aditivos (ceras ou resinas, produtos ignífugos, insecticidas, fungicidas, endurecedores).

c) Painéis de aparas de madeira (OSB): os painéis de aparas de madeira são formados por aparas de madeira aglomeradas através duma cola a determinada pressão e temperatura. As aparas, colocadas sempre na horizontal do painel, podem ser orientadas aleatoriamente ou predominantemente numa direcção, neste último caso, o mais comum, chama-se painel de aparas de madeira orientadas e tem o nome de OSB (oriented strand board). No OSB as aparas têm um comprimento de 80mm e uma espessura inferior a 1mm. No painel normal têm um comprimento de 30mm e uma espessura de 1mm.

A norma EN 300 considera quatro tipos de painéis OSB:

- **OSB/1:** Pannel de uso decorativo para ambientes secos (inclui mobiliário);
- **OSB/2:** Pannel portante para ambientes secos (interiores);
- **OSB/3:** Pannel portante para ambientes húmidos (semi-exterior);
- **OSB/4:** Pannel altamente portante para ambientes húmidos (semi-exterior).

O acabamento pode ser pintado, tingido ou envernizado.

As dimensões usuais na Europa são 2440 x 1220mm.

Relativamente à densidade, a única exigência da Norma EN 300 é que a variação da densidade no interior do pannel seja inferior a 10%. Como recomendação os painéis de OSB utilizados em construção deverão ter como mínimo uma densidade de 650kg/m³.

d) **Painéis de densidade média (MDF):** os painéis de fibras de madeira de densidade média, mais conhecidos por MDF (Medium Density Fibre) podem ser classificados segundo a sua aplicação nos seguintes tipos:

- Painéis para utilização em ambientes secos (incluindo mobiliário): MDF normal;
- Painéis para utilização em ambiente húmido: MDF-H (hidrofugados, apresentam coloração verde);
- Painéis estruturais para utilização em construção: a) MDF-LA; b) MDF-HLS.

Os painéis de MDF podem ser apresentados com as superfícies em bruto ou ter acabamentos superficiais, em uma ou nas duas faces, tais como:

- Folheados de madeira;
- Laminados decorativos de poliéster, PVC ou melamina;
- Papéis decorativos impregnados: papéis de densidades ligeiras e médias impregnados com melaminas;
- Lacas;
- Vernizes;
- Folhas de aço, cobre ou alumínio

O comportamento ao fogo dos painéis de MDF é M4 para espessuras inferiores a 14mm e M3 para espessuras superiores a 14mm.

Os painéis de MDF podem também ser aditivados com produtos químicos que lhe conferem: resistência melhorada a ataques biológicos (insectos, xilófagos, fungos, térmitas, etc); ignifugados (M1, M2 ou M3: de cor vermelha); maior resistência (endurecedores).

As dimensões dos painéis são normalmente: 3660 x 1830mm. As espessuras podem variar de 3 a 50mm em módulos de 1mm.

- e) **Placas de elevada densidade (Platex):** o Platex é caracterizado por ter uma densidade entre 800 e 1000kg/m³. As fibras podem ser aglutinadas com uma cola a seco, ou apenas prensadas num processo húmido.

As fibras mais utilizadas são as de madeira de pinho, de eucalipto, de choupo e, frequentemente, utilizam-se igualmente resíduos vários de outros materiais.

A reacção ao fogo do Platex sem tratamento ignífugo é M4 ou M3. Ignifugados podem chegar a M2 ou M1.

Os painéis de Platex podem também ser aditivados com produtos químicos que lhe conferem: repelência à humidade (ceras); resistência melhorada a ataques biológicos (insectos, xilófagos, fungos, térmitas, etc.); maior resistência (endurecedores).

As medidas mais habituais são (2440) x (1830), 1500, 1250, 1220mm, (2750) x (1830), (1250), 1220mm. As espessuras são geralmente reduzidas 2,5; (3,2); (4); (5); 6; 6,4 e 8mm. Em Portugal estão disponíveis as medidas entre parênteses.

- f) **Painéis de partículas de madeira aglutinadas com cimento:** estes painéis de cor cinzenta são fabricados com uma mistura de partículas de madeira e cimento Portland submetidos a uma elevada pressão. A densidade é de 1100 a 1400kg/m³. Para efeitos de cálculo considerou-se 1350kg/m³ (www.viroc.pt).

As medidas disponíveis no mercado português são: 3200x1250 (por encomenda), 3050x1250, 2600x250 e 2440x1220mm. As espessuras em bruto são: 8, 10, 12, 16, 19, 22, 25, 32, 40 e 42mm (Catálogo Viroc).

A reacção ao fogo é M1, constituindo uma das suas principais vantagens relativamente aos outros painéis próprios para exteriores.

O $D_{n,w}$ é de 30dB(A); painel 8mm; 32dB(A); painel 10mm; 35dB(A); painel 19mm;

- g) **Reguados de madeira:** os reguados de madeira são uma solução tradicional de cerramento exterior e interior em madeira.

No caso dos cerramentos interiores e também no caso dos cerramentos exteriores para aplicação posterior de um revestimento impermeabilizante independente de acabamento, como chapas metálicas, telas, etc., as exigências quanto ao tipo de madeira e sistema de aplicação são relativamente reduzidas. Neste caso terá apenas de se ter em atenção as dilatações normais da madeira, bem como a forma de aplicação e espessura mínima. No caso da sua utilização estrutural, a função de

travamento da estrutura de suporte pode ser conseguida pela colocação em diagonal dos reguados (a 45°).

Para aplicações exteriores estes perderam implantação em Portugal e na generalidade dos países do Sul da Europa, devido aos problemas de durabilidade que tornam necessária muita manutenção periódica, especialmente em climas alternadamente chuvosos e com muita exposição solar. A sua utilização continua no entanto a ser feita, especialmente em soluções pré-fabricadas. Este sistema é característico de países como os Estados Unidos e o Canadá e no Norte da Europa, em zonas de pouca pluviosidade. As madeiras mais utilizadas em exteriores são as coníferas: Pinho, Cedro, Abeto, etc.

A forma mais usual de colocação dos reguados com função de revestimento é dispostos horizontalmente, com uma inclinação de modo a que a face inferior fique sempre sobreposta à face superior da régua situada abaixo, de modo a criar uma melhor impermeabilização, como no exemplo da Figura 4.2.7. Também é possível colocar verticalmente, no entanto, para permitir absorver as dilatações é sempre necessário criar alguma sobreposição de junta, a não ser que as tábuas fiquem afastadas, mas nesse caso tem-se uma câmara de ar totalmente exposta, pela que a solução de impermeabilização terá de ser feita no pano de parede interior.

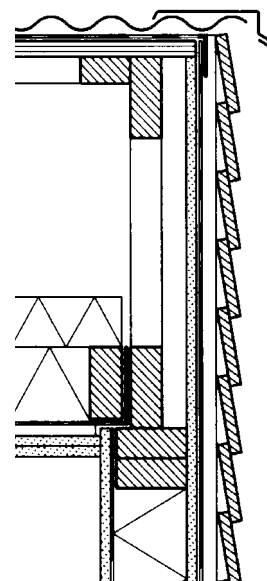


Figura 4.2.7. Edifício de habitação em Munique de Meyer-Sternberg, fotografia de vista exterior e pormenor da fachada (Detail 1997)

- h) **Cerramento de colmo:** apesar de não ser propriamente uma madeira, o colmo é um material vegetal, pelo que se optou por colocá-lo nesta secção. As paredes de colmo em Portugal são características de populações piscatórias, pelo que se localizam principalmente junto ao litoral. Desenvolveram-se em Ílhavo e Aveiro, provavelmente antes do século XIX. Toda a cabana era feita com material existente no local: a armação estrutural era feita em madeira de pinho, sendo as paredes e a cobertura fabricadas com caniço e estorno. O revestimento era feito de várias formas, consoante o período em que eram construídas: nos primórdios, as ripas de cana eram amarradas ao lado exterior dos espeques (prumos constituintes do esqueleto da cabana, que se espetavam no chão), com um afastamento médio de 0,40m, contra as quais se fixava o mato (bracejo, junco ou, de preferência, caniço) cozido a ponto, sempre e necessariamente abundante no local da construção. Desde o início da década de 40, este sistema de revestimento passou a ter mais um componente: o barro, que revestia a face interior das paredes.

4.2.2. Metal

Os metais, essencialmente o aço e o alumínio, podem ser usados quer em estruturas quer em cerramento de paredes.

As estruturas metálicas são relativamente recentes na história da construção, tendo apenas surgido no século XIX com a Revolução Industrial. Antes desta data os metais eram usados pontualmente, essencialmente em ferragens, mas não estruturalmente. Todos os tipos de perfis metálicos são recicláveis e mesmo reutilizáveis, quando fixos mecânicamente, o que sucede na maior parte dos casos. Serão soluções preferíveis em edifícios de grande altura, tornando-se até, por vezes, nos únicos viáveis. Para edifícios de pequena altura, até dois pisos, será sempre preferível a madeira, sob o ponto de vista ambiental, ainda que sob o ponto de vista económico as estruturas metálicas leves sejam competitivas, nomeadamente as de perfis de aço galvanizado (LGSF – Light Gauge Steel Framing).

Os revestimentos metálicos são mais antigos na história da construção, já que eram utilizados, essencialmente em coberturas, muito antes da Revolução Industrial. Os painéis metálicos podem ser também combinados com os painéis de madeira e derivados e os de gesso cartonado, em múltiplas soluções, nas quais entram actualmente também os plásticos. Referiremos apenas aqui as soluções mais comuns da construção de fachadas metálicas. As chapas metálicas também são reutilizáveis e recicláveis, no entanto o desgaste impede na maior parte dos casos a sua reutilização. A reciclagem é sempre possível, ainda que acabe por ser um processo com um gasto de energia bastante grande, especialmente no caso do alumínio.

Em painéis, a elevada resistência específica dos metais permite que a utilização de material seja mínima para cumprir a função a que se destinam, ainda que, para paredes facilmente acessíveis, a resistência necessária inviabilize esta solução, em detrimento de painéis de maior espessura, como os contraplacados marítimos ou os painéis de aglomerado de cimento/madeira. A criação de nervuras, na superfície das chapas, é uma medida capaz de permitir o aumento da resistência sem incrementar a espessura e o peso, pelo que as chapas onduladas ou quinadas são soluções mais eficientes do ponto de vista ambiental do que as chapas lisas. Nas chapas lisas, bem como nas nervuradas, pode sempre utilizar-se o sistema sandwich para aumentar ainda mais essa eficiência, ainda que neste caso a reciclagem se torne mais difícil, dependendo do tipo de aderência entre o material do núcleo e a chapa.

4.2.2.1. Paredes compostas – Sistemas de reforço estrutural

Tal como nas paredes de fachada compostas de madeira, as chapas metálicas por si só não têm grande capacidade resistente. Por questões económicas é normal reforçar as chapas através de quinagens ou prensagens, conferindo-lhe uma ondulação ou um reforço lateral. Também é possível utilizar soluções de painel sandwich. Em qualquer dos casos, e, tal como nas construções de madeira, por questões económicas de optimização, nas construções metálicas, tem geralmente de se considerar um sistema de reforço estrutural. O reforço pode servir apenas para tornar a fachada auto-portante, vencendo a distância entre lajes de piso e tecto ou fazer parte de um sistema construtivo, onde a

própria parede é um elemento resistente de suporte da construção. Para o reforço estrutural podem ser utilizados perfis estruturais standard pesados (em ferro), tubos, perfis extrudidos de alumínio, perfis em chapa de aço galvanizado moldado, ou combinações destes entre si ou também com madeira e plásticos. Vários fabricantes propõem sistemas, nomeadamente em alumínio.

- a) **Estruturas metálicas pesadas em perfis de ferro.** As soluções em perfis de ferro tipo "HPN", "IPN", "L" são concebidas caso a caso. O grau de variação é muito grande, não sendo possível definir um valor fixo para o peso destas estruturas. A flexibilidade e a facilidade com que poderão ser reutilizados é outro aspecto vantajoso sob o ponto de vista ambiental, se forem utilizadas fixações mecânicas, além de que os perfis são relativamente normalizados. A reciclagem também é possível e quase sempre feita, já que o valor de retoma da sucata de ferro é elevado.
- b) **Estruturas metálicas leves em alumínio.** Estes sistemas, ainda que não sendo comuns em construção civil, podem ser aplicados em soluções completas de exterior. Ao ser um material de grande energia incorporada e custo elevado, a sua única vantagem está no reduzido peso e facilidade de montagem, o que pode tornar estas soluções vantajosas. A flexibilidade e a facilidade com que poderão ser reutilizados e montados noutro local, pelo baixo peso e por serem utilizados sistemas de encaixe e fixações mecânicas, poderá ser uma vantagem. O problema é que os perfis não podem ser estendidos por soldagem, pelo que se torna difícil reaproveitá-los com outras dimensões. A reciclagem também é possível e quase sempre feita, já que o valor de retoma da sucata de alumínio é elevado.
- c) **Estruturas metálicas leves em aço galvanizado (LGSF – Light Gauge Steel Framing).** O sistema LGSF é um sistema que permite a execução completa de edifícios de até dois ou três pisos de altura. O sistema inclui paredes interiores, exteriores, lajes e coberturas, mas aqui só nos importam os dados referentes às paredes exteriores, objectos centrais deste estudo. Os perfis utilizados no sistema LGSF são de aço galvanizado de tipo Fe 280 ou Fe 360, obtidos a partir da moldagem a frio de chapa de reduzida espessura, resultando por isso num peso por metro linear relativamente baixo, sendo mesmo inferior a peças de madeira de resistência equivalente, o que torna o sistema competitivo sob o ponto de vista de energia incorporada e custo de montagem. A secção das peças utilizadas tem a forma "U", "C" ou "Z", como se pode ver na Figura 4.2.8, podendo a altura variar entre os 90 e os 140mm e a espessura entre 0,2 e 2mm em paredes, consoante dimensionamento para cada situação particular e podendo ser superiores em pavimentos. Outra vantagem do sistema LGSF, do ponto de vista ambiental, é a possibilidade de ligação mecânica entre os elementos, sendo feita por aparafusamento com parafusos auto-perfurantes e auto-roscantes. Tal sistema permite o fácil desmantelamento da obra e dessa forma posterior montagem noutro local (reutilização) ou eventuais ampliações / transformações do edifício no mesmo local,

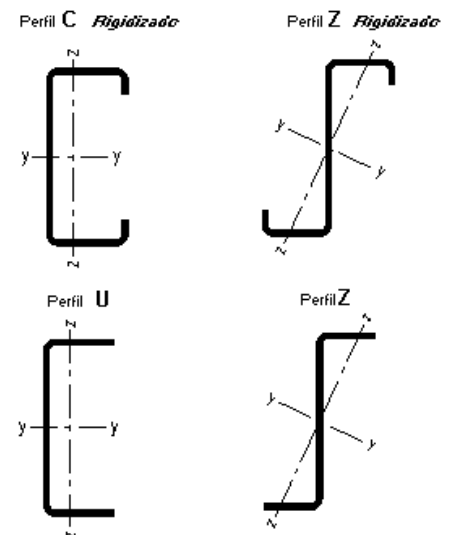


Figura 4.2.8. Secções de perfis em aço galvanizado (ERFI 2003)

Reboco armado
 + Poliestireno expandido
 + Placa aglomerado madeira/cimento
 + Aglomerado negro de cortiça
 + 2 Placas de Gesso cartonado

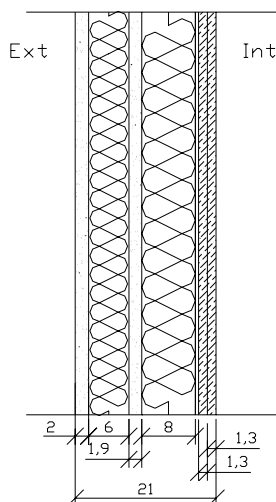


Figura 4.2.9. Parede dupla leve com reboco plástico armado sobre isolamento aderido

sem desperdícios. As paredes exteriores em sistemas LGSF podem ser de vários tipos, tal como nos sistemas de madeira. Será no entanto recomendável a utilização de pelo menos duas placas de Gesso cartonado pelo interior (por questões de protecção ao fogo dos perfis, desempenho acústico e também mecânico), bem como a colocação de um material absorvente acústico no preenchimento da caixa-de-ar (geralmente lã mineral, mas também poderá ser utilizado aglomerado de cortiça expandida e fibra de côco). Estes materiais também contribuem para o isolamento térmico da solução.

O painel utilizado pelo exterior é geralmente o painel de OSB, mas também pode ser utilizado o painel aglomerado de madeira/cimento, tendo este a vantagem de oferecer protecção ao fogo também pelo exterior. O revestimento exterior deverá ser colocado com uma caixa-de-ar ventilada, para materiais como chapas metálicas, contraplacados para exteriores ou plásticos, mas também pode ser utilizada a solução de isolamento aderido pelo exterior (Sistema Cappotto), com Poliestireno expandido (EPS) e acabamento por reboco plástico armado (Figura 4.2.9), obtendo-se um aspecto semelhante a uma construção de alvenaria rebocada convencional.

4.2.2.2. Fachadas compostas – Sistemas de cerramento

Chapas metálicas: apesar de serem um material comum para o revestimento exterior de coberturas, são um material pouco comum na construção integral de paredes de habitação permanente. No entanto, a sua utilização em soluções de ampliação (recuados ou varandas envidraçadas) era bastante comum já no século XIX, ainda que exclusivamente para revestimento exterior, como se mostra no exemplo da Figura 3.1.11.

Os painéis sandwich metálicos são uma evolução do sistema composto, onde o sistema de reforço estrutural e o sistema de cerramento se concentram num único painel. A resistência dos painéis sandwich limita-se geralmente a ser auto-portante e vencer a altura de um piso, tendo de ter pontos de fixação das lajes de piso e tecto. Tal não significa que teoricamente não se possa construir totalmente com base em painéis sandwich estruturais, mas estes sistemas não estão disponíveis no mercado numa forma standardizada.

4.2.3. Placas de Gesso cartonado

Os painéis de gesso cartonado são os painéis mais comuns em construção para utilização no interior, pela sua rapidez de instalação e pelo acabamento liso e pronto a receber pintura, da sua superfície. Além destas vantagens, é resistente ao fogo, pelo que se torna ideal para aplicações interiores em edifícios com estruturas que devam ficar protegidas, como o caso da madeira ou do aço.

O painel de gesso cartonado está formado por uma alma em gesso revestido nas faces por papel forte e proporciona um acabamento liso semelhante ao estucado. Os seus bordos apresentam-se mecanizados para receber a peça contígua e a junta (Peraza Sánchez 1995).

Ainda que o painel de gesso cartonado seja incombustível (M1) e proporcione alguma protecção ao fogo, a sua resistência pode incrementar-se com a adição de produtos químicos ou fibra de vidro na pasta de gesso. Neste caso temos um material compósito, com outras características, nomeadamente maior dificuldade de reciclagem (será referido na secção seguinte, que trata materiais compósitos). O painel tratado (M0) utiliza-se apenas em solicitações especiais, sendo que no caso de habitação apenas se torna necessário em garagens ou em paredes de meiação com exigências especiais de corta-fogo.

Existe também um tratamento para tornar o painel hidrófugo, para utilizações interiores em zonas húmidas da habitação, como Cozinhas e Casas de Banho e eventualmente zonas exteriores protegidas (por exemplo tectos exteriores). A resistência à água obtém-se através duma emulsão de cera asfáltica que se combina com o gesso.

As dimensões mais comuns são 3000; 2800; 2700; 2600; 2500; 2400; 2000mm (comprimento) x 1200mm (largura) x uma espessura que pode variar entre 6,5; 10; 13; 15; 18; 19mm; 25mm (www.uralita.com).

A colocação pode fazer-se horizontal ou verticalmente (Figura 4.2.11). No primeiro caso apresenta a vantagem dum menor número de juntas verticais, mas necessita travessas se a separação entre montantes for superior a 400mm (Peraza Sánchez 1995).

Os painéis podem ser fixos mecanicamente, no entanto a sua reutilização é quase sempre impossível, já que as fixações, bem como as juntas ficam ocultas pelo emassado e fita de papel e tornam-se assim praticamente invisíveis após o acabamento final, se este for bem executado. A reciclagem é possível, ainda que geralmente não se faça por questões económicas, sendo difícil separar o cartão do gesso, pelo que normalmente os resíduos vão para aterro. Tem no entanto sempre a vantagem de ser muito menor quantidade de material de resíduo do que na solução convencional de alvenaria de tijolo.

Existem diversas soluções no mercado de divisórias interiores com estrutura em perfis de aço galvanizado (também se pode utilizar madeira) e acabamento a gesso cartonado, podendo esta solução ser também utilizada na face interior da parede exterior ou formando ela mesma o suporte da parede exterior, em soluções de vários tipos, na maior parte dos casos com utilização de um material de isolamento acústico na caixa-de-ar. Nas soluções de fachada exterior terá, no entanto, de se aplicar outro tipo de painel, com mais resistência em termos de humidade e mecânica, sendo frequente a utilização de OSB ou de Aglomerado de

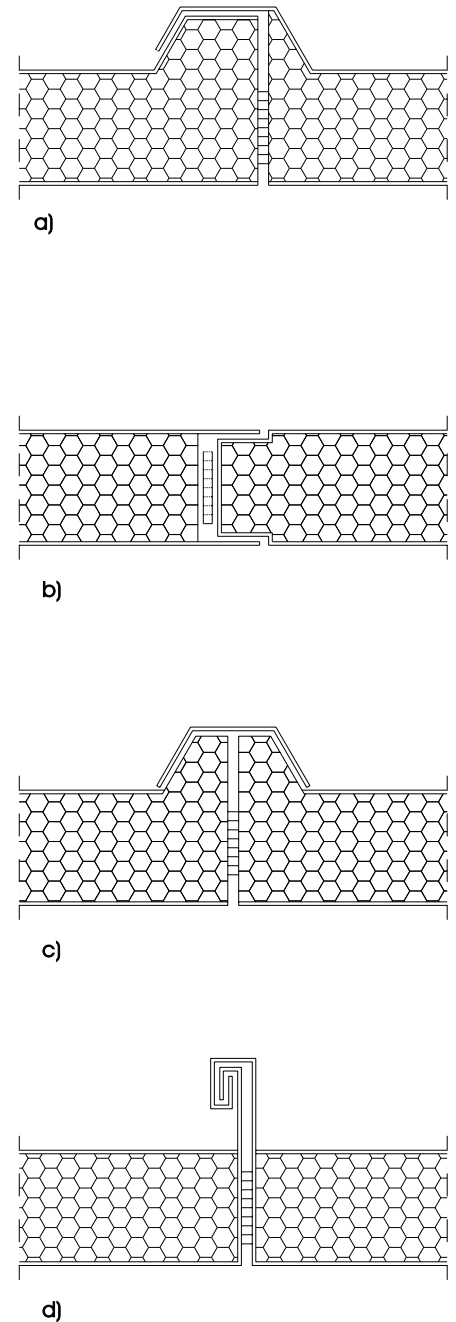


Figura 4.2.10. Sistemas de detalhe de juntas para painéis sandwich. (a) sobreposição das folhas metálicas exteriores; (b) junta de encaixe; (c) peça de fecho; (d) junta selada à máquina

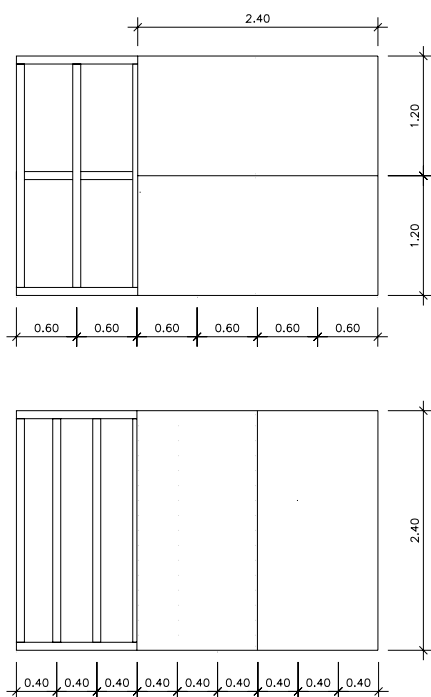


Figura 4.2.11. Colocação horizontal e vertical de placas de Gesso cartonado

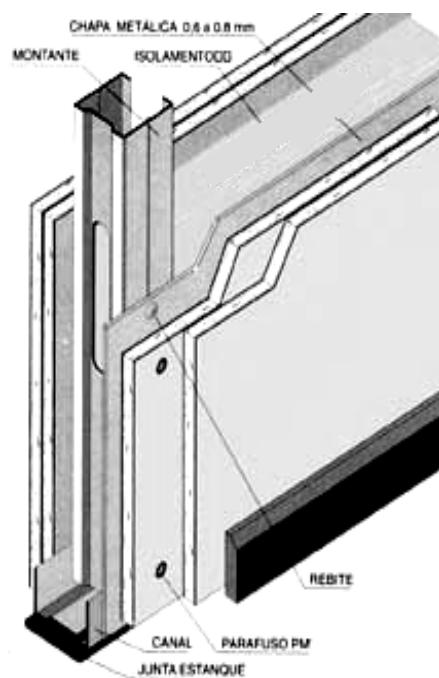


Figura 4.2.12. Divisória interior em Gesso cartonado com estrutura em perfis de aço galvanizado (Iberisol 2003)

Madeira/Cimento. Será conveniente aplicar igualmente um papel respirante no exterior da caixa-de-ar, para proteger o isolamento bem como as placas de gesso cartonado das infiltrações de água exteriores.

Para efeitos de protecção ao fogo, de isolamento acústico e de resistência mecânica é recomendável a duplicação dos painéis em cada face, como se mostra na Figura 4.2.12.

4.2.4. Polímeros e Materiais Compósitos

Os Polímeros constituem o grupo de materiais que se pode chamar de “novos materiais”. Os compósitos são polímeros cujas propriedades foram optimizadas pela adição de outros materiais que lhe conferem características distintas do material inicial. São caracterizados por serem materiais compostos por uma matriz termooestável, como uma resina ou polímero e um material de reforço, uma fibra, tal como a fibra de vidro. Os polímeros e os compósitos podem ser utilizados em fachadas das seguintes formas (Miravete 1994):

- Apainelados (isolamento pelo exterior, sem estrutura de suporte, composto do painel e eventualmente de material isolante, fixos directamente à parede interior;
- Cobrimento (simples revestimento com a pele do painel sobre isolamento já existente ou sobre parede que não necessita isolamento);
- Revestimento (fixo a uma estrutura de suporte com isolamento montado);
- Fachadas cortina.

São materiais com propriedades mecânicas e físicas em geral superiores aos materiais convencionais que substituem, no entanto apresentam em quase todas as situações uma elevada energia incorporada e poucas possibilidades de reciclagem, especialmente no caso dos compósitos. Ainda que nalguns casos possam ser reutilizados, a sua aplicação será sempre de ponderar, ainda que o custo económico e o desempenho possam ser competitivos.

A durabilidade é um aspecto relacionado com a maioria das propriedades físicas, mecânicas e estéticas e é por isso uma das qualidades mais importantes a considerar em materiais de construção. No caso dos polímeros, torna-se necessário que estes revelem um grau de resistência à acção degradante do clima e que sejam, em certo grau, quimicamente inertes. As suas superfícies e propriedades mecânicas devem ser correctamente ponderadas (Miravete 1994).

Os reforços mais vulgarmente utilizados encontram-se sob a forma de partículas ou em estrutura fibrosa (Miravete 1994). Nos primeiros, as partículas de um material ou materiais específicos estão misturadas ou coladas entre si mediante uma matriz contínua (o polímero) com um baixo módulo de elasticidade. Na indústria da construção, a fibra de vidro (ou a fibra de carbono, de aramida, ou

a combinação de ambas para obter uma fibra híbrida) e o polímero de poliéster (ou epoxi), utilizam-se para formar um material compósito fibroso. O resultado recebe o nome de poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV) ou, mais genericamente, polímero reforçado com fibra (PRF). A produção de resinas, catalizadores e aceleradores, com cura a temperatura ambiente, facilitou o fabrico de PRFs, mediante técnicas relativamente directas, utilizando os processos de molde aberto sem necessidade de utilizar prensas ou moldes de aço (Miravete 1994).

Existem dois conceitos distintos de compósitos (Miravete 1994):

- os plásticos reforçados convencionais. Os laminados de mat e tecidos de "roving" utilizados por exemplo em painéis ondulados são exemplos de plásticos reforçados convencionais;
- os compósitos avançados. Um material compósito avançado é aquele em que o reforço está situado no interior da secção para melhorar as suas características e além disso está instalado para otimizar o desenho e as propriedades mecânicas da estrutura. Pode constituir uma mistura de diferentes formas de reforço para superar tensões internas, com um resultado final de elevada resistência.

Além das boas propriedades mecânicas e baixo peso, os materiais compósitos possuem outras características que aumentam as potencialidades da sua utilização. Actualmente, a resistência à corrosão é o principal motivo de se optar por estes materiais (Miravete 1994), mas também as suas propriedades de transmissão da luz e radiação térmica são aspectos importantes.

As matérias-primas base para a elaboração dos compósitos são normalmente fabricadas por grandes empresas multinacionais, enquanto os fabricantes dos produtos finais tendem a ser pequenas e médias empresas.

Os poliésteres encontram-se entre as resinas existentes de mais baixo custo e utilizam-se extensamente no PRFV para aplicações estruturais de construção industrial que requerem resistência à corrosão a temperaturas abaixo dos 60°C. Os vinilésteres têm uma resistência e retenção da rigidez mais elevada a temperaturas de até 90°C, uma resistência química superior e alongamento de 4%, o que é compatível com a fibra de vidro (Miravete 1994).

Costumam acrescentar-se aditivos à resina para conseguir determinadas propriedades. Os aditivos mais comuns são os retardantes de chama, mas podem causar a redução da resistência à corrosão, da resistência mecânica e da estabilidade aos ultravioletas. Podem também acrescentar-se outras partículas, tais como outras fibras, com o efeito de melhorar a rigidez, a resistência ao impacto, a redução da contracção durante a cura, bem como para reduzir o custo.

Os processos de fabrico dos plásticos reforçados com fibra dependem da sua função, tamanho, quantidade, acabamento e considerações de custo. Os mais usuais são (Miravete 1994):

- **Contacto:** o mais simples e versátil processo de fabrico, mas relativamente lento e dependente da qualidade da mão-de-obra. Tem a vantagem duma quase completa liberdade na colocação da fibra e no corte da secção transversal e conseguir espessuras pequenas;
- **Laminado contínuo:** é um processo apropriado para a produção de chapas onduladas de qualquer comprimento mas de espessura limitada;
- **Transferência de resina:** é um processo de moldagem fechado apropriado para formas estruturais complexas que requerem bom comportamento e acabamento de superfície;
- **Extrusão:** ideal para peças que têm uma secção transversal constante, tais como perfis, postes, varões, secções tubulares e painéis. Podem obter-se dimensões precisas, bem como uma elevada resistência longitudinal e rigidez. A maior dificuldade é nas uniões, que podem ser aparafusadas, rebitadas ou coladas.

Podem distinguir-se dois tipos fundamentais de configurações de fachadas realizadas com compósitos:

- **Fachadas rígidas (painéis):** onde pode haver distintas soluções estruturais:
 1. Laminados de fibra de vidro e matriz termoestável;
 2. Placas onduladas de fibra de vidro E, com resina de poliéster ou fibra de vidro AR com betão;
 3. Painéis sandwich "honeycomb", normalmente em polipropileno;
 4. Termo-moldados de termoplásticos reforçados com fibra de vidro dispersa, normalmente policarbonato.
- **Fachadas flexíveis (membranas ou telas):**
 1. Metalo-têxtil, onde tecidos de fibra de vidro ou de poliéster combinados com uma matriz termoplástica, como o PTFE ou o PVC, são suportados mecanicamente por uma estrutura metálica, de madeira ou betão armado e por vezes reforçada por cabos metálicos;
 2. De membrana flexível / betão, onde o betão se cobre com uma membrana tecida de poliéster / PVC.

4.2.4.1. Painéis simples

Os painéis são cada vez mais utilizados em construção, nomeadamente porque o custo da mão de obra implica cada vez mais uma maior industrialização dos sistemas construtivos e o factor peso joga um papel fundamental. Em muitos casos novos materiais são utilizados em substituição de outros com vista à redução do peso, mas tentando manter o mesmo aspecto. Alguns exemplos de aplicação de painéis são (Miravete 1994):

- Acabamento em pedra natural - sistema de painel que consiste, em secção do exterior para o interior: numa fina camada de pedra ou mármore colada, uma camada de poliéster/fibra de vidro impregnada, uma camada dum componente de baixo custo (uma mistura de cola e poliéster) e, na parte de trás, uma camada de laminado de poliéster/fibra de vidro. A impregnação e a polimerização realizam-se mediante uma simples operação;

- Estrutura sandwich fabricada a partir de duas folhas de material compósito de fibra de vidro/cimento, com um núcleo de poli-isocianato e uma lâmina de pedra ou acabamento em PVC;
- Elementos modulares combinando um painel isolante com uma pele de material compósito moldado e pigmentado a imitar pedra ou betão;
- Painéis fabricados com um componente de poliéster reforçado com fibra de vidro, utilizando a moldagem por injeção, compressão ou injeção/compressão. Podem utilizar-se em aplicações de revestimento, laminado ou apainelado. O grão é produzido pelo molde e é possível a pigmentação, imitando pedra, betão, etc. Consistem geralmente em módulos pequenos (menos de 1m²), fáceis de instalar e que permitem a adaptação a qualquer medida possível;
- Sistema de painel com uma fina película de mármore ou pedra polida, colada a um laminado rígido com núcleo "honeycomb" e uma pele em fibra de vidro impregnada de poliéster;
- Shingles: estes elementos, usados geralmente para tectos, também se podem utilizar em paredes;
- Laminados translúcidos lisos ou ondulados: estes elementos de revestimento consistem em folhas de poliéster reforçadas com fibra de vidro, lisos ou perfilados, em forma de rolo ou folha;
- Laminados opacos resistentes ao fogo do mesmo tipo dos referidos antes.

Melhores métodos e materiais utilizados no fabrico de painéis de polímeros termoestáveis reforçados com fibra de vidro, os mais comuns, e uma maior predisposição, por parte dos projectistas e donos de obra para a sua utilização, impulsionaram o crescimento da sua produção em países mais industrializados. Os painéis podem enviar-se para o estaleiro da obra prontos a serem instalados rapidamente no edifício, com os pontos de fixação e com dispositivos incorporados neles, tais como os marcos das janelas e portas, os isolamentos de espuma ou fibra. Podem servir apenas como material de revestimento exterior ou chegar mesmo a constituir por si só a pele exterior do edifício, fixos directamente à estrutura. Existem quatro tipos fundamentais de painéis compósitos, que se descrevem seguidamente e se mostram na Figura 4.2.13:

- Painel monolítico de materiais compósitos de matriz termoestável, normalmente resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, apesar de existirem obras de grande dimensão onde se utilizaram resina de epoxi reforçada com fibra de carbono;
- Configuração "sandwich", com núcleo de poliestireno expandido, poliuretano ou policloreto de vinilo ou "honeycomb";
- Painel termoconformado de um termoplástico, normalmente policarbonato reforçado com fibra de vidro disperso e que ocasionalmente pode encher-se com espuma de poliuretano;
- Painel de betão reforçado com fibra de vidro AR ou Gesso reforçado com fibra de vidro.

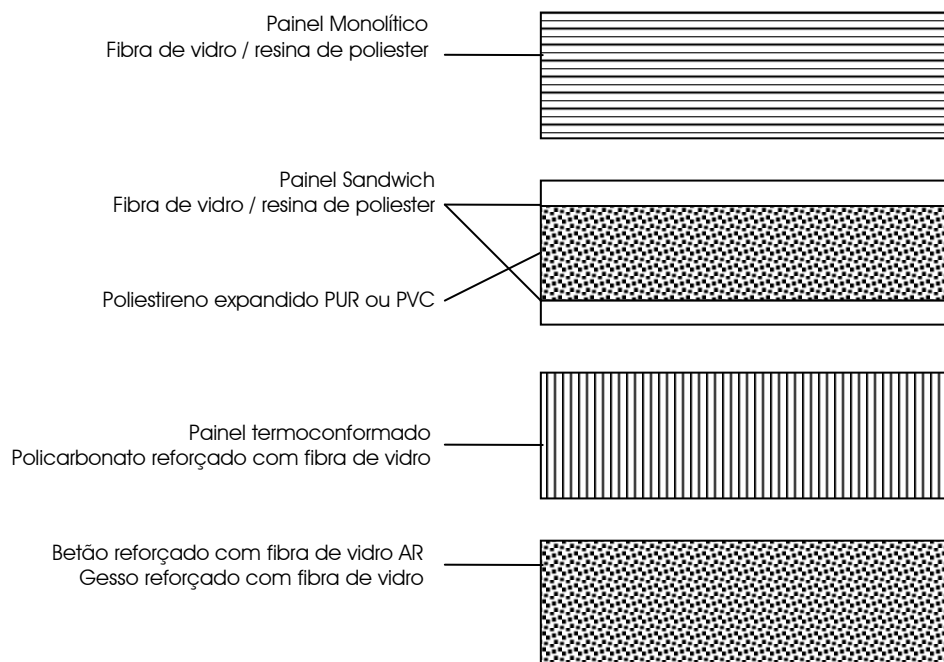


Figura 4.2.13. Painéis compostos de base polimérica mais comuns (Miravete 1994)

As primeiras aplicações de painéis de compostos em construção estavam associadas a estruturas de suporte fixas à parede interior. A introdução destes como paramento exterior por si só, já sem parede interior, veio no seguimento da técnica de fixação de painéis exteriores. A fixação a uma estrutura de suporte, normalmente através de parafusos com chave de aperto de pressão constante, aliado a fixações inferiores deslizantes e juntas com encaixes macho-fêmea siliconadas, permite o funcionamento destas como uma vulgar fachada cortina com estrutura metálica e painéis sandwich metálicos, mas ainda mais ligeira. Os painéis com este sistema adquiriam suficiente rigidez com 2-3mm de espessura e com um peso de 4kg/m^2 (Miravete 1994).

A evolução do conceito de fachada cortina em painel de base polimérica levou à introdução de painéis autoportantes, com carácter estrutural, cobrindo o vão livre entre pisos sem qualquer tipo de estrutura complementar. Neste caso, a colocação tem de ser ainda mais rigorosa que no sistema de fixação à estrutura de suporte metálica, pelo que se trata de um trabalho mais delicado e complexo de montagem. Os painéis autoportantes podem ser opacos, incorporar os marcos das janelas ou mesmo translúcidos.

a) Placas de polycarbonato opacas

Um dos polímeros utilizados em construção é o polycarbonato. O sucesso da utilização de placas de polycarbonato alveolar transparentes em substituição de vidro, contrasta com a menor utilização do polycarbonato alveolar opaco para revestimento de fachadas. O painel "PolyClad" fabricado na Holanda pela empresa "GE Structured Products" tem sido bastante utilizado na Holanda. Existem também exemplos de alguma dimensão em França, como na Universidade de Rouen, onde 400m^2 de painéis moldados pela empresa GB Plastiques foram instalados por uma equipa de quatro pessoas em duas semanas. Nos projectos

realizados até agora estes painéis formam sobre pedra ou betão armado a envolvente do edifício. Entre os dois paramentos localiza-se uma caixa-de-ar e/ou uma camada de isolamento em fibras minerais ou espuma. Um dos clientes de GE, a Cox Thermoforming (Inglaterra) desenvolveu um método de incorporar no próprio painel isolamento em espuma de EPS durante a moldagem. Um molde de EPS substitui a placa de molde macho de alumínio. Durante o processo de termomoldagem, o calor do painel de polycarbonato funde a superfície de EPS, proporcionando uma união que se reforça quando o painel se contrai ao arrefecer (Miravete 1994).

b) Betão reforçado com fibra de vidro

O betão reforçado com fibra de vidro AR (GRC) consiste em betão que em vez duma armadura metálica dispõe de fibras de vidro para absorver os esforços de tracção. Desta forma consegue-se um material mais leve, com uma espessura que pode ser de apenas 1cm. Permite ser moldado com uma grande diversidade de formas, texturas e cores e tem, entre outras, as seguintes vantagens:

- Eliminação de pontes térmicas, já que os painéis se podem colocar a revestir inteiramente a fachada, por cima do material isolante;
- É um material inorgânico com um comportamento ao fogo M0 e não produz gases tóxicos;
- Graças a um sistema móvel de fixação é adaptável a qualquer tipo de estrutura;
- É reutilizável.

c) Gesso reforçado com fibra de vidro

As placas de gesso reforçado com fibra de vidro têm como principal utilização os tectos falsos. A resistência do gesso reforçado com fibra de vidro é aproximadamente duas vezes superior ao gesso sem reforçar.

Para determinar o tipo e a qualidade da fibra de vidro a utilizar nas placas de gesso, consideram-se três parâmetros: a ensimagem, o comprimento do fio e a relação de peso entre a fibra de vidro e o produto final seco.

A ensimagem do fio poderia implicar uma dificuldade de aderência dos dois durante a mistura, por isso o tipo de ensimagem deverá ser adequado à aderência com o gesso. O conteúdo de fibra óptimo encontra-se entre 0.9 e 1% em relação com o peso do gesso seco. Acima desta percentagem apresentam-se problemas de dispersão das fibras e as propriedades vêem-se notavelmente diminuídas. As medidas óptimas para o comprimento dos fios são de 12,5mm. Com estes factores a ser cumpridos, as placas apresentam, relativamente a placas de gesso sem reforço, um aumento das características de flexão (o momento flector triplica), tracção e resistência ao choque (o que se revela importante na facilidade de manipulação e transporte) (Miravete 1994).

d) Placa ondulada de fibra de vidro AR e cimento

Em 1989, a Fasebertonwerk Kolbermoor (FBK) lançou uma placa ondulada de fibrocimento onde o amianto foi substituído por roving e fios cortados de fibras de vidro AR. As placas onduladas fabricadas pela FBK oferecem as seguintes propriedades:

- Alto limite de rotura por flexão / MOR (valor médio superior a 25N/mm^2);
- Alta resistência à compressão;
- Resistência ao fogo - M1;
- Não são quebradiças, podem ser pisadas;
- Alta resistência ao gelo / degelo e granizo;
- Longa duração: mais de 50 anos com pouca perda de propriedades (Miravete 1994).

4.2.4.2. Painéis duplos e painéis sandwich poliméricos

Os painéis de fachada simples podem apresentar, em certos tipos de função e localização, alguns problemas: dificuldade em obter com estes suficiente isolamento térmico e acústico e falta de rigidez. No sentido de incrementar a sua capacidade de isolamento e rigidez, vulgarizou-se a utilização de isolamentos ou estruturas interiores “favo de abelha”, compreendidos entre duas lâminas de material. Isto permite que a maior parte do interior do painel seja ocupada por ar - painel duplo (Figura 4.2.14), formando aquilo que vulgarmente se conhece como “painéis sandwich”. O painel “sandwich” pode obter-se preparando separadamente o núcleo de espuma e os revestimentos e depois unindo-os, ou colando a espuma directamente nos revestimentos. Ambientalmente, a solução de unir os componentes mecanicamente pode ser mais interessante (Figuras 4.2.15 e 4.2.16), já que a posterior reutilização e reciclagem dos distintos componentes se torna possível. O caso dos núcleos “honeycomb”, onde o material das chapas exteriores pode ser inclusivamente o mesmo que o do núcleo, torna a reciclagem mais fácil.

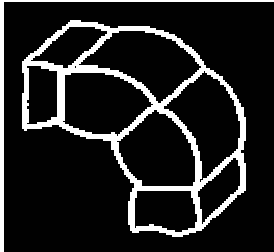


Figura 4.2.14. Sistema de painel duplo pneumático (Schulz 1997)

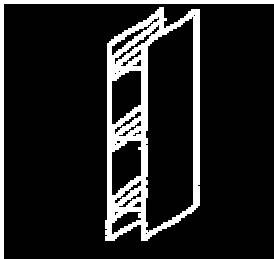


Figura 4.2.15. Ligação com perfis (Schulz 1997)

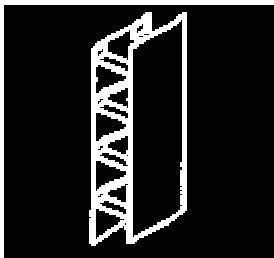


Figura 4.2.16. Ligação com tiras (Schulz 1997)

Nos últimos anos, o crescimento da utilização de “painéis sandwich” com polímeros reforçados, na Europa, foi de cerca de 10%, o que é um valor mais baixo quando comparado com 20%, no caso de painéis metálicos com enchimento de espuma. Uma das razões para esta diferença é que praticamente todos os painéis de compósitos têm uma mão-de-obra de fabrico relativamente intensiva e resultam assim, comparativamente mais caros, além dos aspectos de durabilidade (Miravete 1994).

Os sistemas de “gel-coat” actualmente disponíveis melhoraram consideravelmente a sua resistência aos agentes atmosféricos. Algumas empresas de grande dimensão fabricam actualmente painéis de compósitos por pultrusão (Miravete 1994). Os procedimentos mediante os quais é possível melhorar a rigidez dum painel sem recorrer ao aumento da espessura são:

- Incorporar à estrutura elementos realizados com materiais dotados dum módulo de elasticidade próprio elevado (perfis metálicos, aros de madeira, PRFV, etc.);
- Adoptar formas de dupla curvatura, caneluras, ondulados, com reforço de espessura dos bordos ou em pontos

localizados, capazes de proporcionar a devida rigidez, sem exigir aumento das quantidades de material;

- Aumentar o momento de inércia da secção, dividindo o material resistente em dois panos separados entre si e unidos por meio dum elemento distanciador de baixa densidade, formando o que se pode chamar de estrutura sandwich (Miravete 1994). Exemplos de núcleos de baixa densidade são a madeira de balsa, os painéis rígidos de fibras de vidro aglomeradas; produtos alveolares tais como resinas expandidas do tipo poliuretano, poliestireno; produtos celulares tipo "honeycomb" de papel, alumínio, tecido de fibra de vidro; outras estruturas tais como chapas onduladas, cartões ondulados; perfis distanciadores paralelos.

A resistência mecânica dum painel sandwich depende não só da resistência combinada das suas duas capas exteriores e da do núcleo interno estrutural, mas essencialmente da solidez da união entre os três elementos (Miravete 1994).

As membranas de Poliéster/PVC ou de Fibra de Vidro/PTFE, podem ser igualmente utilizadas como painéis "sandwich". As telas apropriadas para isolamento acústico são normalmente perfuradas por pequenos orifícios, reduzindo-se os fenómenos de reflexão acústica e preenchidas no interior por um material absorvente (Robbin 1996). Quando se pretende manter a transmissibilidade das telas em painéis sandwich, o absorvente terá de ser translúcido.

A utilização de sistemas construtivos baseados em painéis tipo "sandwich" planos pode seguir um raciocínio próximo à construção de pré-fabricados em madeira ou chapa, com a vantagem do peso ser ainda menor (Shulz 1997). A estrutura neste caso pode ser metálica (Figuras 4.2.17.a) e b)), de madeira (Figura 4.2.17.c)) ou mesmo pneumática, suportando-se apenas com a pressão do ar no interior de câmaras de ar, como no exemplo da Figura 4.2.18.

Uma das principais vantagens dos materiais compósitos de matriz orgânica é a sua elevada resistência. Podem distinguir-se quatro tipos fundamentais de configurações de estrutura resistente realizada com novos materiais (Miravete 1994):

- Fibras para substituir as armaduras de betão e tendões para fixações de pré-esforço;
- Cabos tirantes;
- Perfis de fibra de vidro e uma matriz termoe estável, como alternativa às estruturas convencionais de betão armado ou metálicas;
- Painéis de fibra de vidro estruturais.

A substituição do aço das armaduras de betão, bem como dos cabos tirantes por novos materiais, mais ligeiros e resistentes como a fibra de carbono ou de aramidas é já bastante generalizada. Também em ocasiões onde existem problemas com a estrutura tradicional (metálica ou betão armado), por exemplo em edifícios de comunicações ou em ambientes com problemas de corrosão ou ataques químicos podem utilizar-se perfis de fibra de vidro e resina termoe estável.

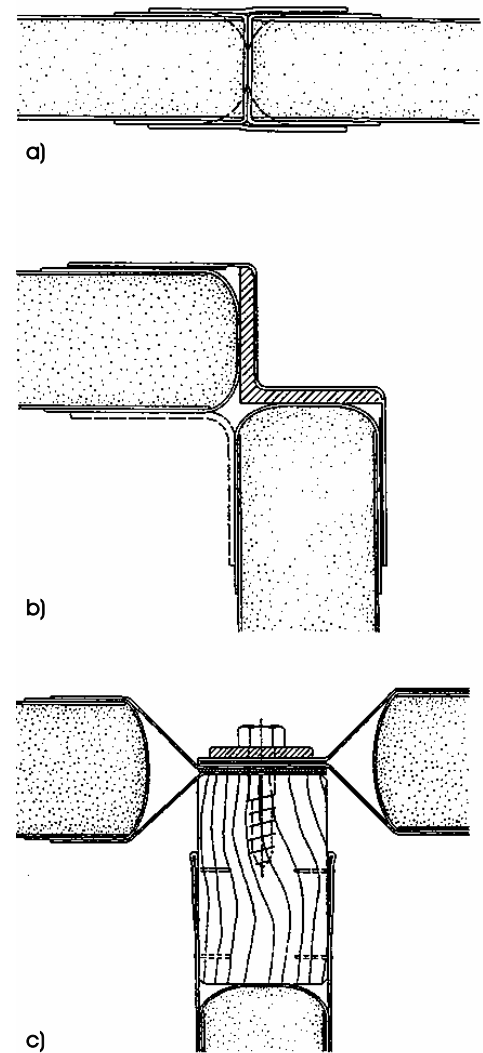


Figura 5.2.17. Sistemas de ligação estrutural para construções de painéis sandwich de membrana (Bubner 1997)



Figura 4.2.18. Construção pneumática – Pavilhão "Airitecture" (Detail 1996)

Apesar destas soluções terem sempre a desvantagem de não serem recicláveis nem reutilizáveis, permitem no entanto prolongar a vida útil de estruturas existentes, o que poderá ser uma mais-valia sob o ponto de vista ambiental em soluções de reabilitação.

Utilizam-se também painéis, normalmente de fibra de vidro com rigidez elevada conseguida mediante a configuração sandwich ou com a incorporação de rigidificadores, para executar estruturas resistentes sem nenhum tipo de apoio a outras estruturas. Os perfis obtidos por pultrusão apresentam uma resistência quatro vezes superior ao aço e uma densidade quatro vezes menor (Miravete 1994). Os painéis como estrutura resistente implicam que o edifício esteja inteiramente dependente destes, não só como elementos estruturais, mas também como elementos de estanquicidade e isolamento térmico e acústico. Normalmente o material utilizado são painéis de fibra de vidro e uma matriz termoestável, como o poliéster.

As propriedades térmicas de polímeros reforçados com fibra de vidro são importantes quando estes se utilizam para fins estruturais, apresentando, tal como a madeira, uma boa resistência térmica associada à resistência mecânica. Os polímeros não reforçados e não aditivados, têm um coeficiente de expansão muito elevado que pode ocasionar problemas de desenho ao serem utilizados juntamente com materiais convencionais (Miravete 1994). Esta característica pode no entanto ser aproveitada, por exemplo na colocação de tectos falsos tensionados em PVC (sendo aquecidos para permitir a sua colocação e ficando tensionados após o arrefecimento). A incorporação de fibra de vidro ao polímero tem como consequência a redução muito significativa do coeficiente de expansão linear, conforme se pode verificar na Tabela 4.2.2:

Tabela 4.2.2. Propriedades Térmicas de polímeros em comparação com os materiais de construção convencionais

Material	Coefficiente de expansão linear [°C x 10 ⁻⁶]	Condutibilidade térmica [W/m.°C]
Aço	11,3	46,00
Alumínio	23,0	140,00-190,00
Madeira	5,4-54,0	0,124-0,24
Betão	13,0	0,98
Fibra de vidro	8,6	1,02
Resina de poliéster	50,0-100,0	0,11-0,28
Tecido de fibra de vidro / poliéster	11,0-16,0	0,20-0,30
Mat moldado por contacto	22,0-36,0	0,20-0,24

Fonte: (Miravete 1994)

O limite de temperatura face ao qual as resinas começam a perder rigidez é conhecido como temperatura de deflexão (HDT). Se a resina for reforçada o valor aumenta cerca de 20°C. A temperatura de deflexão representa um factor limite no desenho, dada a tendência ao material abrir gretas quando solicitado em carga a esta temperatura (Miravete 1994).

4.2.4.3. Membranas

As membranas ou telas arquitectónicas são materiais flexíveis, de pouca espessura, apenas resistentes a esforços de tracção e que normalmente são compósitos constituídos por um tecido de base e uma resina de revestimento. Excepcionalmente, existem membranas constituídas de um só material, em situações pouco exigentes do ponto de vista da durabilidade. Quando é necessária durabilidade e resistência mecânica, são realizadas com polímeros, mais concretamente, fluoropolímeros, tais como o ETFE e o PTFE.

Do ponto de vista estrutural, as telas para coberturas têxteis podem ser utilizadas como elemento resistente ou apenas como material de protecção ou revestimento. A principal distinção que se pode fazer das duas situações, diz respeito ao comportamento dinâmico da cobertura com e sem a membrana.

Nas coberturas em que a tela é um elemento resistente, a não existência desta implica que a estrutura não tenha estabilidade. A forma da cobertura depende exclusivamente do material de suporte estrutural, (perfis de alumínio ou aço, redes de cabos de aço, estruturas metálicas espaciais ou estruturas em madeira) pelo que a resistência da tela não é relevante no equilíbrio da estrutura, que mantém a mesma forma quando esta não é colocada.

No caso das coberturas em que as membranas são um elemento resistente, a escolha do tipo destas, revela-se especialmente importante, sendo fundamental perceber qual a escala e as características resistentes do material, quando por exemplo se pretendem montagens e desmontagens sucessivas ou uma estrutura de implantação definitiva (Mendonça 1997).

A maneira como uma membrana se mantém estável e a sua forma são indissociáveis. Podemos dizer que as membranas podem ser classificadas em três tipos de formas: planas, sinclásticas e anticlásticas (Mendonça 1997). Devido à sua reduzida espessura, as telas têm uma resistência praticamente nula à compressão, o que implica que a sua forma seja determinada duma maneira extremamente precisa, para que todas as cargas aplicadas possam ser distribuídas apenas em esforço de tracção. Uma forma de dar estabilidade a uma membrana é através de painéis sandwich, já referidos anteriormente em painéis de madeira, metálicos e plásticos rígidos. Mas uma membrana é flexível, o que complica a sua utilização neste sistema. Uma hipótese será colocá-la sob uma determinada tensão, como uma tela de pintura num aro. Mas este sistema está bastante limitado na dimensão. Uma outra maneira prática de manter uma membrana suficientemente resistente e estável, é através da combinação de curvatura e pré-esforço (Vandenberg 1996). A combinação de curvatura e pré-esforço, permite garantir que a tela se mantenha em tensão e portanto estável, mesmo após a aplicação de cargas não uniformes, tais como rajadas de vento, que podem trazer as mais variadas direcções, inclusivamente ascendentes. O pré-esforço aplicado, deve ser suficientemente forte, de modo a nunca ser anulado por forças exteriores, em qualquer direcção. A

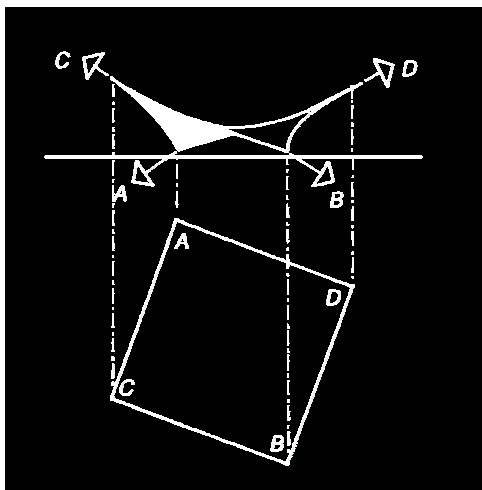


Figura 4.2.20. Superfície anticlástica (Vandenberg 1996)

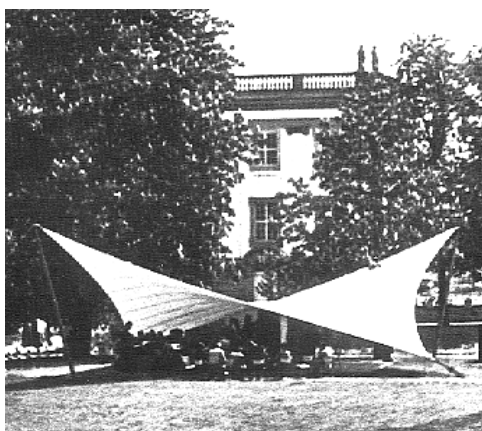


Figura 4.2.21. Pavilhão de música em Kassel (Berger 1996)

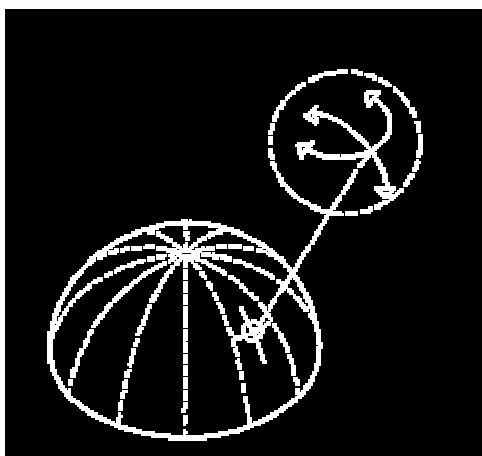


Figura 4.2.22. Superfície sinclástica (Vandenberg 1996)

curvatura deverá ser do tipo mais adequado para cada caso e a sequência de esquemas da Figura 4.2.19 ilustra os princípios de equilíbrio inerentes ao desenho das estruturas de membrana suspensas. Em a), um ponto P é mantido estável por elementos fixos em A e B, esse ponto vai ficar seguro em relação a forças aplicadas na direcção ascendente, mas no entanto ficará incapaz de resistir a forças do sentido contrário. O oposto verifica-se em b), quando um ponto P é mantido em tensão pelas cargas C e D. Um ponto P mantido em tensão pelos pontos A, B, C e D ao mesmo tempo, mantém-se estável em relação a cargas aplicadas em qualquer direcção, como se pode observar em c) (Vandenberg 1996).

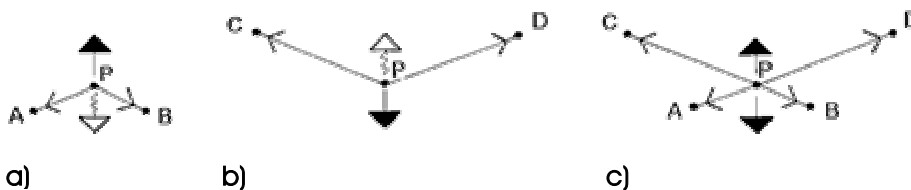


Figura 4.2.19. Princípio estático das membranas suspensas

Como se pode ver na Figura 4.2.19, se a tela for simultaneamente curva em duas direcções opostas e mantida nessa posição pela aplicação de pré-esforço, então cada ponto individual da sua superfície apresenta a condição de equilíbrio da Figura 4.2.19.c) e a estrutura mantém-se estável em relação a todas as direcções possíveis das cargas exteriores em toda a sua superfície. A uma superfície deste tipo chama-se anticlástica (Figura 4.2.20). Este princípio foi claramente aplicado por um dos percursores e principal impulsionador das construções de membranas, Frei Otto, numa das suas primeiras obras, o Pavilhão de Música em Kassel, em 1955 na então República Federal da Alemanha, representado na Figura 4.2.21.

À situação oposta, em que uma superfície é duplamente curva na mesma direcção, chama-se sinclástica (Figura 4.2.22). Como se pode ver na Figura 4.2.23, representando uma câmara de ar, qualquer área da superfície interior sombreada satisfaz a condição de estabilidade, por ser uma superfície anticlástica, onde as curvas A-B e C-D têm direcções opostas. Pelo contrário, na superfície não sombreada do arco, as curvas A-B e C-D têm a mesma direcção (superfície sinclástica) e por essa razão não oferecem resistência às forças que actuam na direcção do exterior para o interior. O mesmo se passa numa cobertura do tipo insuflável (Figura 4.2.23), que para contrariar as forças de gravidade e do vento necessita de pressão de ar no interior. A área destacada da superfície interior do anel na Figura 4.2.23 mostra uma superfície anticlástica, com as linhas A-B e C-D apresentando duas direcções opostas de curvatura, uma côncava e outra convexa. As cargas ascendentes de sucção, causadas pelo vento, são contrariadas pelas cargas da direcção A-B e as cargas provocadas pela gravidade ou por pesos como o da neve são contrariados pelas forças contrárias na direcção côncava (C-D). Os seguintes cuidados deverão ser tomados em conta quando se define a geometria precisa da estrutura de membrana (Vandenberg 1996):

- Quanto mais curva for a superfície, mais eficaz resultará o pré-esforço aplicado no sentido de aumentar a estabilidade da tela, se bem que uma curvatura excessiva poderá também colocar dificuldades práticas, nomeadamente quando se trabalha com materiais duros como a tela de Fibra de Vidro / PTFE, que tem uma grande resistência à deformação mas pouca elasticidade e assim não distribui convenientemente as cargas de pré-esforço;
- Os raios de curvatura ao longo da tela deverão ser relativamente uniformes, pois as grandes variações destes poderão conduzir à formação de zonas muito tensas e de outras muito frouxas, o que poderá ser contraproducente à estabilidade da tela.

A maior parte dos exemplos de arquitectura de membrana tem as seguintes formas; sinclástica, com os elementos estruturais a trabalhar em compressão, que pode ser cónica, com as paredes a terminar em vértice (como nos Tipis) ou abóbadaada (como nos Yurts); a suspensa anticlástica, onde só os elementos de suporte trabalham em compressão (como nas Tendas negras). Nos exemplos tradicionais, só nas formas anticlásticas a tela tem um papel estrutural, já que as únicas coberturas sinclásticas de tela estrutural só recentemente surgiram com as estruturas pneumáticas (Figura 4.2.18) e insufláveis (Figura 4.2.24).

Nas construções de membrana, a dimensão é actualmente o factor que mais influencia a escolha do tipo de tela de cobertura, mas outros factores como a translucidez, a reflectância, a durabilidade e o preço, podem condicionar as opções. Em coberturas de pequena escala, e em que a tela não é elemento estrutural, utilizam-se frequentemente lonas realizadas com fibras naturais como o algodão, em tecidos simples, apenas tratados para impermeabilização e durabilidade, no caso do algodão com sulfato de alumina (Roland 1970). Para coberturas de maiores dimensões e/ou quando se exige uma durabilidade maior e uma função estrutural, são utilizados tecidos realizados com fibras não naturais, principalmente o Poliéster e a Fibra de Vidro, revestidos com materiais de protecção e impermeabilização, normalmente polímeros termoplásticos.

Na maior parte das membranas ou telas arquitectónicas, a existência de um tecido e dum revestimento, implica que as propriedades destas dependam essencialmente destes dois elementos constituintes.

a) Tecidos

Os tecidos que servem de base às telas têxteis tecidas são normalmente anisotrópicos nas duas direcções principais, ou seja, têm comportamentos diferentes no sentido da teia e no sentido da trama, quando em esforço, sendo mais resistentes mas menos elásticos no sentido da teia. (Vandenberg 1996) Durante a tecelagem, os fios de trama ficam normalmente mais "relaxados", pois os fios de teia estão sob tensão no tear. Além deste factor, também a densidade dos fios na tecelagem vai influenciar o comportamento da tela. A Figura 4.2.25 apresenta as vantagens e

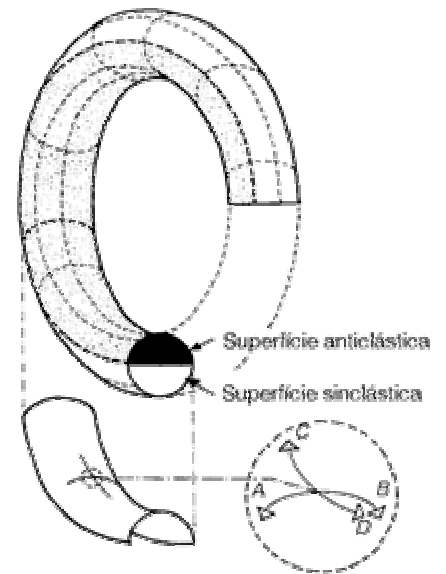
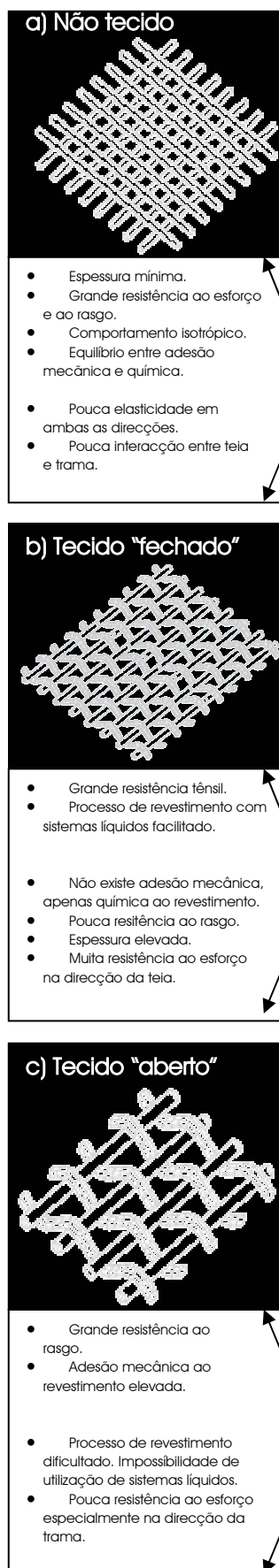


Figura 4.2.23. Arco Sinclástico / Anticlástico (Vandenberg 1996)



Figura 4.2.24. Vista interior duma piscina com cobertura insuflável (Catálogo Cannobio n.d.)



desvantagens das diferentes estruturas utilizadas. Um tecido fechado (Figura 4.2.25.b) implica uma espessura quase três vezes superior à do fio utilizado e uma textura mais acentuada, com um gasto superior de fio bem como de material de revestimento. Um tecido mais aberto (Figura 4.2.25.c) poderá ser mais vantajoso nalgumas situações, não só pela redução da espessura, mas também pela maior resistência ao rasgo. Os "não tecidos" em que é utilizado o mesmo fio na teia e na trama, (colocado perpendicularmente com o mesmo espaçamento) (Figura 4.2.25.a) têm um comportamento isotrópico e, além disso, para uma mesma densidade, têm uma espessura menor que o tecido "normal" mais fechado e uma resistência superior ao esforço de tensão. Além disso, por serem mais "lisos", o gasto em material de revestimento é normalmente menor. Nos tecidos normais as diferenças de comportamento relativamente às duas direcções da tela, podem ser minimizadas ou mesmo eliminadas (tornando-se isotrópicos nas duas direcções principais) através de técnicas de tecelagem apropriadas, nomeadamente através do fenómeno de interligação dos frisados (crimp interchange) (Vandenberg 1996). Um procedimento normal de muitos fabricantes de tecido para telas arquitectónicas é o pré-esforço do tecido, antes e durante a aplicação do revestimento protector, como através da tecnologia patenteada "Ferrari Precontraint" apresentada na Figura 4.2.26 (Catálogo Ferrari 1996).

A técnica "Precontraint" é uma técnica patenteada que consiste num pré-esforço contínuo e controlado na direcção da trama durante o processo de passagem do tecido na calandra para aplicação do revestimento, levando a uma sinuosidade do fio equivalente nas duas direcções do tecido, o que permite a redução da espessura, uma maior regularidade da superfície para aplicação do revestimento, além das características isotrópicas de igual resistência à tracção nas duas dimensões.

b) Os revestimentos

Em aplicações simples, como toldos, pequenas coberturas efémeras, estruturas interiores, em que a impermeabilidade, resistência e durabilidade não são factores importantes, um tecido simples sem revestimento pode ser uma opção viável. Em situações onde a impermeabilidade e a durabilidade são importantes, mas a resistência necessária não é importante, podem eventualmente ser utilizadas películas sem qualquer tecido estrutural. No entanto, a generalidade das aplicações têxteis em coberturas de médias e pequenas dimensões, especialmente as suspensas, implicam a existência de durabilidade, impermeabilidade e resistências mecânicas elevadas, pelo que são utilizados os tecidos revestidos com películas de protecção. Este revestimento pode ser feito apenas de um dos lados, pelo exterior, ou então de ambos os lados. O material de revestimento mais comum para os tecidos de Poliéster é o PVC, mas são também usados outros revestimentos protectores, nomeadamente o Vinilo, os ésteres do ácido poliacrílico (de marca comercial Plexigum), o Poliuretano, a Borracha, as Borrachas sintéticas (com as marcas comerciais Hypalon, Opanol, Neoprene), o Polietileno, o Betume ou a Parafina. Associados aos tecidos de Fibra de Vidro são

Figura 4.2.25. Vantagens e desvantagens de diferentes estruturas de tecido utilizadas em telas arquitectónicas (Mendonça 1997)

utilizados o PTFE e também a Silicone. Associado aos tecidos com fibras do tipo aramidas, é normalmente aplicado o PTFE como revestimento (Mendonça 1997).

Enquanto o tecido interior tem um papel essencialmente estrutural, a camada de revestimento é utilizada como complemento, cabendo-lhe as seguintes funções:

- Proteger os filamentos do tecido contra a abrasão e os raios ultravioleta;
- Proteger o tecido das sujidades e dos agentes químicos que existam no ar;
- Assegurar a estanquicidade;
- Permitir a termocolagem do material, evitando a costura com linha ou protegendo-a;
- Conferir-lhe um carácter ignífugo;
- Dar cor, transparência ou diferentes graus de translucidez.

O material de revestimento pode ser aplicado seguindo diferentes métodos;

- Aquecido até ficar líquido e então espalhado pelo tecido;
- Espalhado em pasta e pressionado até penetrar nos fios e nas fibras;
- Aplicado em película sólida que posteriormente é colada ao tecido por pressão, por termocolagem ou por adesão química.

Pela adesão química verificada entre o tecido e o revestimento, o comportamento dos dois revela-se como mais do que a soma das propriedades de ambos. Certas características têm de ser complementares, como a elasticidade (por exemplo não faria sentido um revestimento pouco elástico sobre um tecido muito elástico, já que levaria à fissuração ou à rotura do revestimento). Apresentam-se seguidamente os revestimentos disponíveis actualmente no mercado para telas arquitectónicas. Além dos revestimentos, será de realçar o facto de algumas telas necessitarem de tratamentos posteriores ou sobre-revestimentos (top coatings) apenas para acabamento, para por exemplo dar uma protecção adicional aos raios ultravioleta, tornar um revestimento auto-lavável ou prolongar o tempo de vida útil (Mendonça 1997).

Existe actualmente apenas uma tela para estruturas de grande dimensão que é um tecido não revestido, com durabilidade e resistência mecânica igual ou superior a estes, já que é realizado com fibras de PTFE expandido, que curiosamente é um dos materiais de revestimento mais resistentes.

A implementação de materiais sintéticos mais resistentes implicará o gradual abandono das telas compósitas, substituindo-as por tecidos ou películas simples, com as propriedades que agora só na conjugação dos dois se podiam obter a um preço competitivo.

As telas actualmente utilizadas em grandes coberturas são materiais compósitos que envolvem tecnologias de produção diversas e com alguma especificidade. Por essa razão, são

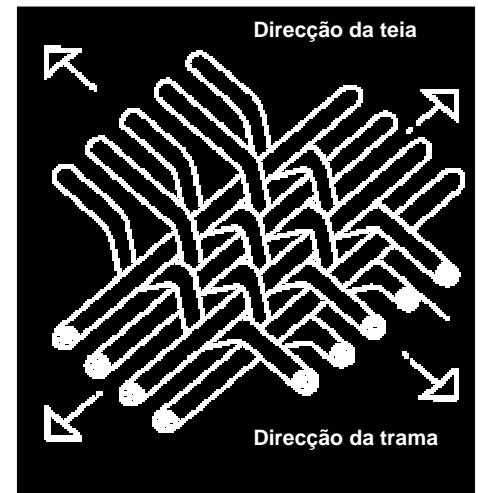


Figura 4.2.26. Tecido de base antes e após aplicação de pré-esforço

geralmente produzidas por empresas que se especializam em determinadas áreas, como a fiação, o fabrico do tecido, os revestimentos, os acabamentos de protecção, o corte ou a montagem. Apresentam-se aqui exemplos das telas ou membranas mais utilizadas em construções têxteis de média e grande dimensão.

c) Membranas de Poliéster / PVC

As membranas de PVC, normalmente em forma de revestimento flexível, são caracterizadas por ter no seu processo de fabrico a adição de plastificantes e elastificantes e podendo ser utilizado como uma película simples, quando não existam solicitações estruturais, como as que as grandes coberturas suspensas exigem. É assim admissível em pequenas construções ou em utilizações não estruturais, como em cenografia, onde são vulgarmente usadas em cicloramas para criar efeitos de cenário ou para projecção de cinema e vídeo.

Para se obter a necessária resistência em coberturas têxteis estruturais é normalmente associado ao PVC um tecido de reforço em Poliéster. Em coberturas, o revestimento de PVC sobre o Poliéster pode ser bastante translúcido, mas com a desvantagem de diminuir a resistência mecânica do Poliéster, pela exposição aos raios ultravioletas. Além disso, retém alguma sujidade, pelo que se torna necessário uma limpeza regular das coberturas, ou então um posterior tratamento de protecção para repelir as poeiras.

Na Europa, a grande maioria das estruturas têxteis construídas, segundo Miravete, quase 95% (Miravete 1994), utilizam membranas compostas por tecido de Poliéster revestido a PVC, devido fundamentalmente à sua relação custo / qualidade, pelo facto de serem mais fáceis de trabalhar e por serem mais económicas na produção. Apresentam no entanto algumas desvantagens se comparadas com as telas de Fibra de Vidro / PTFE, como a sua menor durabilidade, maior propensão para acumular sujidades e menor resistência ao esforço de tracção (Vandenberg 1996), além de derreterem na presença do fogo. São classificadas como sendo combustíveis e estão, por essa razão, proibidas nos Estados Unidos para construções permanentes, sendo no entanto utilizadas para construções temporárias. Na Europa, no entanto, são permitidas em estruturas permanentes (Robbin 1996).

Existem diferentes telas no mercado, com pesos totais que podem chegar aos 2kg/m^2 com cargas de rotura de 6 a 20 toneladas por metro linear. A solicitação de tracção da membrana leva-se sempre a cabo na parte inicial da sua curva tensão / deformação (zona linear da Figura 4.2.27) e aplicam-se coeficientes de segurança entre 5 e 6 (Miravete 1994). O tecido de Poliéster pode alongar-se com o tempo, o que por vezes torna necessário um grande cuidado e acompanhamento de manutenção após ser pré-esforçado, nomeadamente reajustando a tensão.

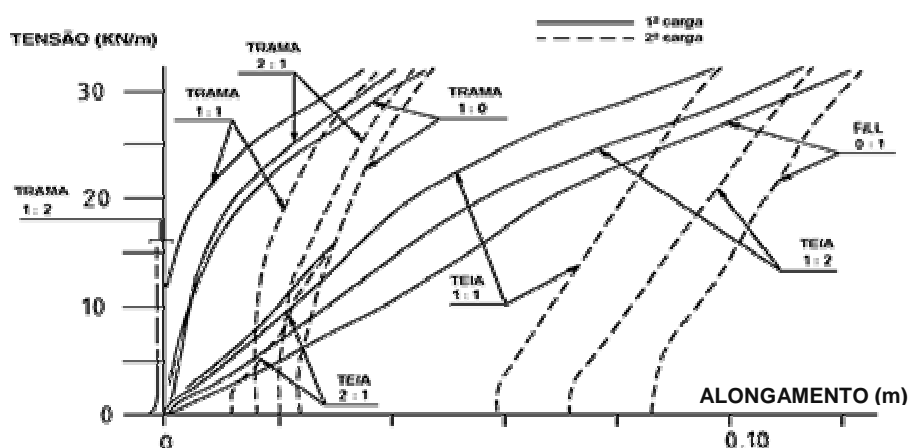


Figura 4.2.27. Curvas de carga / alongamento para tela de Poliéster / PVC (Shaeffer 1996)

A sua elasticidade pode no entanto constituir uma vantagem durante os processos de construção, quer no corte dos módulos onde não é necessário tanto rigor, quer na montagem, onde são admissíveis mais variações da forma predeterminada. A elasticidade do material garante também uma boa resistência ao tratamento menos cuidadoso durante o transporte e embalagem o que as torna especialmente adequadas a construções de carácter móvel e temporário e para a realização de pequenas construções permanentes, como toldos, tendas e marquesinhas (Mendonça 1997).

Os revestimentos de PVC têm tendência a acumular sujidade e é aconselhável evitar o seu uso sem protecção em zonas urbanas ou com poluição (Vandenberg 1996). Devem ser regularmente limpas para se evitar o aspecto sujo, bem como a perda de translucidez, ainda que certos acabamentos de superfície possam reduzir a necessidade de limpeza. A manutenção regular pode, no entanto ocasionar um outro problema nos revestimentos de PVC, o desgaste pelo contacto com os detergentes. O cuidado pela exclusiva utilização dos produtos e dos métodos recomendados pelos fabricantes pode reduzir esse desgaste (Vandenberg 1996). Tal como o tecido de Fibra de Vidro revestido a PTFE, o Poliéster revestido a PVC é eficazmente colado a quente, a uma temperatura mais baixa que a usada para outras telas. Apesar de constituir uma vantagem na operação de termocolagem, a sua baixa temperatura de fusão pode no entanto ser problemática, já que a apenas cerca de 70°C as costuras começam a ceder e perdem toda a resistência sob o efeito de cargas concentradas na tela, pelo que este tipo de costura não é adequado em climas quentes. Correntemente os rolos têm também largura inferior aos tecidos de FV/PTFE (entre 2 e 3m), pelo que requerem mais costuras (Robbin 1996).

Em resumo, o Poliéster / PVC tem três grandes vantagens: pode ser fabricado em grande variedade de cores, é muito mais barato em grosso do que as outras telas revestidas e é especialmente elástico, pelo que se torna bastante fácil a montagem de coberturas com este material, sendo especialmente apropriado para construções

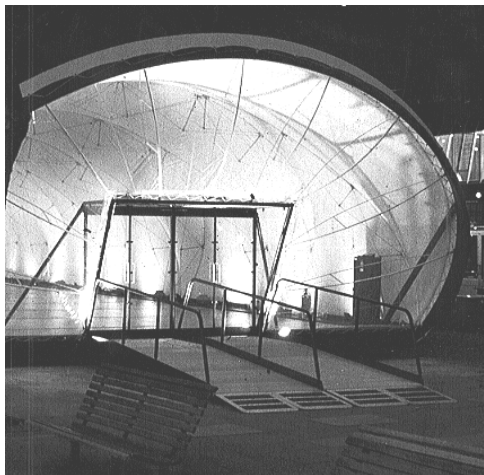


Figura 4.2.29. Fotografia da entrada do "Museum of Moving Image" (Berger 1996)

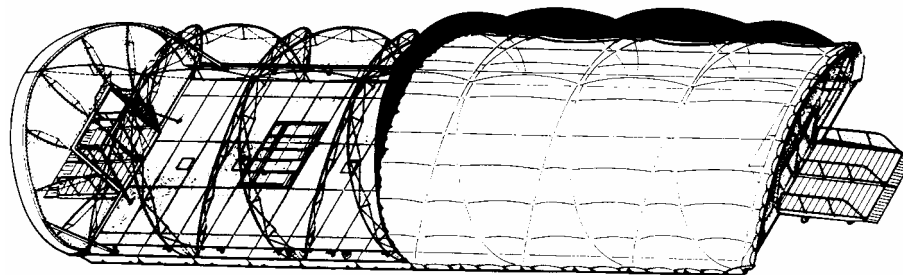


Figura 4.2.28. Axonométrica do sistema de montagem do "Museum of Moving Image"

As Membranas arquitectónicas podem ter outras aplicações em construção, além das já referidas construções suspensas e pneumáticas. Um exemplo recente é o das construções tipo "casca" de betão e tela, em que a tela têxtil serve ao mesmo tempo de cofragem perdida e de material de revestimento e protecção. A forma é normalmente semiesférica quando a construção é realizada com base num sistema pneumático ou nas formas normais das estruturas suspensas, como a forma de sela, de dupla curvatura invertida, o princípio estático subjacente à estabilidade das coberturas suspensas de membrana, como se mostra na Figura 4.2.20.

d) Membranas de FV / PTFE

Nos Estados Unidos, a tela têxtil mais utilizada é a de Fibra de Vidro (FV) revestida a PTFE e foi precisamente neste país que ela teve origem. Tem-se actualmente revelado como o tipo de tela com mais durabilidade e apesar do seu preço relativamente elevado, tem sido a mais utilizada em coberturas de grande dimensão e onde a mobilidade não é condição necessária (Robbin 1996). Na Europa, no entanto, apenas 5% das estruturas têxteis são realizadas com esta tela (Miravete 1994), não só devido à existência de poucas estruturas de grande dimensão, mas principalmente devido ao seu custo e a legislações menos exigentes quanto ao comportamento face ao fogo (e mesmo à inexistência de legislação específica para este tipo de construções) (Miravete 1994).

Na cobertura do Pavilhão dos Estados Unidos na Expo 70 de Osaka, foi utilizada uma tela de Fibra de Vidro revestida a PVC (Ishii 1995), mas "o sucesso revelado por esta obra, encorajou Geiger, a conceber um tecido inalterável e incombustível, desenvolvendo com este objectivo a tela de Fibra de Vidro / PTFE" (Robbin 1996). Este composto revelou um custo superior, mas um incremento tecnológico muito significativo, que o revelaram como extremamente resistente, durável, incombustível, translúcido e auto-lavável (Robbin 1996). A tela de Fibra de Vidro / PTFE teve a sua primeira aplicação nos Estados Unidos, na construção do "Student Centre" da Universidade de La Verne, na Califórnia, uma estrutura têxtil projectada em 1973 por John Shaver e Bob Campbell, que se pode ver na Figura 4.2.30. Foi o Engenheiro David Geiger quem idealizou a associação destes dois materiais, utilizada nesta

construção, tendo recorrido à colaboração de Harold Gores e ao seu Laboratório de Formação Académica na Ford Foundation (Robbin 1996). A estrutura de La Verne revelou-se mais do que um laboratório de ensaio para a Fibra de Vidro / PTFE, que tem sido largamente utilizada em estruturas têxteis e tem mantido na prática, mais do que era esperado inicialmente, a sua resistência e viabilidade. Com vista a controlar o seu desgaste, a tela foi regularmente examinada. “As conclusões desse controle regular indicam que a tela ultrapassou as expectativas do fabricante da Fibra de Vidro, em 50%, mantendo 70% da força de tracção do seu tecido e 80% da sua curvatura original. Como a perda de tensão tem diminuído durante os últimos cinco anos, espera-se que agora a tela continue eficaz por mais trinta anos” (Robbin 1996). Os cortes em secção, comparando amostras de tela não utilizadas de 1973 com telas do mesmo tipo das utilizadas na estrutura de La Verne, revelaram que a tela de PTFE continua igualmente translúcida e não perdeu a cor. Esta durabilidade deve-se, não só ao PTFE, mas à grande estabilidade mecânica da Fibra de Vidro, além da sua insensibilidade aos raios ultravioleta, que não afectam a sua resistência.

Segundo Robbin, o PTFE protege as extremamente resistentes fibras de vidro, da água, o seu principal inimigo (Robbin 1996), apresentando uma longa duração quando a humidade é afastada do tecido. O produto é quimicamente inerte e assim, a maioria dos poluentes, poeiras e sujidades libertam-se sem o sujar (Robbin 1996). Este é bastante resistente à abrasão, podendo ainda evoluir neste domínio. Tem também uma grande resistência ao fogo, estando classificado como M1 em França, A2 na Alemanha (norma DIN 4102) e classe B (norma VASTM E 108) nos Estados Unidos (Miravete 1994), sendo por isso o tipo de tela preferido em estruturas permanentes de grande dimensão, principalmente nos Estados Unidos onde estão homologadas para a realização deste tipo de obra, o que não acontece com o Poliéster / PVC (Robbin 1996). A sua especial vocação para a realização de coberturas suspensas de grande dimensão deve-se também às particulares características de resistência mecânica da Fibra de Vidro, com valores de módulo elástico muito elevados. Apesar de conferir às estruturas uma grande estabilidade, o uso da tela de Fibra de Vidro / PTFE, implica no entanto uma diminuição de elasticidade, como se pode ver na Figura 4.2.31, exigindo um maior cuidado no corte da tela, na montagem e nos cálculos estruturais, que deverão ser mais rigorosos (Mendonça 1997).

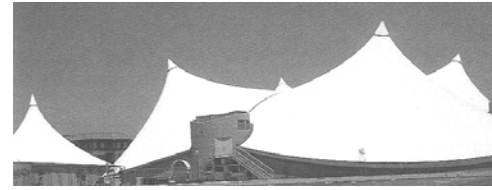


Figura 4.2.30. Fotografia do exterior do “Student Centre” da Universidade de La Verne (Robbin 1996)

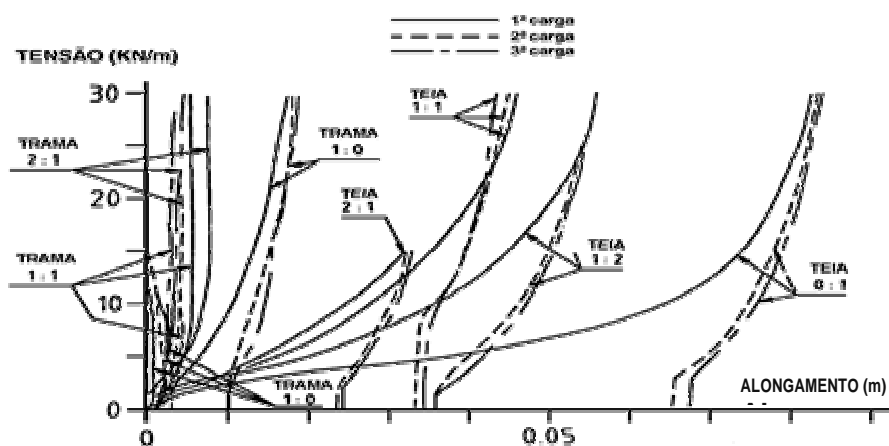


Figura 4.2.31. Curvas de carga / alongamento para tela de Fibra de Vidro / PTFE (Shaeffer 1996)

A tela pode deixar passar até 18% da luminosidade incidente e é altamente reflexiva, absorvendo poucas radiações em forma de calor. O PTFE pode ser colado a quente na obra (fazendo recobrimentos sobre costuras mecânicas), pelo que a cobertura resulta totalmente impermeável. A colagem a quente poupa tempo de mão-de-obra e evita complicados sistemas de grampos e costuras, reduzindo o custo final da obra para níveis competitivos, ainda que o custo da tela possa ser caro (três a dez vezes mais elevado que a tela de Poliéster / PVC). A tela pode ser fornecida com larguras de até 3,80m, reduzindo o número de painéis e costuras (Robbin 1996).

A tela de FV / PTFE apresenta outras desvantagens, além do seu custo inicial elevado. Como a tela é relativamente quebradiça quando dobrada, o seu transporte, empacotamento e instalação são operações delicadas, sendo necessário alguma experiência e cuidado. Em cada tela deverá também ser cuidadosamente feita a modulação pois a Fibra de Vidro tem pouca elasticidade e as pequenas diferenças entre cada lote / rolo deverão ser testadas separadamente de modo a serem programadas as variáveis de corte dos módulos para cada rolo específico. (Robbin 1996) Além disso, esta tela só se encontra disponível em branco (sendo até acastanhado no início, vai-se tornando branca com a incidência dos raios solares, pelo que as zonas onde não há exposição ao sol, se mantêm acastanhadas).

Em resumo, a tela de FV / PTFE apresenta quatro grandes vantagens: é não inflamável, é auto-lavável, é facilmente colada a quente, não necessita de costuras mecânicas e tem uma grande estabilidade e resistência à tracção, pelo que se torna mais adequada a construções de grande dimensão não efémeras e não desmontáveis.

e) Membranas de FV / Silicone

O tecido de Fibra de Vidro revestido a Silicone, cujo lançamento no mercado data de 1981, foi usada para a Callaway Gardens na Geórgia (projectado pelos Arquitectos Craig, Gaulden e Davis e pelo Engenheiro Horst Berger) e nas abóbadas suspensas realizadas

para os Jogos Olímpicos de Seul. A borracha de Silicone é mais flexível que o PTFE e o tecido de Fibra de Vidro revestido com ela torna-se mais resistente e requer menos cuidados de transporte, empacotamento e aplicação. (Robbin 1996) “Desenvolvimentos recentes nos revestimentos de tecidos, nomeadamente no mercado dos airbags para automóveis têm explorado as vantagens da silicone como parte do compósito têxtil com que estes são realizados” (Lawson 1997). As suas principais vantagens são:

- Ter uma grande resistência mecânica, por ter como base a Fibra de Vidro, mas elasticidade permitida pela Silicone, o que elimina a desvantagem principal associada às telas tradicionais de Fibra de Vidro / PTFE, (Robbin 1996);
- A sua grande translucidez, que pode chegar aos 25% na tela arquitectónica e a 90% em películas sem reforço têxtil, ou com uma malha muito aberta. (Robbin 1996) A principal vantagem, relativamente a outras soluções é a de se conseguirem graus de translucidez elevados, sem que isso acarrete problemas de resistência mecânica. Com várias camadas de tela translúcida e lã de vidro pode ao mesmo tempo haver iluminação interior natural durante o dia e uma elevada resistência térmica (Bradshaw 1993);
- Grande impermeabilidade, o que garante a protecção da Fibra de Vidro;
- Excelentes propriedades de resistência ao desgaste natural devido à exposição aos agentes atmosféricos, incluindo temperaturas extremas. O fabricante garante mais de 10.000 horas de vida útil para a tela (Robbin 1996);
- Grande resistência aos agentes químicos, nomeadamente aos solventes (Robbin 1996);
- Baixo grau de toxicidade: por ser um material muito estável ao desgaste não liberta poeiras (Robbin 1996);
- Comportamento ao fogo de classe M0 (não combustível);
- Facilmente pigmentado e disponível em cores standard (Robbin 1996).

A empresa Dow Corning Limited (D.C.), um fabricante e construtor de telas detém a patente da tela de Fibra de Vidro revestida a silicone. De acordo com a D.C., recentes avanços técnicos resolveram parcial ou totalmente os problemas surgidos inicialmente na construção da tela revestida a silicone. As costuras podem agora ser quimicamente soldadas (aceleradas a quente) tornando-se mais fortes que o próprio material, como com o PTFE (Robbin 1996). A D.C. também afirma ter melhorado as propriedades de auto-limpeza da silicone, tornando-a quase igual ao Teflon, apesar de ainda recomendar uma limpeza anual. Ao estabelecer a comparação com as membranas revestidas a PTFE, algumas divulgações contraditórias relativamente às suas características podem, no entanto, trazer para segundo plano o facto de ambas as telas terem uma resistência ao fogo de classe M0 (e ainda que a silicone possa produzir fumos, estes são benignos). A D.C. insiste no facto da tela de Fibra de Vidro revestida a silicone ser 20% mais barata que o PTFE, em grande parte devido ao processo de plastificação que são realizados a uma temperatura muito mais baixa (Robbin 1996). Relativamente ao

PVC, o custo do processo de revestimento em silicone é de aproximadamente cinco vezes superior (Lawson 1997).

f) Sobre-revestimentos - toppings

As poeiras e a poluição, além de causarem perda de translucidez e um aspecto estético negativo, podem causar um envelhecimento prematuro do revestimento e perda de propriedades. Uma forma de proteger o revestimento é através da aplicação de tratamentos de protecção suplementares, como os sobre-revestimentos. Estes, além de melhorarem ou fornecerem ao revestimento base características auto-laváveis (remoção das sujidades acumuladas apenas com intervenção da água da chuva), podem servir também para fornecer uma protecção adicional contra os raios ultravioleta. Um dos materiais utilizados como sobre-revestimento é o Fluoreto de polivinilo (PVF), conhecido pela sua marca comercial "Tedlar". Trata-se duma forte película transparente que tanto pode ser aplicada sobre revestimento de PTFE como de PVC, mas mais vulgarmente sobre o segundo. Ele melhora a sua durabilidade (a empresa fabricante, a DCI, garante 15 anos de vida útil para a tela assim protegida) mas torna o processo de montagem mais difícil, pois não permite a colagem a quente (Robbin 1996). No caso do PVC, também podem ser aplicados sobre-revestimentos de Fluoreto de polivinilideno (PVDF) acrílicos ou uretano. Ainda que vários tratamentos possam ser aplicados sobre o Poliéster / PVC, isso representa um acréscimo no custo do material. Os revestimentos acrílicos de protecção são mais baratos, mas são também os menos eficazes, pois acabam por se desgastar e amarelecer com o tempo e a exposição solar. Os tratamentos relativamente recentes, à base de PVDF, têm revelado melhores qualidades, diminuindo consideravelmente a retenção de sujidades, pelas suas características auto-limpáveis e incrementando a durabilidade. Testes de simulação ao desgaste indicam que o PVDF poderá aumentar o tempo de vida da tela para 15 a 20 anos, quando o tempo de vida esperado da tela tratada com acrílico ou sem este é de apenas 5 anos (Robbin 1996).

4.2.4.4. Factores de projecto

Os compósitos avançados para aplicações estruturais de longo prazo (Painéis e Membranas) requerem integridade e durabilidade. As camadas interiores de fibras de reforço destinam-se a satisfazer as questões de integridade estrutural, enquanto as camadas exteriores são normalmente de protecção aos UV, de resistência à corrosão e desgaste e destinam-se assim a aumentar a durabilidade. Os factores que se devem ter em conta ao avaliar um material compósito avançado são os seguintes (Miravete 1994):

- **Natureza do esforço:** as propriedades de resistência e rigidez do PRFV dependem da carga a que este é solicitado e se esta é intermitente, cíclica, de impacto ou constante. O modo de ruptura está associado com o tipo e duração do esforço;
- **Condições ambientais:** os ambientes de serviço, como a radiação aos UV, o desgaste, os elementos químicos agressivos e a temperatura têm efeitos no comportamento da estrutura. A orientação solar tem um efeito significativo na

durabilidade dos compósitos. Por exemplo, um painel de PRFV orientado na direcção do sol terá um desgaste maior (pelos ultravioletas) que um painel que esteja protegido. Pelo contrário, o painel protegido aos raios de sol mas não à chuva, demora mais em secar após ficar molhado, estando portanto mais sujeito ao desgaste pela humidade;

- **Durabilidade ou tempo de vida útil:** é um parâmetro importante ao determinar os valores de projecto devidos à relação entre o coeficiente de segurança, onde se incluem os factores de envelhecimento e a vida útil;
- **Factor de segurança:** o factor de segurança aplica-se devido à redução dos valores esperados de resistência e rigidez que podem surgir pelas variações nos materiais de fabrico. O factor parcial de segurança para cargas (factor de carga) aplica-se aos prováveis aumentos de carga sobre os valores esperados, baseados no grau de precisão na previsão dos esforços;
- **Condições de serviço:** são as condições limite que se esperam durante o período de utilização do compósito. Incluem a deformação máxima, o módulo de flexão global e parcial resultante de tensões descontínuas ou contínuas e microfissuração, que possam resultar na deterioração do material.

Forma	Reforço
Processo	Resina

No desenho dos compósitos avançados obtém-se o comportamento óptimo a partir da combinação adequada de quatro factores críticos: forma, reforço, resina e processo, conforme de pode ver na Figura 4.2.32 (Miravete 1994).

Figura 4.2.32. Factores críticos no desenho de compósitos avançados. (Miravete 1994)

Para se estar seguro que os componentes cumprem todos os requisitos necessários, é essencial uma especificação que cubra todos os aspectos de execução e assegure que o produto final esteja de acordo com determinadas exigências, nomeadamente:

- Qualidade das matérias-primas;
- Projecto adequado de todos os componentes;
- Um plano de trabalho detalhado e de acordo com os requerimentos de desenho para o fabrico dos componentes.

4.2.5. Isolamentos opacos

Os materiais de isolamento, normalmente necessários numa construção convencional e essenciais numa construção leve (utilizados no núcleo de painéis sandwich ou nas caixas-de-ar) são porosos ou celulares, o que significa que uma grande parte do volume do material consiste em bolhas de ar ou gás (Davies 2001).

Uma classificação possível para os materiais isolantes é aquela que se apresenta na Tabela 4.2.3 e que reflecte a adequação às diversas soluções construtivas de paredes dos materiais isolantes.

Tabela 4.2.3. Síntese de soluções de elementos opacos de fachada e dos isolamentos térmicos utilizados nestas

	Constituição	Isolamento		Poliestireno expandido, moldado	Poliestireno expandido, extrudido	Espuma rígida de poliuretano	Lã mineral em placas	Lã mineral em mantas	Aglomerado negro de cortiça	Fibra de côco
		Localização	Solução							
Paredes opacas de fachada	Paredes simples	Exterior	Revestimento sobre solante	x			x	o	x	
			Revestimento independente c/ solante caixa-de-ar	x	x	x	x	o	x	x
		Interior	Revestimento sobre solante	x	x	x	x	x	x	x
			Revestimento independente c/ solante caixa-de-ar	x	x	x	x	o	x	x
	Paredes múltiplas	Intermédio	Preenchimento parcial caixa-de-ar	x	x	x	x	o	x	x
			Preenchimento total da caixa-de-ar	x	x	x	x	x	x	x

Legenda: x – Viável em todas as situações o – Viável em condições especiais (fixações mecânicas ou adesão a elemento que lhe confira rigidez)

Fonte: Adaptado de (Pina dos Santos 1990) e Catálogo (Isover/Roclaïne)

A utilização de materiais isolantes térmicos e acústicos, como o poliestireno expandido e expandido extrudido, as mantas de Lã de Rocha e Fibra de Vidro ou o aglomerado de Cortiça expandida, tem-se revelado cada dia mais importante na construção, pela capacidade de aumentar a resistência térmica das soluções construtivas, sem no entanto aumentar o peso da construção. Conforme se pode ver na Tabela 4.2.4, os materiais de isolamento são caracterizados por terem densidades abaixo dos 150Kg/m³ e uma Condutibilidade Térmica abaixo dos 0,05W/m.°C. Um aspecto particularmente importante será o de encontrar um compromisso entre isolamento térmico e acústico. Nas soluções de parede actuais, raramente se consegue este compromisso, já que os projectos térmico e acústico se realizam apenas como um pró-forma e apresentam muitas vezes incompatibilidades com as soluções construtivas implementadas. Muitas vezes, mesmo que a compatibilização entre as especialidades fosse bem resolvida na fase de projecto, a direcção e fiscalização de obra é em grande parte das vezes pouco eficaz, o que sucede especialmente em edifícios de habitação.

A Tabela 4.2.5 apresenta o Coeficiente de transmissão térmica, peso específico e custos energético e económico para 5cm de espessura de diversos tipos de materiais de isolamento. Da análise destes valores, não se pode logo concluir que o material mais favorável, sob todos os pontos de vista referidos, é a Fibra de Vidro de baixa densidade, já que esta também tem as suas limitações e problemas, como a perigosidade no manuseamento e não é indicada para todo o tipo de situações, por exemplo em caixas-de-ar de paredes parcialmente preenchidas, torna-se necessária a sua fixação a um suporte rígido, o que altera os seus custos e se torna mais vulnerável a alterações da sua condutibilidade por influência da humidade, ao contrário das espumas poliméricas e da cortiça,

que têm células fechadas. Para se poder fazer uma selecção criteriosa do ponto de vista ambiental e higrotérmico apresenta-se na Tabela 4.2.4 um resumo das características dos diversos tipos de isolamentos.

Tabela 4.2.4. Densidade e Condutibilidade térmica de diversos materiais de isolamento térmico

Material		Densidade [kg/m ³]	Condutibilidade térmica λ [W/m.°C]	
		*	*	**
Aglomerado negro de cortiça		110 (100-150)	0,039	0,045
Espuma elastomérica		60	0,034	
Lã de Rocha	Tipo I	30-50 (25-35)**	0,042	0,045
	Tipo II	51-70 (35-180)**	0,040	0,040
	Tipo III	71-90	0,038	
	Tipo IV	91-120	0,038	
	Tipo V	121-150	0,038	
Lã de Vidro	Tipo I	10-18 (8-12)**	0,044	0,045
	Tipo II	19-30 (12-80)**	0,037	0,040
	Tipo III	31-45	0,034	
	Tipo IV	46-65	0,033	
	Tipo V	66-90	0,033	
	Tipo VI	91	0,036	
Perlite expandida		130	0,047	
Poliestireno expandido moldado (EPS)	Tipo I	10 (15-35)**	0,057	0,040
	Tipo II	12	0,044	
	Tipo III	15	0,037	
	Tipo IV	20	0,034	
	Tipo V	25	0,033	
Poliestireno expandido extrudido (XPS)		33 (25-40)**	0,033	0,035
Poliétileno reticulado		30	0,038	
Polisocianurato (PIR), espuma de		35	0,026	
Poliuretano (PUR), espuma de (moldado)	Tipo I	32	0,023	
	Tipo II	35	0,023	
	Tipo III	40	0,023	
	Tipo IV	80	0,040	
Poliuretano (PUR), espuma de (projectado)	Tipo I	35 (30-40)**	0,023	0,030
	Tipo II	40	0,023	
Urea-formaldeído, espuma de		10-12	0,034	
		12-14	0,035	
Vermiculite expandida		120	0,035	
Vidro celular		160* (110-140)**	0,044	0,050

Fonte: *(Catálogo Isover / Roclaine); **(Pina dos Santos, 1990)

Tabela 4.2.5. Propriedades específicas para 5cm de materiais de isolamento térmico

Isolante espessura = 5cm		Coefficiente de transferência de calor (k) (w/m ² °C)	Peso específico (Kg/m ²)	Energia Incorporada (kwh/m ²)	Custo económico (€/m ²)
Lã de Rocha	20 a 35 Kg/m ³	0,00225	1,4	22	2,60
	35 a 180 Kg/m ³	0,00200	5,4	86	3,65
Lã de Vidro	8 a 12 Kg/m ³	0,00225	0,5	9	2,20
	12 a 80 Kg/m ³	0,00200	2,3	41	3,40
Aglomerado negro de cortiça		0,00225	6,3	25	7,70
Poliestireno expandido		0,00200	1,3	140	5,50
Poliestireno expandido extrudido		0,00175	1,6	163	7,30
Espuma de poliuretano		0,00150	1,8	123	5,50
Fibra de Côco		0,00220	5,8	29	7,50

A temperatura máxima de utilização dos isolamentos não está normalizada, mas o critério que se utiliza na Europa segue os valores apresentados na Tabela 4.2.6.

Tabela 4.2.6. Temperatura máxima de utilização para alguns isolamentos

Tipo de Isolante		Temperatura máxima de utilização [°C]
Espuma de poliuretano		100°C
Lã de Vidro	Com resina	250°C
	Sem resina	500°C
Lã de Rocha		até 1.750°C
Poliestireno expandido		70°C
Poliestireno expandido extrudido		85°C

Fonte: (Isover / Roclaine)

4.2.5.1. Espumas plásticas

Os materiais que actualmente têm os valores mais baixos de condutibilidade térmica são as espumas plásticas, como se pode ver na análise da Tabela 4.2.4. Esta característica, aliada à durabilidade e à pouca variação das suas propriedades com a humidade, tornam estes materiais aparentemente interessantes.

No entanto, têm os mais elevados custos de energia incorporada de entre todos os tipos de materiais de isolamento. Na Tabela 4.2.6, pode verificar-se que os valores de energia incorporada para estes materiais são significativamente superiores aos outros materiais, além de que são os únicos que utilizam como matéria-prima base no seu fabrico um recurso escasso e não renovável, que é o petróleo.

Outro inconveniente importante destes materiais é o seu comportamento ao fogo, que é problemático, pois a sua estrutura celular permite que a combustão possa avançar rapidamente. Para melhorar a resistência à chama podem-se incorporar aditivos que contêm Bromo, Cloro e Fósforo.

As espumas plásticas de isolamento mais comuns são as seguintes:

- a) **Poliuretano/Polisocianurato (PUR/PIR):** estes são polímeros termoestáveis, o que significa que só podem ser sintetizados uma vez e não poderão ser reciclados, já que as ligações entre as suas moléculas são muito fortes e não poderão ser desfeitas sem consequências irreversíveis. As principais vantagens do poliuretano são a sua baixa condutibilidade e a adesão automática, durante a produção in situ, à maior parte das superfícies de elementos construtivos, sendo também uma solução com um custo de transporte muito reduzido (apenas os reservatórios dos dois componentes e a máquina com compressor para aplicação). As desvantagens são o elevado custo ambiental e a libertação de CO₂ em obra, que inviabiliza a sua colocação em obras já fechadas.

Os principais componentes do Poliuretano rígido (PUR), vulgarmente aplicado em construção e chamado de Poliuretano projectado são o Polioliol, o isocianato, um agente pulverizador e activadores para controlar a reacção. Até há pouco tempo o agente expensor usado era quase sempre o triclorofluorometano (CFC11) ou R11. Mas, como já foi referido no Capítulo II, os clorofluorocarbonetos têm um efeito muito acentuado no aquecimento global, pelo que foram banidos no protocolo de Montreal. Existe hoje em dia uma série de

agentes alternativos como os hidroclorofluorocarbonetos (HCFC22 ou HCFC 142b e HCFC 141b), hidrofluorocarbonetos (HFCs), várias formas de pentano e água que produzem CO₂ quando reagem com o isocianato.

Após a mistura entre os componentes, a espuma líquida expande rapidamente, tornando-se rígida ao fim de 3 a 6 minutos, dependendo da espessura. Como a reação é exotérmica, poderá fazer com que a temperatura na superfície do material sobre o qual esta se expande chegue aos 150°C, pelo que será problemático fazê-lo sobre determinadas superfícies de reduzida espessura e/ou sensíveis a temperaturas elevadas. A libertação do CO₂, duma forma quase imediata é um dos principais problemas do processo de formação da espuma, mas é também esse facto que permite que as células fechadas da sua estrutura fiquem apenas ocupadas pelos agentes pulverizadores e lhe dêem a menor condutibilidade térmica de todos os materiais isolantes disponíveis.

As espumas de Polisocianurato (PIR) diferem da Espuma de PUR apenas na percentagem em que os componentes primários, poliol e isocianato são misturados. Este é aproximadamente 100:150 no PIR e 100:100 no PUR. As espumas de PIR são utilizadas apenas pela sua superior estabilidade térmica e reacção ao fogo. Enquanto a espuma de PUR se decompõe a cerca de 250°C a espuma de PIR aguenta até 350°C. Também forma uma cadeia mais estável que melhora a reacção ao fogo. Por esta última característica a produção do PIR é mais cara.

- b) **Poliestirenos (EPS e XPS):** o Poliestireno é um termoplástico, o que significa que se molda através de calor e que teóricamente poderá ser novamente sintetizado e portanto é um material reciclável. Mas só será possível reciclar se este for puro e não tiver outros componentes aditivados, o que só acontece geralmente no caso do Poliestireno expandido. A sua utilização como combustível ou triturado para agregado é no entanto mais viável. É comercializado em placas, que têm geralmente encaixes, o que facilita a sua colocação sem pontos de descontinuidade. A desvantagem face ao poliuretano é que não pode ser feito em obra, pelo que tem um custo de colocação superior. Outra desvantagem é o facto de, quando as placas não são colocadas ocupando totalmente a caixa-de-ar, terem de ser aderidas às superfícies, mecânica ou quimicamente, o que encarece a sua colocação, mas constitui uma operação simples, se utilizadas colas ou grampos específicos, dada a leveza das placas.

O Poliestireno expandido (EPS) é feito a partir de granulado de poliestireno contendo um gás que funciona como agente expensor, o pentano, que ao ser aquecido com vapor quente provoca a expansão do poliestireno ficando o pentano retido no interior das cápsulas assim formadas. As cápsulas ficam

aderidas em bloco, mas não formam uma estrutura totalmente fechada. As placas podem ser formadas a partir do corte de blocos ou em linha contínua.

O poliestireno extrudido (XPS) tem a vantagem de ser mais uniforme que o EPS, já que as suas células são de menor dimensão e por isso apresenta superfícies mais compactas e uniformes e tem uma maior resistência mecânica e durabilidade. No processo de fabrico do XPS, os grãos de poliestireno são fundidos e o gás agente expensor é misturado no poliestireno fundido. A espuma é obtida após arrefecimento da mistura expandida. O gás utilizado antes do protocolo de Montreal era o triclorofluorometano (CFC11), tendo actualmente, tal como no caso do Poliuretano, sido substituído por CO₂ ou hidroclorofluorocarbonetos (HCFC22).

- c) **Resinas fenólicas (PF):** estas são, de entre os isolamentos plásticos, os menos comuns em construção. A sua principal utilização é em painéis "sandwich". Trata-se de um polímero termoestável, feito a partir de uma resina de formaldeído fenólico líquida que é misturada com um solvente volátil leve como agente expensor e um endurecedor. Com o calor, a mistura expande e torna-se rígida. As propriedades mecânicas são semelhantes ao PUR e PIR. As espumas de PF apresentam uma vantagem significativa face aos outros isolamentos plásticos, que é o seu comportamento ao fogo. Apresenta boa resistência ao fogo, com uma combustão lenta e também uma baixa emissão de fumos (Davies 2001). Apresentam no entanto algumas desvantagens. São difíceis de produzir e portanto caras. Durante o seu fabrico, produz-se acumulação de água, que se liberta com características ácidas, o que pode trazer sérios problemas de corrosão, principalmente quando utilizados em painéis "sandwich" de faces metálicas. Recomenda-se assim um período de armazenagem até que o produto estabilize em termos de humidade e que mesmo assim não se utilize com laminados metálicos. A utilização de espumas PF ainda não foram suficientemente testadas e os produtos não estão desenvolvidos, pelo que ainda são pouco utilizadas e conhecidas.

4.2.5.2. Fibras inorgânicas

- a) **Fibra de Vidro:** a Fibra de Vidro é uma fibra inorgânica, elaborada a partir das matérias-primas tradicionais necessárias para o fabrico do vidro: silicatos mistos (cálcio, borossilicatos de alumínio e magnésio) (Araújo 1984).

A fibra de vidro na construção apresenta-se maioritariamente como material de isolamento em forma de lã de vidro. Além das suas propriedades térmicas, as suas principais vantagens são o facto de ser incombustível e imputrescível. Tem igualmente a vantagem de servir ao mesmo tempo de isolamento térmico e acústico. As formas de apresentação do produto são (Miravete 1994):

- Manta com suporte de papel (o mais comum);

- Manta com suporte de cartão;
- Manta com folha metálica;
- Manta com sarapilheira;
- Manta com caniços;
- Manga: para isolar tubagens com ar ou líquidos quentes;
- Madeixas de seda de vidro: para confeccionar produtos especiais resistentes à compressão;
- Borra: para enchimento de caixas-de-ar.

A lã de vidro em manta é um material composto. A espuma está constituída por fibras entrecruzadas desordenadamente, que dificultam as correntes de convecção do ar. A condutibilidade, que varia entre 0,032 e 0,045W/m.°C depende da densidade, que varia entre 10 e 110kg/m³.

Vantagens: em termos ambientais, e especificamente nos produtos de menor densidade, apresenta-se como o material de isolamento com menor energia incorporada. Tem uma boa relação entre o isolamento térmico e o isolamento acústico.

Desvantagens: pelo facto de se apresentar em mantas e não ter rigidez, não é indicado para caixas-de-ar verticais parcialmente preenchidas. Tem ainda a desvantagem do seu manuseamento ser perigoso e de poder libertar fibras para o ar, tornando-se nocivo para as vias respiratórias, o que pode também suceder já em fase posterior à construção, quando as caixas-de-ar não são totalmente estanques, quando são vandalizadas, ou no momento da demolição.

b) **Lã de rocha:** a lã de rocha é outro tipo de fibra inorgânica, neste caso elaborada a partir de rochas basálticas. Tem, tal como a lã de vidro, a vantagem de servir ao mesmo tempo de isolamento térmico e acústico. Apresenta-se basicamente nos mesmos produtos que a lã de vidro, não apresentando contudo a desvantagem do manuseamento ser perigoso.

4.2.5.3. Fibras orgânicas

As fibras orgânicas de maior utilização em construção, em Portugal, são: o aglomerado de cortiça expandida e a fibra de côco.

a) **Cortiça:** o aglomerado de cortiça expandido resulta da aglutinação de granulados compactados e ligados sem utilização de quaisquer produtos químicos, apenas com a sua própria resina, sob o efeito de pressão e temperatura, como se pode ver na Figura 4.2.33. Apresenta-se em forma de placas e granulados. As suas aplicações mais comuns são:

- Isolamento térmico e acústico de telhados e sótãos;
- Isolamento de tubagens de transporte de líquidos com elevadas temperaturas positivas ou negativas;
- Isolamento térmico e acústico de paredes interiores e exteriores;
- Isolamento sonoro de lajes à transmissão de sons de percussão;
- Isolamento anti-vibrático (máquinas industriais).

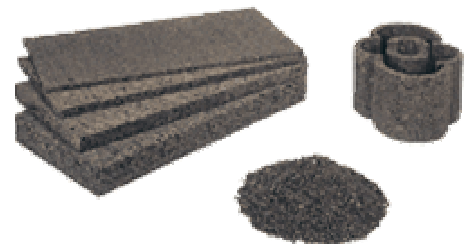
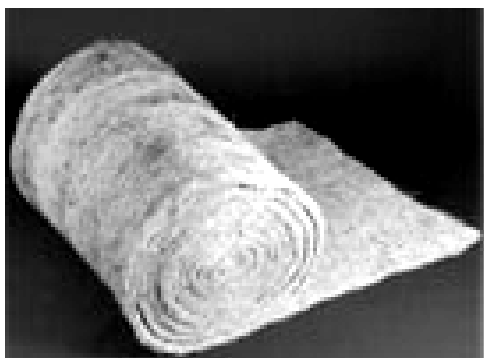


Figura 4.2.33. Gama de produtos de isolamento derivados de cortiça (Amorim 2004)

Vantagens: o aglomerado expandido é um material de longa durabilidade, imputrescível, resistente à compressão e de grande estabilidade dimensional (Amorim 2004). Apresenta-se em placas ou em granulado. Tem a vantagem de servir ao mesmo tempo de isolamento térmico e acústico, o que não acontece no convencional poliestireno extrudido. A sua aplicação em placas é fácil, já que se podem cortar com um serrote vulgar. É um produto 100% reciclável. A matéria-prima principal, a cortiça, é de origem natural, é renovável e é um produto português, pelo que dessa forma se promove a economia portuguesa.

Desvantagens: as placas não têm encaixes, o que pode trazer problemas de pontes térmicas e acústicas na sua colocação, quando não preenche totalmente a caixa-de-ar. É relativamente pesado em comparação com os outros materiais de isolamento. É combustível, o que o torna menos indicado para alguns tipos de utilizações, tendo de ser salvaguardada a sua protecção ao fogo em caixas-de-ar, nomeadamente em edifícios de vários pisos, para impedir a propagação de incêndios entre pisos.



b) **Fibra de Côco:** oriunda da Índia e Sri Lanka, a fibra de côco começou a ser introduzida na Europa após a chegada dos portugueses à Índia. A fibra de côco, pode ser utilizada como isolamento térmico e acústico, onde apresenta uma elevada eficácia, especialmente combinada com o aglomerado de cortiça expandido. Apresenta-se em manta contínua (rolo) ou em placas, como se mostra na Figura 4.2.34.

A utilização desta matéria-prima natural e renovável, existente no mundo em grandes quantidades, traz inúmeras vantagens, face ao aproveitamento de um material que se viria a perder, e que é transformado sem prejuízo do ambiente, colocando a fibra de coco na gama de produtos ecológicos.

Vantagens: a fibra de côco apresenta inúmeras vantagens na sua utilização, para além de ser um material ecológico e facilmente reciclável. Pertencente à família das fibras duras, tem como principais componentes a celulose e o lenho que lhe conferem elevados índices de rigidez e dureza, encontrando-se perfeitamente vocacionada para os mercados de isolamento térmico e acústico, face às suas características, que a tornam num material versátil, dada a sua resistência, durabilidade e resiliência. Devido às suas excepcionais *performances* acústicas, a fibra de coco contribui para uma redução substancial dos níveis sonoros, quer de impacto, quer aéreos, sendo a solução ideal para muitos dos problemas na área acústica, superando largamente os resultados obtidos com a utilização de outros materiais.

Desvantagens: a sua aplicação é dificultada por o corte das mantas ser difícil, já que as fibras são muito duras e oferecem muita resistência às lâminas de corte, bem como às brocas

Figura 4.2.34. Fibra de côco em rolo e em placas (Amorim 2004)

convencionais, entrelaçando-se mesmo nestas últimas e não as deixando prefurar o material. Por não ter encaixes a sua colocação, se não for muito cuidada, pode dar origem ao aparecimento de pontes acústicas. É combustível, tal como a cortiça.

A fibra de côco em conjugação com o aglomerado de cortiça expandido é um produto de isolamento completo, particularmente no caso do isolamento acústico, devido à absorção das baixas frequências, onde apresenta excelentes resultados, dificilmente alcançados por outros materiais de isolamento (Amorim 2004).

4.2.6. Resumo das principais propriedades das paredes leves

Na Tabela 4.2.7 apresentam-se algumas soluções de paredes leves e respectivas propriedades. A utilização de soluções triplas (designadas aqui por PT(L)) revela-se neste tipo de paredes particularmente eficaz, nomeadamente pelo incremento do isolamento sonoro que permitem, apesar da falta de massa. Também por questões de desempenho higratérmico pode revelar-se vantajoso, especialmente colocando uma caixa-de-ar ventilada no pano exterior.

Tabela 4.2.7. Propriedades de algumas soluções de Paredes Leves

Designação	Constituição	Isolamento Sonoro – $D_{n,w}$ [dB(A)]	Coefficiente U [W/m ² ·°C]	Energia Incorporada [kWh/m ²]	Peso específico [kg/m ³]	Massa superficial útil – M_u [kg/m ²]	Custo específico [€/m ²]
PL1.1	V1.9+J10+G1.3	46*	2,21	223	37,0	11	35,0
PL1.1	V1.9+J10+2xG1.3	47*	2,04	266	48,5	22	50,0
PL1.4	V1.9+L5+2xG1.3	53*	0,70	288	49,8	22	56,9
PL1.4	V1.9+L10+2xG1.3	60*	0,39	310	51,0	22	60,9
PT(L)3.1	V1.2+J5+V1.9+N8+F2+J0.5+2xG1.3	50	0,40	442	79,0	22	85,9
PT(L)3.2	V1.2+J5+X4+V1.9+N8+F2+J0.5+2xG1.3	50	0,28	561	80,3	22	95,2
PT(L)3.3	V1.9+L8+V1.2+L8+2xG1.3	67*	0,25	449	69,0	22	83,6

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:

F	Fibra de Coco	L	Lã de Rocha	V	Aglomerado de Madeira/Cimento
G	Gesso Cartonado	N	Aglomerado Negro de Cortiça	X	Poliestireno Expandido Extrudido
J	Lâmina de ar	S	Estuque	AB	Vidro

*Soluções com estruturas montantes em perfis de aço galvanizado - Fonte: valores experimentais apresentados em Catálogo (Tabiques Pladur Metal)

4.3. A envolvente exterior transparente e translúcida leve

A envolvente exterior transparente ou translúcida é quase sempre leve, a que corresponde um peso específico inferior a 150kg/m^2 pelo que se optou por enquadrá-la no grupo de fachadas leves. A existência de um caixilho na maior parte das vezes, que pode ser metálico, em madeira, em PVC e mais raramente noutros materiais, implica uma quebra na propriedade essencial destes materiais, a transparência, pelo que este tema não será abordado na secção dos materiais transparentes. Até há poucos anos não existiam materiais de construção que conseguissem cumprir ao mesmo tempo todas as funções que o vidro consegue; resistência numa espessura reduzida, transparência óptica, ganhos solares passivos, protecção (aos ventos, chuva e acústica), etc. Só mais recentemente, nos últimos trinta anos, com o maior desenvolvimento dos polímeros, encontramos materiais alternativos ao vidro disponíveis no mercado. Pelo seu custo e algumas propriedades, como a durabilidade ou a transmissão de radiação luminosa e térmica, o vidro ainda não tem competidores no mercado da construção de edifícios. A partir da análise dos estudos comparativos que aqui se apresentam, onde se focam especificamente os aspectos de energia incorporada e propriedades térmicas e acústicas, ainda que alguns plásticos possam apresentar vantagens competitivas sobre os vidros, não são efectivamente aplicáveis nas situações mais comuns da construção de habitação. Podem no entanto ser interessantes para certas aplicações específicas, como estufas adossadas ou soluções de envidraçados translúcidos, fachadas multi-camadas, paredes de Trombe ou em áreas com menores exigências de segurança à intrusão ou de incêndio. Nalguns tipos de plásticos, pelo contrário, a resistência mecânica consegue ser superior ao vidro, por exemplo o caso dos policarbonatos para soluções de alta segurança.

4.3.1. Vidro em fachadas

O vidro é o material transparente de fachada por excelência, constituindo a solução tradicional e de referência. A sua substituição por materiais alternativos, ainda que sendo possível nalguns casos, não tem significado quantitativo no actual parque habitacional.

O vidro é uma substância inorgânica, homogénea e amorfa, obtida através do arrefecimento duma massa em fusão. As suas principais qualidades são a transparência e a dureza. O vidro distingue-se de outros materiais por várias características: pela sua selectividade à radiação solar, deixando passar a radiação em forma de luz visível e retendo a radiação térmica infra-vermelha, não é poroso nem absorvente, é dieléctrico, possui baixo índice de dilatação e é bastante resistente à compressão (suporta pressões de 5.800 a 10.800kg/cm^2). A condutibilidade térmica é de $1,1\text{W.m/}^\circ\text{C}$, o que, relativamente à sua densidade de 2500kg/m^3 é um valor baixo.

Nos aspectos energéticos, conforme se pode ver na Tabela 4.3.1, existem bastantes propriedades de destaque nos vidros e que são úteis no momento de decidir entre as diversas soluções. Uma delas é a transmissão de radiação luminosa e a transmissão energética de radiação térmica selectiva.

Tabela 4.3.1. Propriedades energéticas e custo económico de vidros de construção

	Transmissão luminosa T_v [%]	Reflexão luminosa exterior R_{se} [%]	Reflexão luminosa interior R_{si} [%]	Transmissão energética T_e [%]	Reflexão energética exterior R_{se} [%]	Reflexão energética interior R_{si} [%]	Coefficiente Global de transferência de calor U [W/m ² °C]	Factor solar [%] EN 410	Coefficiente de Sombreamento	D_{50} [dB(A)] EN ISO 140	Peso próprio [kg/m ²]	Energia de produção incorporada (só vidro) [kWh/m ²]	Custo económico [€/m ²]
Vidro extra-claro 3mm	91	8	8	91	8	8	5,8	0,91	1,05	29	7,5	41,3	25
Vidro extra-claro 4mm	91	8	8	90	8	8	5,8	0,91	1,04	30	10,0	55	29
Vidro extra-claro 5mm	91	8	8	90	8	8	5,8	0,90	1,04	30	12,5	68,8	36
Vidro extra-claro 6mm	91	8	8	90	8	8	5,7	0,90	1,04	31	15,0	82,5	45
Vidro simples incolor 3mm	90	8	8	85	8	8	5,8	0,87	1,05	29	7,5	41,3	13
Vidro simples incolor 4mm	90	8	8	83	8	8	5,8	0,85	0,98	30	10,0	55	15
Vidro simples incolor 5mm	89	8	8	81	7	7	5,8	0,84	0,96	30	12,5	68,8	17
Vidro simples incolor 6mm	89	8	8	79	7	7	5,7	0,82	0,95	31	15,0	82,5	19
Vidro pirolítico incolor face ext.reflect. 6mm	47	32	26	51	26	19	5,7	0,57	0,66	31	15,0	82,5	37
Vidro simples incolor 10mm	86	8	8	72	7	7	5,6	0,78	0,89	33	25,0	137,5	29
Vidro simples incolor 19mm	82	7	7	60	6	6	5,3	0,69	0,79	37	47,5	261,3	110
Vidro laminado 6mm	89	8	8	75	7	7	5,7	0,79	0,91	36	15,5	85,3	34
Vidro laminado 8mm	87	8	8	71	7	7	5,7	0,77	0,89	37	25,5	140,3	40
Vidro laminado 10mm	86	8	8	68	7	7	5,6	0,75	0,86	37	25,5	140,3	46
Vidro laminado de protecção 22mm	82	7	7	53	6	6	5,4	0,64	0,73	38	50,0	275	230
Vidro duplo incolor 4+(6)+6mm	80	14	14	67	13	10	3,3	0,74	0,85	34	25,0	137,5	32
Vidro duplo incolor 4+(12)+6mm	80	14	14	67	13	10	2,9	0,75	0,86	33	25,0	137,5	32
Vidro duplo incolor 5+(12)+5mm	80	14	14	66	12	13	2,8	0,74	0,85	32	25,0	137,5	34
Vidro duplo c/ baixa emissiv. 6+(10)+4mm ar na caixa-de-ar	75	12	14	49	25	18	1,9	0,57	0,65	34	25,0	137,5	52
Vidro duplo c/ baixa emissiv. 6+(16)+4mm ar na caixa-de-ar	75	12	14	49	25	18	1,4	0,57	0,65	34	25,0	137,5	56
Vidro duplo c/ baixa emissiv. 6+(16)+4mm argon na caixa-de-ar	75	12	14	49	25	18	1,1	0,57	0,65	34	25,0	137,5	68
Vidro duplo c/ película de isolamento acústico no vidro interior 6+(12)+10.8mm	79	14	14	60	12	15	2,8	0,71	0,81	37	30,5	167,8	83
Vidro duplo c/ película de isolamento acústico em ambos os vidros 6.8+(9)+10.8mm	77	14	14	55	11	19	3,0	0,67	0,77	41	41,0	225,5	124
Vidro duplo c/ película de isolamento acústico em ambos os vidros 8.8+(12)+12.8mm	76	14	14	52	10	24	2,7	0,64	0,73	47	47,0	258,5	180

Fonte: (Saint-Gobain 2000)

Da análise da Tabela 4.3.1 podemos verificar que um vidro simples incolor convencional de 5mm deixa passar 89% da luz visível

através dele e 81% da energia de radiação solar térmica, mas existem vidros extra-claros, com melhor transmissão, podendo chegar a 91 e 90% para as mesmas transmissões, respectivamente. A energia de produção incorporada, que varia entre 55 e 275kWh/m², é rapidamente amortizada nos ganhos solares térmicos, principalmente para as soluções com melhores compromissos entre Resistência térmica, transmissão energética e custo económico.

Têm sido desenvolvidos vários tipos de vidros especiais. Para se ponderar a aplicação de cada um deles, tem de se determinar qual o objectivo principal:

- reduzir as perdas de calor por transmissão;
- aumentar a protecção solar;
- providenciar várias propriedades controláveis.

É possível reduzir as perdas de calor por transmissão, aplicando protecções de baixa emissividade. Elas são úteis em intervalos de infravermelhos de onda-longa, pelo que melhoram a sua selectividade, a propriedade que permite explorar o efeito de estufa. A resistência térmica também pode ser aumentada com o uso de gases nobres entre os panos de vidro, ou utilizando isolamentos nocturnos.

Assim, os vidros absorventes clássicos, não representam uma boa solução. Mesmo sabendo que a transmissão é reduzida entre 45 a 50%, a absorção está quase na mesma magnitude, o que resulta em vidros que atingem elevadas temperaturas em dias de muita exposição solar. Por um lado surgem problemas de conforto térmico, por outro ocasionam-se dilatações térmicas substanciais no vidro, que podem levar inclusivamente à sua ruptura. Este tipo de efeitos "secundários" podem ser prevenidos se forem utilizados vidros reflectantes, com filmes ou tratamentos de reflexão solar. O aumento da reflexão solar tem no entanto, como consequência, a redução dos ganhos solares e da iluminação (durante a estação de Inverno), o que implica que esta solução só é boa para orientações desfavoráveis, nomeadamente de NE a NO ou em áreas excessivas de envidraçados sem sombreadores.

De modo a evitar conflitos entre as necessidades de Inverno e de Verão, têm sido desenvolvidos vidros de propriedades variáveis, e controláveis, tais como:

- **Fototrópicos:** a transmissibilidade do vidro fototrópico depende da intensidade da radiação incidente, quanto mais alta esta for, menor é a transmissibilidade. Este efeito não é contudo desejável no Inverno;
- **Termotrópicos:** em vidros termotrópicos, a transmissibilidade varia em função da temperatura. Este já é um sistema cujo princípio de funcionamento é mais interessante no que diz respeito ao aproveitamento passivo da energia solar se o vidro puder ficar transparente abaixo dos 20°C;
- **Cromogénicos:** consegue-se controlar as propriedades dos vidros cromogénicos, a partir da introdução de uma diferença de potencial eléctrico entre as suas superfícies.

4.3.2. Outros materiais transparentes e translúcidos

Os outros materiais transparentes ou translúcidos, alternativos ao vidro tais como: os acrílicos, os vidros duplos e triplos com isolamentos na caixa-de-ar e as placas de polycarbonato, constituem soluções interessantes do ponto de vista da optimização energética das construções. Ao associarem uma grande transmissibilidade e consequentes ganhos térmicos directos, com uma boa capacidade de isolamento térmico e assim a manutenção do calor no interior, durante a noite, mesmo sem recurso a sistemas de oclusão nocturnos são muitas vezes chamados de isolamentos transparentes ou translúcidos. A definição de isolamento não poderá ser a mesma que no caso dos materiais opacos, já que neste caso terá de ser considerado que os ganhos solares térmicos ou em iluminação natural obtidos vão de alguma forma compensar as inevitáveis perdas. Para a definição de isolamento transparente optou-se aqui por considerar todos os materiais com um Coeficiente U inferior a $3,00\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. Aparecem contudo na Tabela 4.3.2, algumas soluções com valores superiores a este, normalmente soluções simples, que servem aqui de referência.

Tabela 4.3.2. Propriedades de isolamentos translúcidos e transparentes em comparação com vidros

	Reflexão luminosa	Absorção luminosa	Transmis-são luminosa	Peso próprio (kg/m ²)	Energia Incorporada (Kwh/m ²)	Coeficiente U [W/m ² °C]	Durabilidade
Vidro simples incolor 5mm	8%	7%	89%	12,50	68,8	5,80	+50anos
Vidro duplo incolor 4+(12)+6mm	14%	6%	80%	25,00	137,5	2,90	+50anos
Vidro duplo c/ baixa emissividade 6+(10)+4mm	12%	13%	75%	25,00	137,5	1,90	+50anos
Vidro duplo c/ baixa emissividade 6+(16)+4mm	12%	13%	75%	25,00	137,5	1,40	+50anos
Vidro duplo c/ baixa emissividade 6+(16)+4mm (argon na caixa-de-ar)	12%	13%	75%	25,00	137,5	1,10	+50anos
Polycarbonato alveolar (Arcolite twin-wall sheet 10mm sp. data)	6%	11%	83%	2,00	48,4 ***	3,13	+10 anos
Polimetilmetacrilato 2mm *****				2,36	57,1 ***		+25anos
PVC biorientado 7mm (placa de PVC rígida)				9,80	213,2		+25anos
Poliétileno 0,2mm*****				0,18			2-5 anos
Membrana PVC transparente (Carlo Borsa – Borsacover KR S.r.l. 0,5mm)				0,40	8,7 ***	5,80	2-5 anos
Tela PVC / Poliéster branca (Precontraint Ferrari 392-0,5mm)	59%	15%	26%	0.85	18,3 ***	5,80	10 anos
Tela dupla de PVC / Poliéster branca com caixa-de-ar de 25cm*	n.d.	n.d.	n.d.	1.15	36,6 ***	2,70	10 anos
Tela PTFE (Teflon) / Fibras de Vidro (Chemfab Sheerfill IV A spec. data)	70%	8%	22%	0.81	14,4 ***	0,97	+25anos
Tela de Silicone / Fibras de vidro (DCI Softglass 500 specification data)	60%	15%	25%	0.88	-	0,97	+25anos
Tela dupla de PTFE / Fibras de Vidro com caixa-de-ar de 25 cm*	60 – 70%	28 – 34%	4 – 6%	1.63	28,8 ***	2.04	+25anos
Tela de ETFE (Película 1710 kg / m ³ - 0.5mm)	n.d.	n.d.	95%	0.86	18,38 ***	-	+25anos

*R.E. Shaeffer

**Kapipane system of translucent insulation composed of two layer of glass filled with oblique 3,5mm diameter tubes of glass

***Valores deduzidos a partir da Tabela 2.2.2 (considerando apenas a energia primária necessária para produzir os dois componentes do material e excluindo fabrico da tela)

****Hestnes, 1997; p.27

*****[Colás 1987]

Os materiais de isolamento transparentes podem ser descritos como materiais que ao mesmo tempo têm uma grande capacidade de isolamento térmico e transmissão solar. Geralmente o termo inclui materiais que não são visualmente

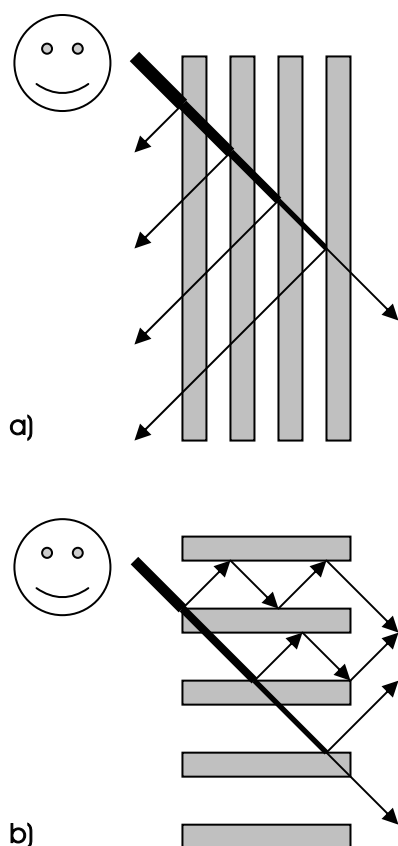


Figura 4.3.1. Isolamento transparente através de elemento absorvente / paralelo (a) e absorvente perpendicular (b)

transparentes mas translúcidos. Os materiais de isolamento transparentes podem ser classificados segundo a sua estrutura geométrica em quatro tipos:

1. **Absorvente/paralelo:** consiste em camadas de vidros ou plásticos colocados transversalmente e nalguns casos com revestimentos com reflexão aos infra-vermelhos interiores. O seu rendimento é menor, pois a percentagem de energia reflectida é muito elevada, pela acumulação de reflexões nos diversos panos (Figura 4.3.1.a)) (vidros duplos);
2. **Absorvente/perpendicular:** consistem em tubos de plástico ou vidro colocados transversalmente aos panos duplos onde se inserem. Este sistema proporciona um rendimento elevado pois as reflexões tendem a conduzir a radiação para o interior do painel, especialmente com alturas do sol menores (Figura 4.3.1.b));
3. **Estruturas em cavidades:** é uma combinação entre as estruturas paralelas e as perpendiculares. As perdas por reflexão são elevadas (painéis alveolares fechados; espumas translúcidas);
4. **(Quase-)Homogéneos:** caracterizados por uma grande absorção. Este sistema também proporciona um rendimento elevado (Aerogel de sílica e fibra de vidro podem ser considerados deste grupo) (Hestnes 1997).

Como soluções translúcidas e transparentes isolantes têm surgido materiais poliméricos alternativos ao vidro, como o policarbonato, ou membranas têxteis e compósitas, bem como películas de grande transparência, nalguns casos, mas sempre com durabilidade inferior ao vidro. No caso das membranas, aparecem algumas com valores médios estimados em mais de 25 anos, o que equivale a aproximadamente metade da durabilidade prevista dum vidro, com a vantagem dum peso e espessura muito mais reduzidos, o que pode tornar estas soluções competitivas sob o ponto de vista da energia incorporada, como se pode ver analisando a Tabela 4.3.3, mesmo que se considere uma substituição ao fim de 25 anos para prefazer uma vida útil equivalente a mais de 50 anos.

Pode no entanto também concluir-se que a justaposição de duas ou mais telas e vidros com uma caixa-de-ar aumenta a capacidade de isolamento, mas reduz significativamente os ganhos solares. A introdução de isolamentos translúcidos no interior, como gel, lã de vidro, polietileno, etc, permitem incrementar ainda mais o isolamento térmico mas reduzem drasticamente a transmissão de radiação solar.

Em climas frios, a situação ideal seria a utilização de grandes áreas com ganhos térmicos directos utilizando materiais translúcidos isolantes, no entanto em climas temperados, como o caso de Portugal, a utilização destes sistemas terá de ser mais contida e alvo de um estudo quanto à sua área máxima e ao seu sombreamento consoante a orientação.

Um valor de isolamento elevado não é, por si só, efectivo nalguns casos, e pode mesmo ser problemático. Os sistemas de sombreamento tornam-se essenciais para um bom desempenho

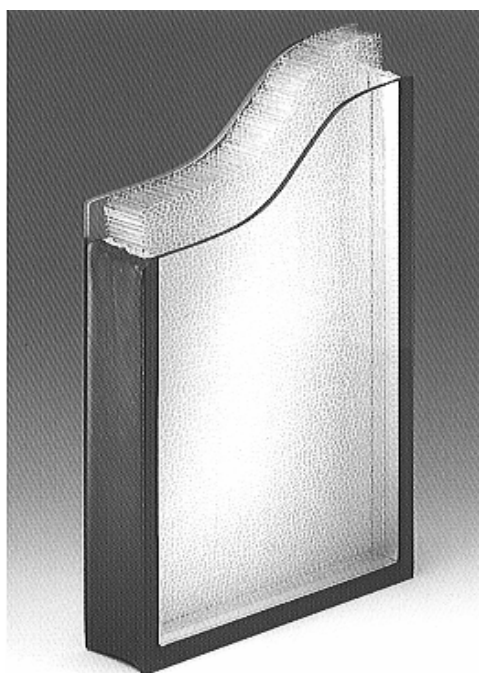


Figura 4.3.2. Painel de isolamento translúcido "Kapilux-H" (Herzog 1996)

térmico das fachadas com materiais de isolamento transparente expostas, pelo que as características do sombreamento devem obedecer a certas regras. Nos sistemas de sombreamento fixos estes aspectos têm de ser definidos tendo em conta a exposição solar de cada orientação de fachada. Uma outra hipótese é usar sistemas móveis, que se tornam mais independentes da orientação, mas ainda assim fazem depender desta a decisão entre o seu posicionamento exterior ou interior e a sua côr. Estes aspectos serão detalhadamente referidos no Capítulo V.

Como a maior parte dos isolamentos transparentes (se não considerarmos os vidros duplos e triplos como isolamentos transparentes) não apresentam uma transparência equivalente à do vidro, a sua utilização não se faz normalmente em substituição deste, mas antes em casos específicos, tais como clarabóias, ou em substituição de vidros foscos ou tijolo de vidro. A utilização de isolamentos transparentes em paredes acumuladoras faz reduzir as perdas térmicas, mas também os ganhos solares, como se pode concluir da análise da Tabela 4.3.2, pelo que a sua utilização em climas temperados não é tão viável para este tipo de aplicação, ao contrário de climas frios, como os do Norte da Europa, onde a sua utilização em vez de vidros ou plásticos simples se mostra mais rentável, especialmente em colectores solares (Hestnes 1997).

a) Painei "Kapilux-H"

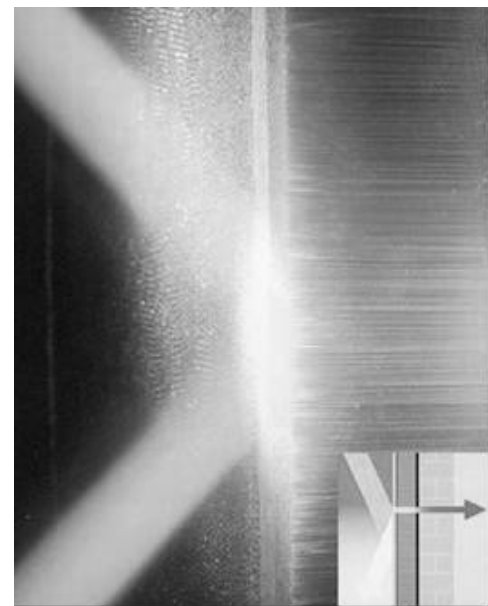
Este painel (Figura 4.3.2) é um compósito baseado no sistema "Kapipane" (Herzog 1996). Este último consiste na sobreposição de uma série de tubos de vidro de 3,5mm de diâmetro transversalmente colocados em relação às duas placas (de vidro) que formam o painel "sandwich". Este sistema pode ser utilizado como colector de radiação solar, revestindo paredes opacas com grande capacidade de armazenamento de calor, ou então servir directamente como material transparente em fachada, com a propriedade particular de, com metade da espessura de outros painéis, possuir um coeficiente U de $0,8\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e uma transmissão total de radiação térmica de 80 % (valores obtidos com painel em vidro duplo Kapilux – H) (Herzog 1996). Além disso, pela refacção da luz solar que é provocada nos tubos de vidro, os painéis Kapipane e Kapilux permitem uma iluminação mais uniforme dos compartimentos, deixando que a luz solar chegue a zonas mais interiores (Herzog 1996). Permitem igualmente ser selectivos nos ganhos solares, permitindo a passagem da radiação no Inverno (Figura 4.3.3.b) e impedindo-a no verão (Figura 4.3.3.a), mesmo sem necessidade de recurso a sombreadores.

b) Policarbonato

É um plástico amorfo e transparente, com uma temperatura de trabalho até 135°C . Tem muito boas propriedades mecânicas, nomeadamente resistência ao impacto e tenacidade, boa resistência química (excepto aos alcalis) e boa estabilidade dimensional (Miravete 1994). Encontrou rápida aplicação em mobiliário, aparelhos electrodomésticos, luminotecnica, capacetes de protecção, onde se necessitava transparência e resistência mecânica e temperatura de funcionamento algo elevada. A sua utilização mais comum em construção é em forma de chapas



a)



b)

Figura 4.3.3. Funcionamento do Painei de isolamento translúcido "Kapilux-H" no Verão e no Inverno (Herzog 1996)

alveolares, que aliam isolamento térmico a leveza e resistência mecânica relativamente elevada para o seu peso próprio. Trata-se por isso do material que actualmente se utiliza mais frequentemente em construções como alternativa ao vidro.

A principal desvantagem do policarbonato alveolar é não se conseguir obter placas totalmente transparentes como o vidro, mas apenas semi-transparentes.



Figura 4.3.4. Cobertura em PMMA do Estádio Olímpico de Munique

c) Chapa de Polimetacrilato de Metilo (PMMA)

O PMMA, vulgarmente chamado de acrílico, é um dos plásticos transparentes mais utilizados em construção, nomeadamente em iluminação. Além da sua rigidez e tenacidade, boa resistência química (excepto a ácidos e alcalis concentrados e bastante dissolventes) e à intempérie, fácil moldagem e bom comportamento dieléctrico, o PMMA apresenta uma transparência equivalente aos vidros mais cristalinos, incluindo o seu índice de refacção (Miravete 1994). De início utilizados em vidros de segurança, a sua utilização actualmente é comum em objectos de decoração e mobiliário, em aplicações industriais (por exemplo janelas de aviões e pára-brisas) e em janelas e coberturas como a do Estádio Olímpico de Munique (Figura 4.3.4.) de Frei Otto, como uma alternativa ao vidro, sendo mais leve, resistente e flexível.



Figura 4.3.5. Pavilhão dos Leões no Zoo de Munique

d) Membrana de ETFE

A membrana de ETFE consiste numa folha de filme polimérico deste material. Ainda que investigadas e utilizadas desde 1950, as películas tornaram-se aplicáveis em arquitectura com a introdução do ETFE, feito dum copolímero resultante da ligação de monómeros de etileno e tetrafluoretileno (Robbin 1996). Este material consegue ser praticamente tão transparente como o vidro mas ao mesmo tempo ser flexível e apresentar uma grande resistência à tracção e leveza, o que o torna o único passível de ser utilizado em soluções de membrana transparentes autoportantes (Figura 4.3.5).

Craig Schwitter, da Buro Happold Consulting Engeneers, de Bath, estudou e usou películas de ETFE e catalogou as suas propriedades (Robbin 1996):

- Ao contrário de outras películas, as de ETFE são praticamente insensíveis aos raios ultravioletas. Ocorreu menos de 10% em perda de resistência do material, após um teste de exposição solar acelerada equivalente a 10.000 horas de exposição reais. Amostras expostas a condições naturais (no Arizona e em Bombaim), também tiveram um bom comportamento e o tempo de vida esperado para o material é de 25 a 50 anos;
- As películas de ETFE são também resistentes à água e à maior parte dos poluentes químicos que se encontram vulgarmente no ar;
- Têm uma grande resistência ao rasgo e têm uma grande capacidade de alongamento antes da ruptura (28N/mm^2), o que significa que os pequenos furos não se propagam;
- As películas de ETFE podem ser fabricadas com uma grande variedade de transparência (20-95% de transmissão

luminosa). Pode ser aplicado pigmento de cor à película, durante o fabrico ou impressas tramas de pontos.

As películas ETFE passaram pelos ensaios de resistência ao fogo, tanto na Inglaterra como na Alemanha. O material é resistente às chamas e quando derrete não forma gotas quentes que poderiam cair sobre as pessoas debaixo dela, e provocar queimaduras (Robbin 1996).

As películas de ETFE têm finalmente um outro atractivo que é um custo de produção relativamente baixo (Robbin 1996).

Todas as almofadas insufláveis de película são bons isolantes térmicos, especialmente quando formados por almofadas de 3 películas. As costuras, coladas a quente de modo a tornarem-se estanques são normalmente fixas a caixilhos de alumínio extrudido. A Buro Happold Consulting Engineers desenvolveu dois tipos de suporte para as almofadas: um caixilho rígido como uma janela normal e uma estrutura flexível de cabos suspensos que permite às almofadas moverem-se sobre as pressões do vento e as pressões térmicas. Em áreas onde os nevões podem ser grandes, finos cabos de aço podem suportar os painéis de película, que estão limitados em largura aos 3,6m, mas podem ter mais de 15m de comprimento. As películas de ETFE perdem força a cerca de 60°C, o que as torna desaconselhadas para climas extremamente quentes (Robbin 1996).

Em 1992, a Buro Happold usou um sistema de almofada com caixilho rígido na cobertura do átrio do Westminster Chelsea Hospital, com uma nave central e quatro naves cruzadas - a estrutura tem cerca de 116 por 85m - e com vãos de 20m. Uma pressão de ar contínua foi injectada nas almofadas através dos perfis de alumínio. A maior almofada, com 3 por 4m foi insuflada a uma pressão baixa de 400Pa. Está actualmente a ser projectada uma cobertura flexível de 6000m² de superfície para 10 campos de ténis com painéis de 3 por 18m. A rede de cabos é suportada por mastros e fixa ao solo (Robbin 1996).

e) PRFV translúcido

A transmissão de luz num material compósito de PRFV translúcido exposto directamente às condições atmosféricas exteriores depende do tipo e quantidade de resina utilizada. Scott Bader observou uma redução de 14% em cinco anos da transmissão de luz na resina Crystic 191 E, reforçada com mat de vidro com um rácio fibra/matriz de 30/70% em peso e com um gel-coat contendo um fino tecido de superfície. O mesmo material compósito sem gel-coat tem uma redução de 30% e a resina com mat de vidro com um rácio fibra/matriz de 35/65% por peso, tem uma redução de aproximadamente 70%. A acumulação de sujidade na superfície interior de laminado PRFV utilizados como placas de cobertura é causa principal da redução na transmissão da luz pelo que é aconselhável a limpeza periódica destas superfícies (Miravete 1994).

f) Placa ondulada de fibra de vidro E e resina de poliéster

A alta resistência da fibra de vidro à tracção, ao calor e aos ataques químicos une-se, nas placas onduladas, à elevada estabilidade química e resistência à intempérie da resina de poliéster. Na placa ondulada obtém-se uma grande resistência à flexão longitudinal e flexibilidade transversal. As Propriedades físicas das placas de fibra de vidro / poliéster encontram-se resumidas na Tabela 4.3.3.

Trata-se dum material que teve as suas origens comerciais em meados do século XX, cujas principais características são a leveza (peso próprio aproximado de 2Kg/m^2), uma resistência de cerca de 300kg/m^2 e uma transparência que pode chegar aos 90% em cor natural. Em Espanha, a superfície que se cobriu com placas onduladas de poliéster reforçado com fibra de vidro, foi superior a 4 milhões de metros quadrados por ano em 1994 (Miravete 1994).

A utilização destas placas é comum em pequenas coberturas, mas também pode ser utilizada em fachadas, seguindo o mesmo sistema de fixação, como se pode ver na Figura 4.3.6. A instalação deverá obedecer a certas regras:

- A distância entre apoios oscila normalmente entre 1 e 1.5m;
- Deve iniciar-se a colocação pelo lado oposto aos ventos dominantes e de baixo para cima;
- Deverão sobrepor-se as placas;
- A fixação deverá realizar-se colocando os acessórios adequados no topo da onda e utilizando suportes de apoio a fim de evitar deformações nas ondas. As zonas de borda deverão ser reforçadas com menor afastamento dos pontos de fixação.

Propriedades químicas:

- Resistente a óleos minerais, ácidos e alcalis diluídos;
- Imputrescível e resistente a roedores;
- Evitam os pares galvânicos nos pontos de união com os acessórios, dado o seu carácter dieléctrico;
- Não resistente a ácidos e alcalis concentrados e a certos diluentes orgânicos.

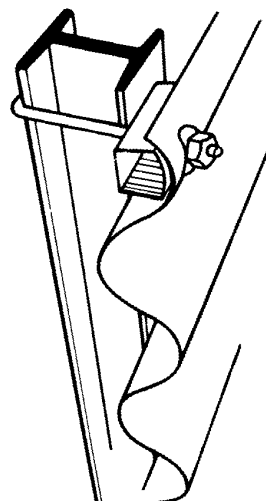
Tabela 4.3.3. Propriedades físicas das placas de fibra de vidro / poliéster

	Método de ensaio	Valores médios
Conteúdo em fibra de vidro	UNE 53301	25%
Absorção de água a 20 °C	UNE 53301	20mg máximo
Resistência à tracção	UNE 53280	750 – 90kg / cm ²
Resistência à flexão	UNE 53301	1500 – 1800kg / cm ²
Módulo de elasticidade	UNE 53288	0.97 – 1.5 x 10 ⁻⁵ kg/cm ²
Resistência à compressão	UNE 53189 PIV	2400 – 2600kg/cm ²
Ensaio de resistência ao choque	UNE 53292	95 – 100kg.cm/cm ²
Transmissão luminosa	UNE 53301	Natural 90 %
		Azul pálido 60-65 %
		Amarelo 50-55 %
		Verde 45-50 %
		Branco opalino 25-30 %
		Azul intenso 15-20 %
Potência calorífica	UNE 23103	5000–6000kcal/m.h.°C
Coefficiente de dilatação térmica	UNE 53126	1.6 x 10 ⁻⁵ °C
Condutibilidade térmica	UNE 53037	0.2326W/m.°C
Variação dimensional	UNE 53301	3% máxima
Densidade	UNE 53020 1R	1.500kg/m ³

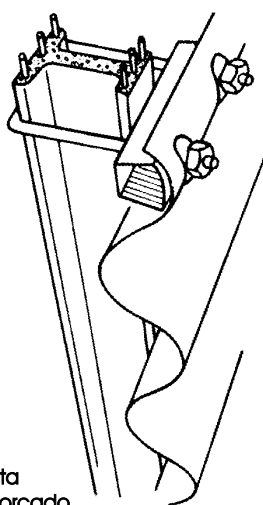
Fonte: (Miravete, 1994).



Estrutura em madeira



Estrutura em Ferro



Estrutura em vigota de betão pré-esforçado

Figura 4.3.6. Sistemas de fixação de placas onduladas de fibra de vidro / poliéster a estruturas (Miravete 1994)

4.3.3. Aspectos ambientais

As reservas de matérias-primas para o fabrico de vidro são abundantes, ainda que os depósitos de areia de quartzo possam ser regionalmente limitados. Na Tabela 4.3.4 podem ver-se os valores percentuais das matérias-primas constituintes do vidro e a sua percentagem na crosta terrestre. O principal constituinte dos vidros, a sílica, é a matéria-prima mais abundante na crosta terrestre. O principal problema, está no consumo energético necessário para a fusão da pasta de vidro, o que lhe confere uma energia incorporada relativamente elevada ($5,5\text{kW.h/m}^2$) e uma energia incorporada por m^2 bastante alta relativamente a outras soluções (conforme pode ver na Tabela 4.3.2), em parte devido à sua elevada densidade.

Tabela 4.3.4. Matérias-primas constituintes do vidro e % na crosta terrestre

Óxido	% na crosta terrestre	% nos vidros comuns
SiO_2 (sílica)	60	74,0
Al_2O_3 (alumina)	15	2,0
Fe_2O_3 (Óxido de Ferro)	7	0,1
CaO (cálcio)	5	9,0
MgO (magnésio)	3	2,0
Na_2O (sódio)	4	12,0
K_2O (potássio)	3	1,0

Fonte: (Saint-Gobain 2000)

As reservas acessíveis de óxidos metálicos para a coloração ou revestimento dos vidros, por exemplo em vidros de baixa emissividade, como o estanho ou o ouro, são muito limitadas.

A poluição por poeiras de quartzo e de cloreto de cálcio pode também ocorrer. Quando o óxido de estanho é aplicado como vapor, são emitidos fluoreto de hidrogénio e cloreto de hidrogénio, além da poluição do estanho. A folha de ouro causa menos poluição que o estanho.

O vidro não liberta substâncias poluentes em utilização, mas após vertido e exposto ao ar livre pode emitir trióxido de antimónio e trióxido de arsénico e assim ser poluente. O vidro colorido e com película metálica pode conter partículas de metais pesados, que podem ser libertados e conduzidos pela água em aterro e devem por isso ser mantidos em aterros especiais.

O vidro incolor é o mais apropriado para reciclagem. A produção de vidro novo pode em princípio utilizar até 50% de vidro reciclado. O vidro reciclado pode igualmente ser utilizado na produção de lâ de vidro, de espuma de vidro e de vidro granulado. O vidro revestido com películas metálicas não pode ser reciclado.

Alguns materiais compósitos alternativos ao vidro são difíceis de reciclar, pelo menos para cumprirem a mesma função, embora possam por exemplo ser recicladas como materiais isolantes, para preencher as caixas-de-ar em paredes duplas. Alguns compósitos também podem ser convertidos em energia, através de queima, desde que se tenha o cuidado de utilizar sistemas de filtragem de fumos (Berge 1999).

Quanto aos plásticos, recentes estudos em tecnologia de polímeros revelam possibilidades de redução substancial do impacto ambiental no fabrico destes materiais, por exemplo usando polímeros naturais misturados com polímeros sintéticos. Reciclar alguns tipos de plásticos (termoplásticos) pode ser inclusivamente muito mais eficiente do ponto de vista energético do que reciclar vidro, o que pode ser visto na Tabela 4.3.5.

Tabela 4.3.5. Potencial de economia de Energia pela utilização de Materiais reciclados

	Energia de produção economizada por reciclagem (em percentagem)
Alumínio	95%
Plástico	88%
Vidro	5%
Papel de Jornal	34%

Fonte: Roberta Forsell Stauffer da National Assistance Service, in Resource Recycling, January / February 1989

4.4. Os sistemas mistos da envolvente exterior

A envolvente exterior é geralmente caracterizada por ser um conjunto de materiais ou camadas de materiais onde cada componente desempenha uma determinada função. A análise da optimização das funções conduz a um tipo de parede que se pode considerar de mista, sob o ponto de vista de peso próprio dos panos, ou de transparência.

O que caracteriza uma parede múltipla mista é o facto de ser composta por dois ou mais panos e estes terem propriedades muito diferentes. Em muitos casos estão ligados um ao outro, sendo que assim se poderiam entender como paredes simples. No entanto, a existência de uma caixa-de-ar, na maior parte dos casos com isolamento, confere-lhe as características de uma parede multi-camada. Faz-se aqui a distinção entre paredes em que todos os panos são opacos (parede dupla mista opaca) e paredes em que um ou mais dos panos é opaco e um ou mais dos panos é transparente (parede dupla mista transparente / opaca).

4.4.1. Parede dupla mista opaca

As paredes duplas mistas são relativamente recentes e apresentam-se como aquelas paredes mais eficientes do ponto de vista da relação entre peso próprio, massa térmica útil, desempenho higrotérmico e acústico, espessura e custo económico. São basicamente paredes simples onde o isolamento é colocado do lado exterior, mas, ao contrário dos sistemas de isolamento exterior aderido, onde o acabamento é colado sobre o isolamento que por sua vez se cola à parede, neste caso, o material de acabamento exterior é independente. A maior parte das propriedades são muito semelhantes ao sistema de isolamento pelo exterior, mas neste caso existem muito mais opções nos materiais de isolamento a aplicar na caixa-de-ar, o que permitirá incrementar por exemplo o desempenho acústico, nomeadamente pela utilização de materiais com capacidade de isolamento acústico e térmico combinados. Na Tabela 4.4.1 apresentam-se alguns exemplos de Paredes duplas mistas opacas. Algumas propriedades de várias paredes deste tipo são detalhadamente apresentadas no Anexo 3, bem como representações esquemáticas das mesmas no Anexo 2.

Tabela 4.4.1. Propriedades de algumas soluções de Paredes Mistas

Designação	Constituição	Isolamento Sonoro – $D_{n,w}$ [dB(A)]	Coefficiente U [W/m ² ·°C]	Energia Incorporada [kWh/m ²]	Peso específico [kg/m ³]	Massa superficial útil – M_u [kg/m ²]	Custo específico [€/m ²]
PMD4/20	E3+J5+XP4+C20+R2	53	0,62	692	578	150	127,3
PMT2	AB0.5+J9.5+R2+T15+J5+XP4 +T11+R2	44	0,45	1059	327	138	76,1
PMD2.1/15	V1.2+J5+N5+B15+H0.5	53	0,44	171	257	150	45,6

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	H	Cal	S	Estuque
B	Alvenaria de Adobe	J	Lâmina de ar	T	Tijolo Furado
C	Betão Armado	L	Lã de Rocha	V	Aglomerado de Madeira/Cimento
E	Placas de Pedra	M	Tijolo Maciço	X	Poliestireno Expandido Extrudido
F	Fibra de Coco	N	Aglomerado Negro de Cortiça	AB	Vidro
G	Gesso Cartonado	R	Reboco		

4.4.2. Parede dupla mista transparente / opaca

Nesta classificação temos uma parede pesada simples (opaca) associada a uma parede ligeira exterior, mas neste caso transparente. As paredes duplas deste tipo constituem o sistema de ganho solar passivo indirecto designado por Parede de Trombe, que serão mais detalhadamente desenvolvidas no Capítulo V. As propriedades energéticas base deste sistema de paredes podem ser obtidas pela conjugação dos envidraçados mais as paredes opacas correspondentes à solução a estudar, nomeadamente no que diz respeito à energia incorporada, ao custo económico, ao peso próprio. No entanto, nos aspectos ligados à manutenção do conforto higrotérmico, não basta analisar o seu Coeficiente U, pelo que estas soluções terão de ser analisadas duma forma mais complexa, já que existem ganhos térmicos e terá de ser feito um balanço global do seu desempenho térmico ao longo do ano, em função da sua orientação, sombreamento, etc. Desta forma, para este tipo de soluções não é tão fácil resumir numa tabela o seu desempenho.