

34

MATERIAIS INOVADORES NA CONSTRUÇÃO

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo •

Prof. Dr. Antonio Carlos Vieira Coelho

- 34.1 Introdução, e-21**
- 34.2 Materiais Frios e Responsivos, e-22**
- 34.3 Materiais de Mudança de Fase, e-26**
- 34.4 Isolantes de Alta Eficiência, e-27**
- 34.5 Materiais Autolimpantes, e-30**
- 34.6 Materiais com Gradação Funcional e a
Otimização Topológica, e-32**
- 34.7 Conclusões, e-35**

34.1 INTRODUÇÃO

A construção gera diversos impactos ambientais nas diferentes etapas do longo ciclo de vida (Agopyan; John, 2011). Na etapa de construção, os materiais nela empregados correspondem a mais da metade dos recursos naturais extraídos no planeta (Krausmann *et al.*, 2009; 2017). Materiais como cimento e aço são muito consumidos e fazem uso intensivo de energia e combustíveis fósseis na sua fabricação (Scrivener; John; Gartner, 2018; Allwood *et al.*, 2011), tornando esses setores industriais importantes com relação às emissões de gases do efeito estufa e aos problemas relacionados à mudança climática. O concreto, material mais consumido pelo homem, tem pegada hídrica elevada (Mack-Vergara; John, 2017).

A construção possui um ciclo de vida longo (Dunant *et al.*, 2021), permanecendo seus subsistemas (estrutura, fachada, cobertura, pisos) em estoque por dezenas de anos (Goulouti *et al.*, 2021). Um terço da energia global é usada para manter os edifícios aquecidos ou refrigerados em condições de atender as demandas de conforto térmico da população (Heeren *et al.*, 2015; UNEP, 2022).

Resíduos de construção são gerados nas atividades de construção, reforma ou demolição, por quase metade dos resíduos sólidos das cidades (Angulo; Ulsen, 2023). O descarte irregular e uso de áreas de aterros clandestinos causam proliferação de vetores (mosquitos, aranhas), doenças e acidentes (deslizamentos em áreas irregulares) gerando custos elevados para a sociedade, incluindo certos problemas relativos à toxicidade humana (Torgal; Jalali; Fucic, 2012).

A construção nas cidades também causa impactos relevantes para a sociedade, como ilhas de calor (Prado; Ferreira, 2005), impermeabilização excessiva do solo e enchentes. Assim, de forma geral, o setor da construção tem importantes desafios para a sustentabilidade, que precisam ser vencidos por meio da inovação e envolvimento do setor e da sociedade (Agopyan; John, 2011).

A desmaterialização, ou seja, fazer com menos quantidade de recursos, é uma importante estratégia (UNEP, 2011). Essa estratégia é possível quando se otimiza a topologia (Stromberg *et al.*, 2011), se muda a resistência do material e as dimensões estruturais da peça no projeto (Habert *et al.*, 2012), se adota uma concepção estrutural mais arrojada do edifício (Belizario-Silva *et al.*, 2021).

Novos materiais são necessários para evitar o consumo de energia nos edifícios, evitar uso de combustíveis fósseis, facilitar a manutenção, despoluir o

ambiente construído, assim como rever a manufatura (Allwood *et al.*, 2011), viabilizando a desmontagem do edifício (que depende de construção modular), reúso de componentes e adoção de estratégias de economia circular, adaptação e flexibilidade de uso nos edifícios (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Brussels Environment, 2019).

A pesquisa científica avança e os materiais e suas propriedades são constantemente repensados. Acompanhar o progresso da ciência e inovação é fundamental para qualquer pesquisador, professor universitário ou aluno de graduação ou de pós-graduação, que pretenda compreender e atuar nas demandas de futuro, posicionando-se bem profissionalmente e para a sociedade.

Com relação às inovações, temos hoje diversos novos materiais usados para melhorar o desempenho térmico, promover autolimpeza e facilitar manutenibilidade dos edifícios, como materiais isolantes de alta eficiência, materiais frios e responsivos, de mudança de fase, autolimpantes, autocicatrizantes, multifuncionais, outros vinculados a otimização topológica, graduação funcional, a manufatura aditiva e a Indústria 4.0.

34.1.1 Objetivo

Apresentar algumas classes de materiais inovadores, e os respectivos fundamentos científicos empregados no desenvolvimento desses materiais, a partir da experiência com a disciplina PCC-5863 do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP).

Espera-se que, a partir da leitura do capítulo, possa ser feita uma reflexão sobre metas interessantes para futuros engenheiros e professores, dentre as quais poderiam ser mencionadas:

- aquisição de conhecimentos científicos mais aprofundados sobre materiais e sistemas construtivos inovadores, a partir da leitura de artigos de revistas internacionais indexadas e discussões em grupo;
- aprimoramento da capacidade de análise crítica, realizando integração e sistematização de informações contidas na revisão bibliográfica, e gerando posicionamento claro com relação ao estado da arte ou de conhecimento sobre determinado assunto;
- capacitação dos alunos para elaboração e desenvolvimento de temas livres, algo que é comumente exigido em concursos de seleção de professores universitários, diferenciando-os no aspecto de excelência acadêmica;

- introdução de conceitos fundamentais normalmente apresentados de forma superficial para alunos de graduação (que serão os futuros engenheiros), sabendo-se que o estudo contínuo é a única forma de aprender sobre ciência dos materiais, tema sempre em evolução. Não é possível memorizar informações técnicas dos milhares de produtos de construção hoje disponíveis. Temos que ter conceitos fundamentais que nos guiem na difícil tarefa de especificar, selecionar e formular materiais de construção.

34.2 MATERIAIS FRIOS E RESPONSIVOS

Com a urbanização, existe uma redução da cobertura vegetal (áreas verdes) (Akbari; Kolokotsa, 2016) e também uma mudança do albedo (Prado; Ferreira, 2005), que pode ser definido como o índice de refletância da

superfície terrestre quando exposta à radiação solar (Fig. 34.1). A diminuição da fração de luz solar refletida pela superfície potencializa o fenômeno de ilhas de calor nas grandes cidades (Akbari; Kolokotsa, 2016), pois grande parte (52 %) da radiação solar incidente está no comprimento de onda do infravermelho, responsável pela geração do calor sensível (ver Seção 34.3).

Materiais frios são aqueles capazes de aumentar a refletância da radiação solar (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011), particularmente no espectro do infravermelho (Fig. 34.2), evitando que radiação seja absorvida e, posteriormente, emitida pelo material. É possível fabricar tintas frias de diferentes cores, pois as cores perceptíveis pelo olho humano correspondem a uma faixa de comprimentos de onda (400 a 700 nm) distinta da faixa do infravermelho. Assim, independentemente da cor visível, pode-se aumentar significativamente a refletância solar do material no

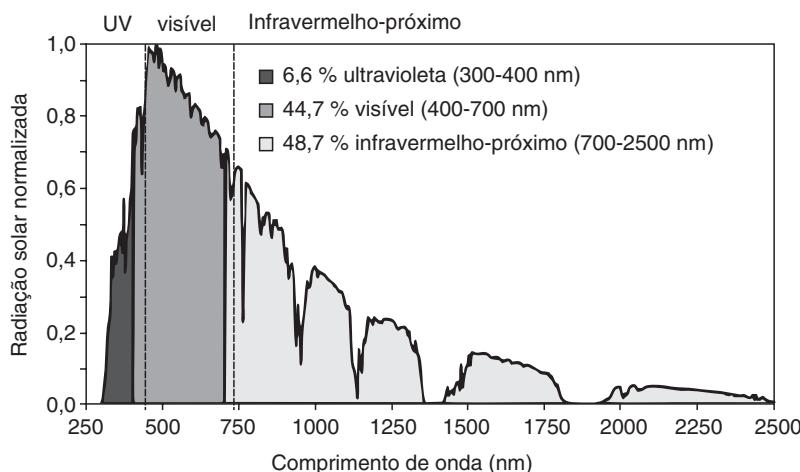


FIGURA 34.1 Espectro da radiação solar na Terra. Fonte: Souza et al. (2016); adaptada de Liou (2002).

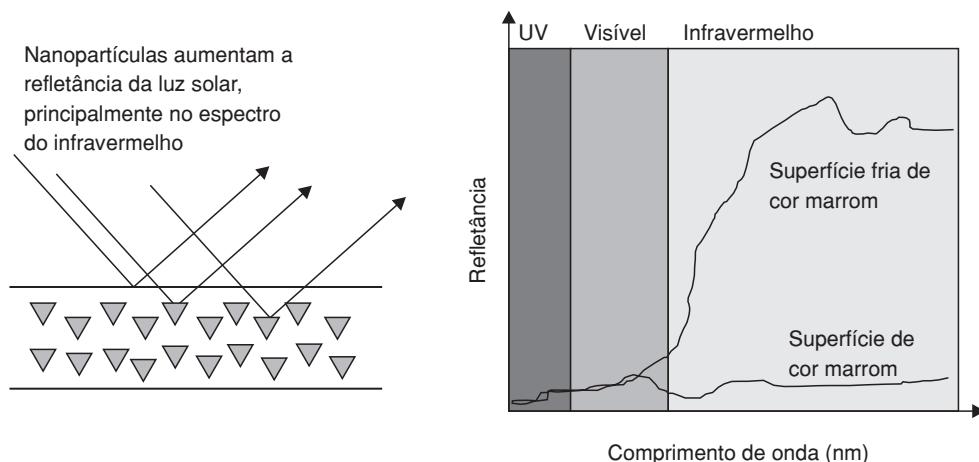


FIGURA 34.2 Comparação de tintas frias e convencionais, e explicações de como aumentar a refletância do material no espectro do infravermelho. Fonte: imagens extraídas e adaptadas para o português do site do Grupo de Ilhas de Calor do Laboratório Nacional Lawrence em Berkeley, Califórnia (disponível em: <https://heatisland.lbl.gov>; acesso em: 14 fev. 2025).

espectro do infravermelho. O resultado é obter, portanto, um material que aquece pouco por absorção de radiação infravermelha, mantendo sua temperatura superficial próxima àquela do ambiente.

A emitância, definida como a energia irradiada pela superfície de um corpo por segundo e por unidade de área, é também uma propriedade que interfere na transferência de calor entre o material do qual esse corpo é feito e o ambiente. Já a emissividade (ϵ) de um material diz respeito à sua efetividade em emitir energia na forma de radiação para o ambiente a partir de sua superfície. Ela é definida pela relação entre a radiação emitida por um corpo produzido com um material real e a radiação teórica que seria emitida por um corpo negro ideal com as mesmas dimensões do corpo real analisado; por ser uma relação entre parâmetros que têm as mesmas unidades, a emissividade em si não tem unidade, e seus valores estão entre 0 e 1. Assim, um valor de emissividade alto para um dado material indica que esse material emite (irradia) muito calor. Para todos os materiais reais, a emissividade sempre é definida em relação a um comprimento ou a uma faixa de comprimentos de onda especificados.

Materiais convencionais como telhados cerâmicos ou de concreto refletem pouco da radiação incidente na faixa do infravermelho, e possuem alta emissividade, facilitando a transferência de calor para o interior do edifício (Tab. 34.1). Telhados de alumínio, ou telhados com uma lâmina ou filme de alumínio embaixo de telhas cerâmicas são especialmente interessantes em locais de climas quentes, pois tanto aumentam a refletância na região do infravermelho (e evitam sua absorção e consequente aquecimento do material) quanto permitem baixa emissividade (ou seja, pouca liberação de calor para o interior do edifício (ver Seção 34.3). Essas condições propiciam menores oscilações nas temperaturas internas do edifício, gerando melhores condições de conforto para os usuários.

Tintas de cores claras e com superfícies lisas tendem a refletir mais a radiação solar, sendo as cores escuras como vermelho e preto pouco desejáveis no caso de tintas comuns. No caso das tintas frias, a refletância na faixa do infravermelho é aumentada independentemente da cor. A capacidade de produzir superfícies seletivas em relação à refletância à faixa do infravermelho muda significativamente o comportamento térmico esperado para essas tintas. No entanto, as superfícies acumulam sujeiras e tendem a “escurecer” com o tempo (Shirakawa *et al.*, 2020), sendo que as sujeiras acumuladas não refletem (e, sim, absorvem) radiação na faixa do infravermelho – assim, é fundamental que os revestimentos feitos com as tintas frias também possuam a propriedade de autolimpeza (ver Seção 34.5).

O uso de *coatings* (camadas de óxidos) transparentes (não perceptíveis ao olho nu) na indústria de vidros é cada vez mais comum – esses revestimentos transparentes são capazes de aumentar a refletância na faixa do infravermelho. Os vidros são conhecidos como *low-e*, baixa emissividade; ou seja, pouca transferência de calor, para o interior da edificação ou para o meio externo, dependendo do clima típico onde o edifício está localizado (Figs. 34.3 e 34.4).

A posição da camada de óxido deve ser diferente dependendo do clima (Rezaei; Shannigrahi; Ramakrishna, 2017). Em climas quentes, como o do Brasil, queremos evitar que a radiação seja absorvida, transmitida através dos materiais e irradiada para o interior; assim a camada (*coating*) do vidro voltada para o exterior da edificação precisa de alta refletância solar. Em climas frios, o maior interesse está em conservar energia no interior do edifício, evitando ter que manter os edifícios aquecidos durante o inverno e usar combustível fóssil para isso; assim, a camada de óxido no vidro precisa estar localizada na face voltada para o interior do edifício. O simples posicionamento da placa de vidro, com a orientação do *coating* pode mudar completamente o comportamento do vidro e sua adequação ao conforto térmico do edifício.

TABELA 34.1 Comparação dos materiais usados em coberturas, com base na refletância e na emitância

Tipo de superfície	Refletância	Emitância
Cerâmica vermelha	0,20	0,80-0,90
Concreto	0,05-0,35	0,80-0,90
Cerâmica ou concreto, pintado de branco	0,70	0,80-0,90
Alumínio	0,25-0,60	0,20-0,50
Asfalto (preto)	0,04-0,15	0,80-0,90
Tintas frias	0,70-0,90	

Fonte: Akbari e Kolokotsa (2016).

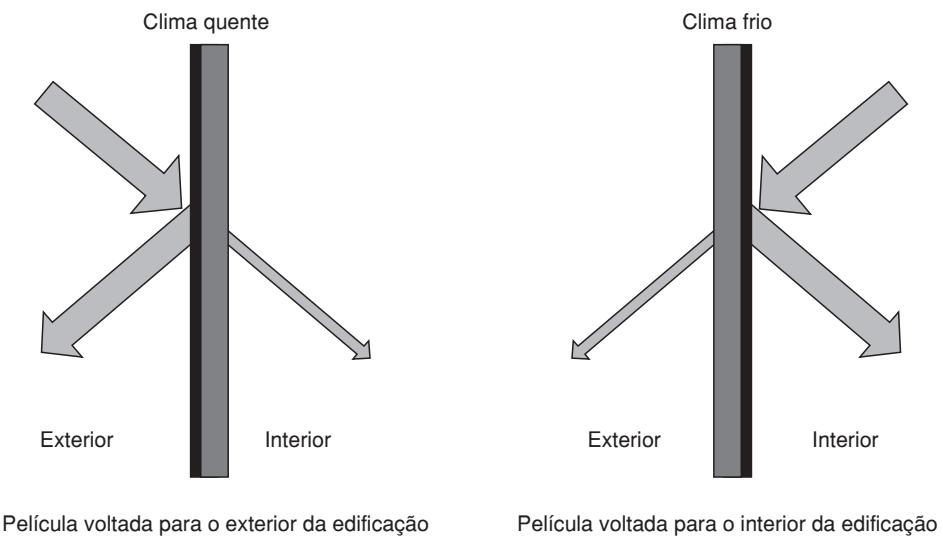


FIGURA 34.3 Desenho esquemático para uso da camada de *coating* no vidro *low-e*. Clima quente (esquerda). Clima frio (direita). Fonte: adaptada de Abundiz-Cisneros et al. (2020).

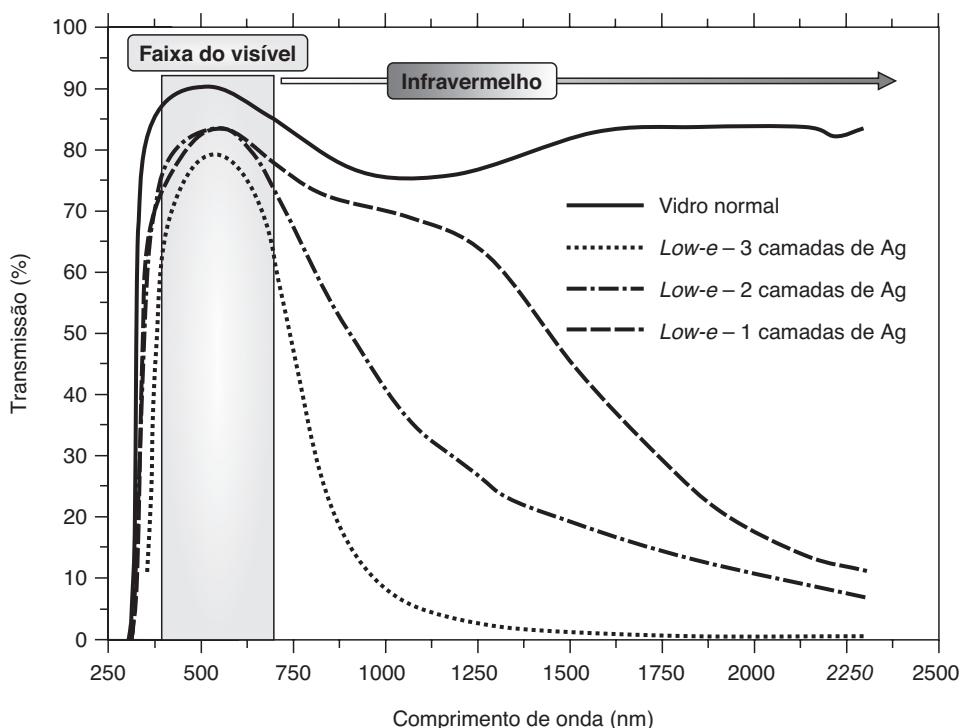


FIGURA 34.4 Exemplo do efeito de aplicação de camadas superficiais na transmitância de vidros: transmitância de diferentes tipos de *low-e glasses*. Para comparação, a transmitância de um vidro sem camada de recobrimento é indicada como “vidro normal”, e as outras três curvas correspondem a vidro com uma, duas e três camadas de cristais de prata. Fonte: adaptada de Abundiz-Cisneros et al. (2020).

Materiais responsivos são aqueles que respondem a certos estímulos, por exemplo, a mudança de temperatura (calor sensível, ver Seção 34.3). Uma tinta termocrômica é uma tinta que muda sua cor natural

para branca quando aquecida, para aumentar a refletância da luz solar (particularmente do infravermelho) (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011) (Fig. 34.5). A tinta é constituída de um ácido orgânico

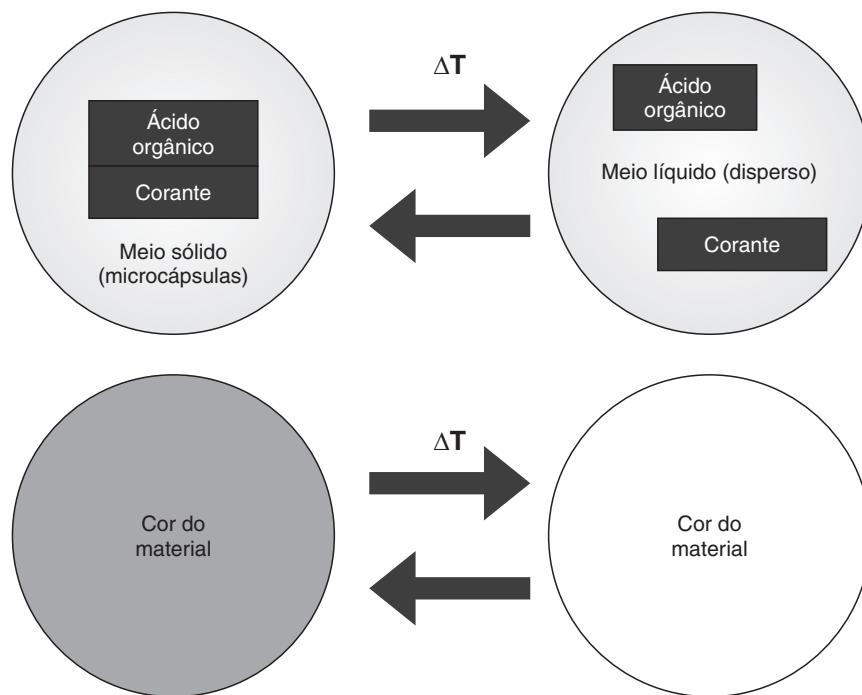


FIGURA 34.5 Tinta termocrômica e seu princípio de funcionamento.
Fonte: adaptada de Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011).

e de um corante. O conjunto, quando aquecido, permite a dispersão do corante por toda a superfície, o que leva à mudança de cor. Resultados experimentais indicam que esses materiais responsivos teriam mais eficiência do que as tintas frias (Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011), com camadas de óxidos metálicos superficiais, mas os seus mecanismos de atuação podem estar mais susceptíveis à perda de eficiência, como os materiais de mudança de fase (ver Seção 34.3).

Vidros eletrocrômicos ficam opacos ou mudam de cor, dependendo da corrente elétrica (Rezaei;

Shannigrahi; Ramakrishna, 2017) (Fig. 34.6), mudando o comportamento com relação à transmissão de luz ou calor. No vidro, um cristal líquido (material vítreo com simetria molecular) muda a sua organização (estrutura) interna por conta da passagem de corrente elétrica, pois essas fases cristalinas compõem materiais cerâmicos com propriedades elétricas e/ou magnéticas específicas. Esses vidros são empregados na construção em ambientes específicos como salas de reuniões em escritórios e em coberturas, e tem outras aplicações como janelas de aeronaves comerciais (como, por exemplo, no Boeing 777).

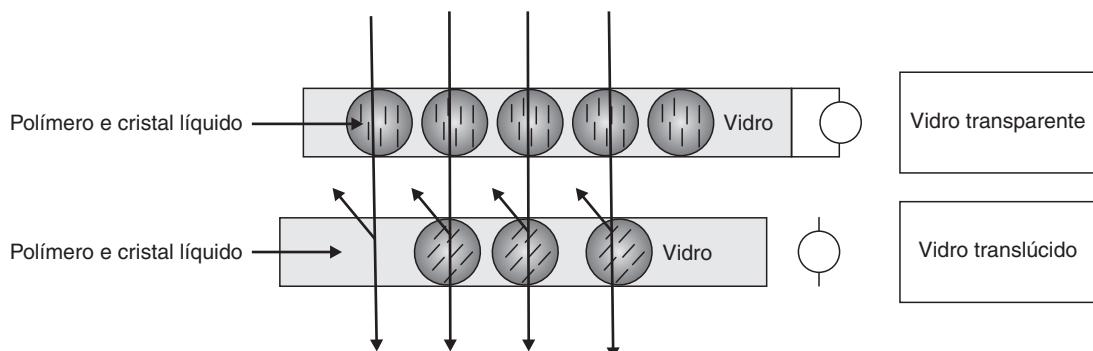


FIGURA 34.6 Vidros eletrocrômicos em escritórios e princípios de funcionamento a passagem da radiação (espectro visível e infravermelho). Fonte: adaptada de Rezaei, Shannigrahi e Ramakrishna (2017).

34.3 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Materiais de mudança de fase (PCM – *phase change materials*) usam o calor latente de fusão/solidificação para controlar a temperatura do ambiente (Fig. 34.7). A energia é absorvida ou cedida para que ocorra a mudança de estado físico, de sólido para líquido (energia absorvida) ou de líquido para sólido (energia cedida), sem que ocorra alteração da temperatura do material (medida pelo calor sensível), uma vez que mudanças de fase de compostos puros se dão, teoricamente, em temperatura constante. Assim, quando o ambiente se aquece, o material de mudança de fase absorve energia para passar de sólido para líquido, e quando o ambiente esfria, o material cede energia para o meio ao sofrer a mudança inversa, passando de líquido para sólido.

Nesse caso, é fundamental diferenciar o tipo de calor. O calor latente (J/g), usado para mudança de fase, é a quantidade de calor por unidade de massa do material para mudar de estado físico (e a mudança de estado físico de um material é uma mudança de fase, dado que uma fase é definida por sua composição e estado físico). A energia é usada nessa mudança de estado, que idealmente ocorre de forma isotérmica, não alterando, portanto, a temperatura da substância.

O calor sensível está relacionado à energia que efetivamente deve ser fornecida a um material para elevar a sua temperatura (ou aquela que deve ser cedida ao meio para abaixá-la). Para cada material, essa quantidade está relacionada com uma propriedade chamada calor específico, que é a energia necessária por unidade de massa para elevar a temperatura

do material em um grau – o calor específico é normalmente expresso em (J/kg.K) ou (cal/g.°C).

Para controlar a temperatura dos ambientes em edifícios, os materiais de mudança de fase (PCMs) possuem calor latente de fusão elevado, e precisam mudar de fase próximo à temperatura ambiente (Cabeza *et al.*, 2011; Zhou; Zhao; Tian, 2012) (Fig. 34.8). São eles: água, compostos orgânicos tais como as parafinas e sais inorgânicos capazes de hidratar. Os materiais potencialmente úteis para essa aplicação devem variar pouco o volume quando ocorre a mudança de fase, de modo a evitar potenciais danos em componentes e/ou estruturas. E, por fim, devem possuir estabilidade química.

Os materiais de mudança de fase normalmente usados aproveitam o calor latente de fusão, isso porque as energias envolvidas para resfriar ou aquecer ambientes são relativamente baixas. Mudanças de fase líquido/vapor não são empregadas, pois requerem muita energia e envolvem grandes variações de volume.

Os PCMs podem ser orgânicos, como parafinas, ou ainda à base de álcoois, ésteres ou glicóis, ou inorgânicos, obtidos por desidratação e reidratação (Kalnæs; Jelle, 2015). Os inorgânicos perdem mais eficiência porque dependem de fenômeno de cristalização; o processo de nucleação se altera gerando um efeito conhecido como *supercooling*, inclusive podem segregar, por diferença de densidade. Além disso, os PCMs inorgânicos possuem maior condutibilidade térmica, sendo menos eficientes.

A capacidade térmica específica é uma medida que determina a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura do material em 1 grau

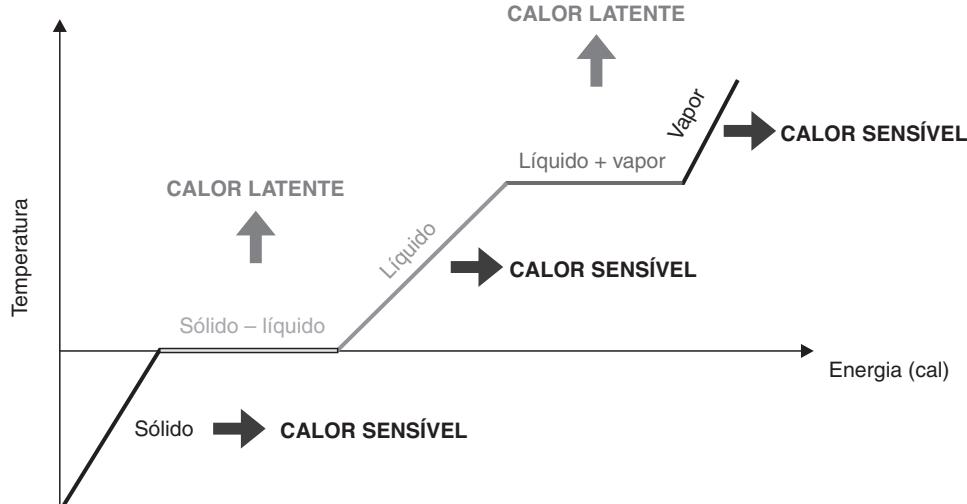


FIGURA 34.7 Diferença entre calor latente e sensível e a energia usada para mudança de estado da matéria. Fonte: adaptada de <https://realizeeducação.com.br/blog/calor-sensível-e-calor-latente/>. Acesso em: 28 out. 2024.

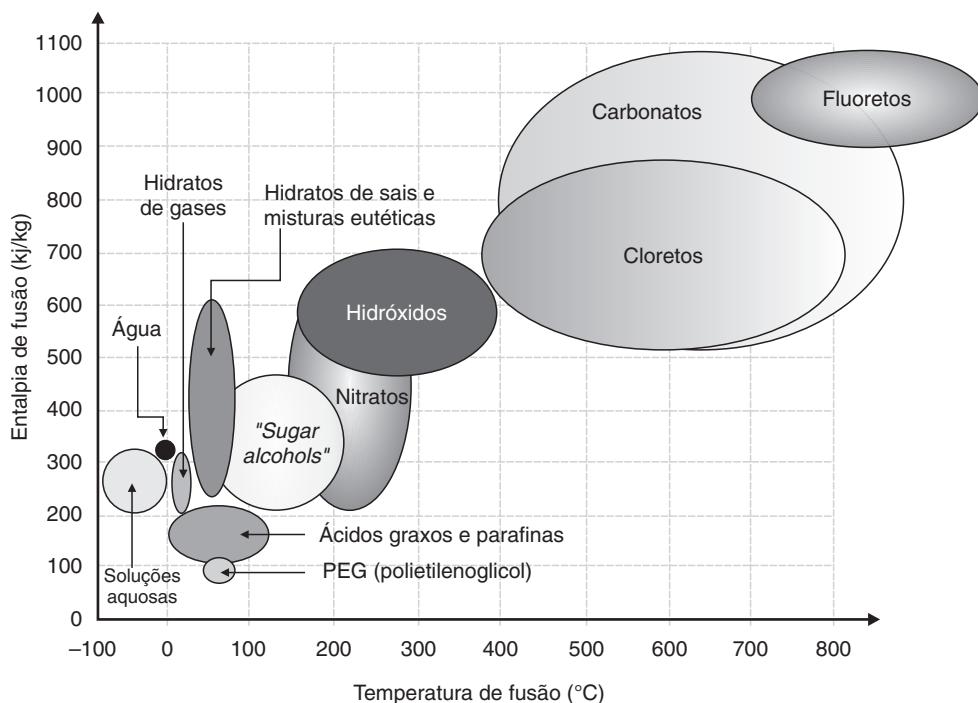


FIGURA 34.8 Faixas de temperatura e entalpia de fusão para materiais de mudança de fase conhecidos. Fonte: adaptada de Cabeza et al. (2011) e Imran Khan, Asfand e Al-Ghamdi (2023).

Celsius, por unidade de massa de material (kJ/kg) (Fig. 34.9) (Ling; Poon, 2013). Os materiais de mudança de fase aumentam muito a capacidade térmica. O material armazena mais energia evitando que a temperatura do ambiente (calor sensível) se eleve. Quando esfria, o material de solidifica e libera calor ao ambiente. Ou seja, esse tipo de material reduz as amplitudes térmicas dentro do ambiente interno (Fig. 34.9), evitando uso de aquecimento no inverno, ou uso de ar-condicionado no verão. Esses materiais

são, portanto, mais eficientes quando ao longo do ano podem ser observadas grandes amplitudes térmicas entre inverno e verão.

34.4 ISOLANTES DE ALTA EFICIÊNCIA

Em países de climas frios, a cobertura e o envelope (fachada externa) do edifício são responsáveis por manter quase 60 % da energia absorvida por um edifício

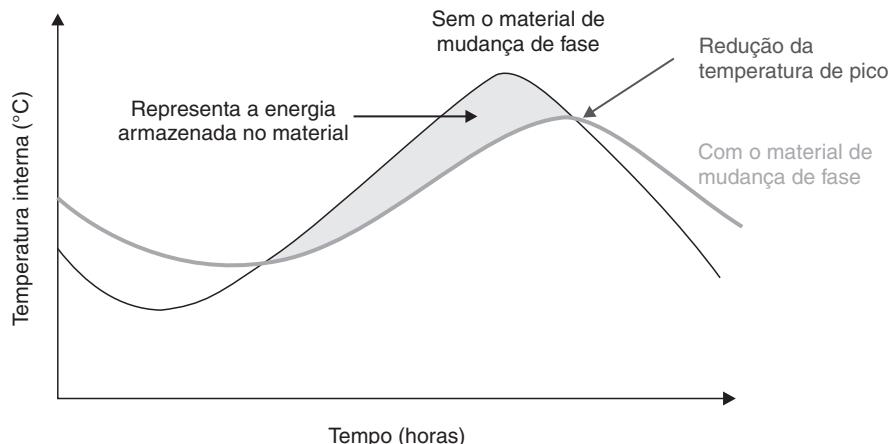


FIGURA 34.9 Capacidade térmica específica (kJ/kg): quantidade de energia para elevar 1 grau Celsius, por quilo de material. Fonte: adaptada de Akeiber et al. (2016).

(Rashidi; Esfahani; Karimi, 2018); ou seja, o sistema é o responsável pela conservação do calor e da temperatura dentro do edifício. O fluxo de calor depende de diversos fatores, como a condução do calor no corpo sólido e a emissividade dos materiais, incluindo a convecção que ocorre no meio gasoso (Baetens *et al.*, 2010).

Com relação à condutibilidade térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), os materiais metálicos são os que mais conduzem calor (Callister; Rethwisch, 2014) (52-388 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), conforme se vê na Figura 34.10, seguidos, em geral, pelos materiais cerâmicos (2 a 190 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e pelos materiais poliméricos ($< 0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Os isolantes convencionais usados na construção são lã de vidro, poliestireno expandido, espuma de poliuretano (Schiavoni *et al.*, 2016) (0,35 a 0,02 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Além desses, temos fibras de juta e lã como isolantes alternativos (Baetens *et al.*, 2010).

Na construção, há também isolantes avançados em janelas duplas de vidro. O espaço entre as placas duplas que compõem as janelas é preenchido com gases nobres (argônio, criptônio), que reduzem drasticamente a propriedade de condução do calor no meio (Fig. 34.11), incluindo o vácuo, ou novos materiais como aerogel, que podem alcançar valores de 0,02 a 0,002 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Trocar o ar como meio gasoso dentro do sólido faz grande diferença, porque a condutibilidade térmica de gases como criptônio, argônio e xenônio é sistematicamente inferior, em função do tamanho e da pressão no poro (Jelle; Gustavsen; Baetens, 2010).

Um painel de isolamento a vácuo (VIP) contém um núcleo a vácuo mantido por múltiplas camadas (Fig. 34.12): duas, selante e barreira, e uma mais externa, de proteção, pois, durante a instalação,

qualquer dano na peça pode comprometer seu desempenho (Schiavoni *et al.*, 2016). A forma mais efetiva de reduzir a condutividade térmica do meio gasoso existente no interior do painel é usar pressão de vácuo (Lang *et al.*, 2016), existindo também relação com o tamanho do poro (Fig. 34.13).

A estratégia de reduzir o tamanho de poro é também muito eficiente e usada para confeccionar um material conhecido como aerogel, que pode ser utilizado sem a necessidade da aplicação de pressão de vácuo, produzindo um material à base de nanossílica com poros inferiores a 2 nm (Baetens *et al.*, 2010). Nessa condição, as moléculas presentes no gás no interior dos poros não são capazes de transferir o calor por convecção. O aerogel já é um produto comercializado e usado na construção; material extremamente leve (com densidade em torno de 3 kg/m^3 ; 98 % de sua microestrutura é composta de poros nanométricos), usado como material isolante e de fechamento (fachada externa).

A fim de dimensionar diferentes painéis para isolar a mesma quantidade de calor (W/m^2), por conta das diferenças na condutibilidade térmica dos sólido poroso e dos gases utilizados, são necessárias diferentes espessuras finais de isolantes (Baetens *et al.*, 2010), conforme mostrado na Tabela 34.2. Os mais eficientes requerem menores espessuras, condição muito útil para realizar *retrofit* em apartamentos antigos. É uma realidade vivida em grandes cidades históricas, como Paris e outras capitais europeias, que vêm constantemente aumentando as exigências de conservação energética e as metas de redução de uso de combustíveis fósseis usados no aquecimento das edificações.

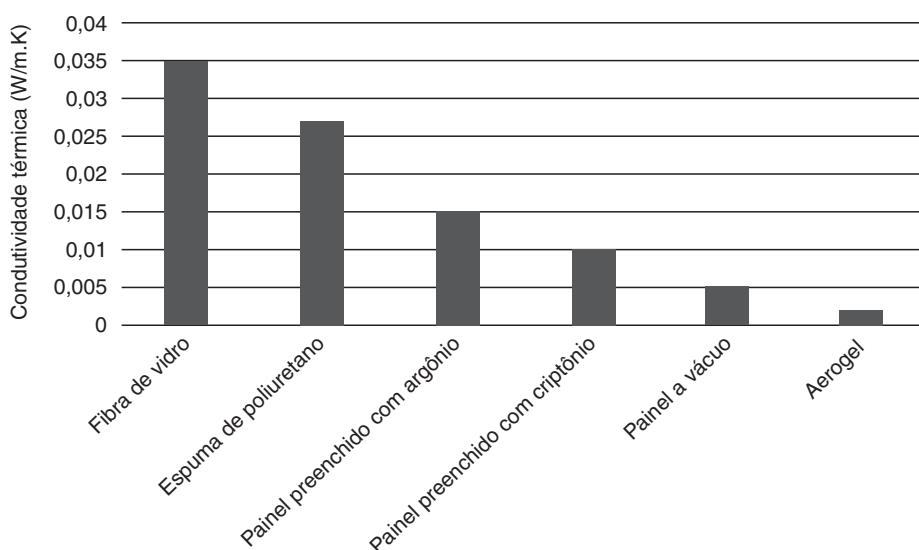


FIGURA 34.10 Comparação da condutibilidade térmica dos materiais isolantes para a construção. Fonte: adaptada de Baetens *et al.* (2010).

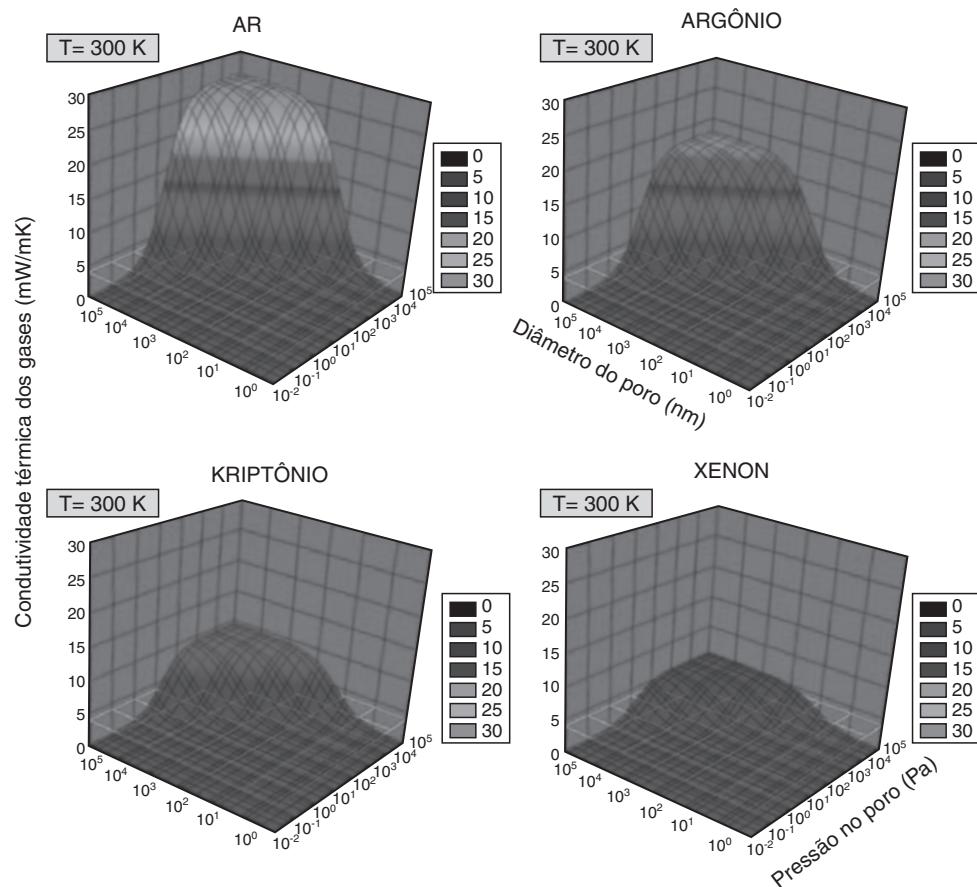


FIGURA 34.11 Condutibilidade térmica dos gases em função do meio poro e pressão de poro. Fonte: adaptada de Jelle, Gustavsen e Baetens (2010).

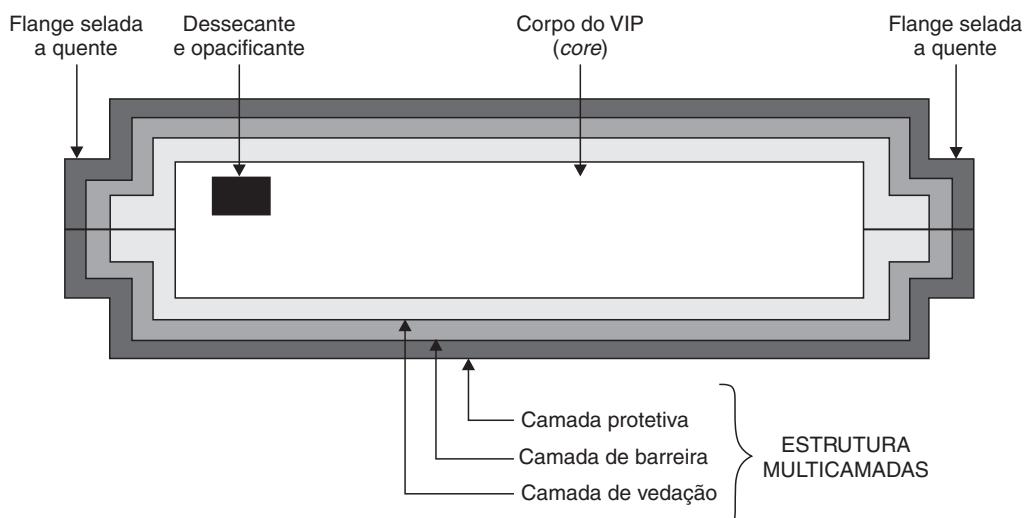


FIGURA 34.12 Painel de isolamento a vácuo – *vacuum insulation panel (VIP)*.
Fonte: Schiavoni et al. (2016).

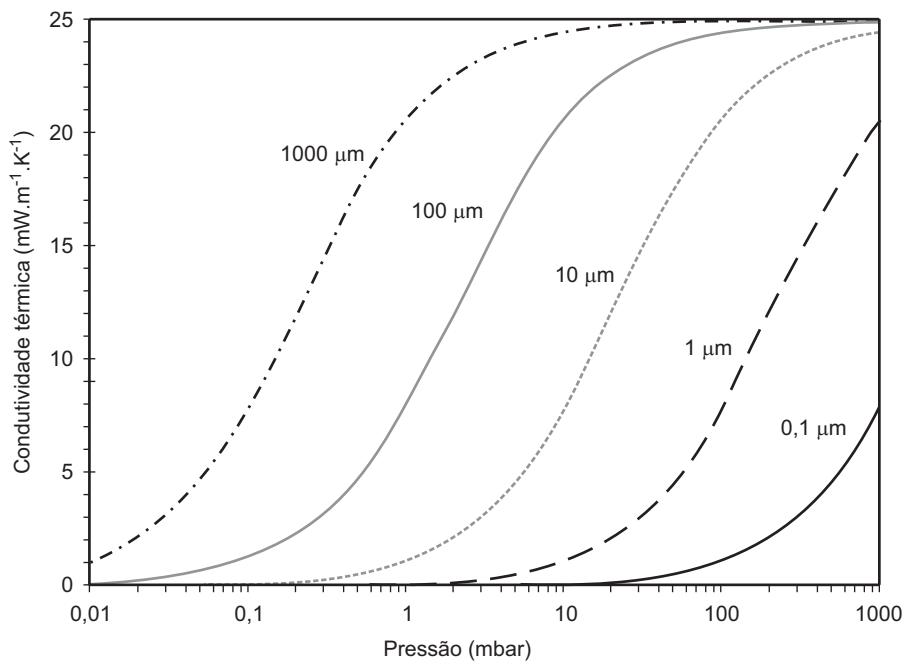


FIGURA 34.13 Conduto de termica do ar em funcao da pressao de vacuo e tamanho de poro. Fonte: Lang et al. (2016).

TABELA 34.2 Comparação entre as diferentes espessuras de painéis isolantes necessárias para isolar a mesma quantidade de calor

Tipo do painel	Espessura
Lã de vidro	220 mm
Poliestireno expandido	180 mm
Espuma de poliuretano	130 mm
Manta de aerogel	75 mm
Painel a vácuo (VIP)	25 mm

Fonte: dados extraídos de Baetens et al. (2010) e adaptados na forma de tabela.

O VIP, quando aquecido, aumenta a pressão de vapor de água, e junto com a pressão aumenta-se a umidade (Baetens et al., 2010). Depois de anos de uso, os VIPs tendem a absorver água. Quando mais água absorverem, maior será a condutibilidade térmica, perdendo sua eficiência inicial. Por isso, em alguns VIPs, podem ser encontradas sílica gel,

ou geometrias de colmeia (poros fechados) (Fig. 34.14), que melhoram a eficiência do isolante.

34.5 MATERIAIS AUTOLIMPANTES

Para a produção de materiais autolimpantes, certas propriedades relativas à molhabilidade superficial são alteradas (Fig. 34.15), por meio da funcionalização da superfície. A superfície pode se tornar hidrofóbica (Midtdal; Jelle, 2013), ou seja, não molhar com água facilmente e com isso dificultar a adesão de sujidades advindas do meio ambiente (material particulado, poluentes etc.).

Para se definir se uma superfície é hidrofílica, ou seja, molhável pela água, ou hidrofóbica, não interagindo ou interagindo pouco (molhando) com a água, é preciso conhecer o ângulo de contato (θ) do líquido (o mais comum, a água) com a superfície do sólido, conforme a Figura 34.15 (Yuan; Lee, 2013). O ângulo de contato θ está relacionado com o equilíbrio entre três tensões interfaciais: líquido-sólido,

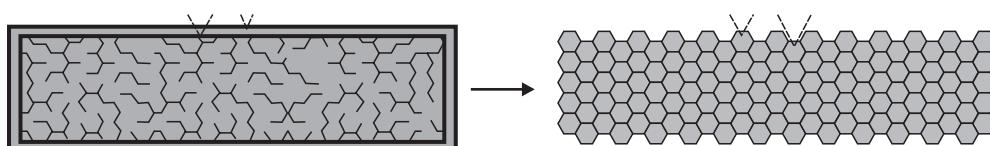


FIGURA 34.14 Painel a vácuo sem VIP e com geometria de poros fechados (VIM). Os fechados são isolantes mais eficientes. Fonte: adaptada de Baetens et al. (2010).

sólido-ar e líquido-ar: quando o ângulo de contato é superior a 90° , o líquido não molha a superfície do sólido, e quando o ângulo é inferior a 90° , a superfície é molhada pelo líquido (quanto menor o ângulo, mais facilmente a superfície é molhada pelo líquido). Uma discussão a respeito de características das interfaces (e das tensões nelas existentes) está fora do escopo deste texto, mas, para os interessados, uma introdução acessível ao tema pode ser encontrada em https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_tension (acesso em: 29 ago. 2024).

Materiais inorgânicos com grupos hidroxila superficiais (como é o caso de grande parte dos materiais de construção, como os cimentos hidratados, os vidros e mesmo os metais e as madeiras) apresentam superfície com natureza hidrofílica. Para proteger

esses materiais da ação da água e eventualmente torná-los autolimpantes, a superfície precisa ser funcionalizada para se tornar hidrofóbica. Uma forma bastante empregada para esse tipo de funcionalização é a silanização (*silanization*). A silanização é a ligação de um grupo organossilano a algumas espécies químicas superficiais. Em grande parte dos materiais de construção – é o caso de argamassas, cimentos e vidros –, a silanização se refere à conversão de uma superfície terminada em um grupo silanol ($\text{Si}-\text{OH}$) em uma superfície terminada em um grupo organossilano, conforme indicado na Figura 34.16. Essa conversão confere hidrofobicidade a uma superfície que anteriormente era hidrofílica (Pape, 2017; Ciriminna *et al.*, 2020).

A super-hidrofobicidade pode ser produzida não apenas pela funcionalização da superfície, mas

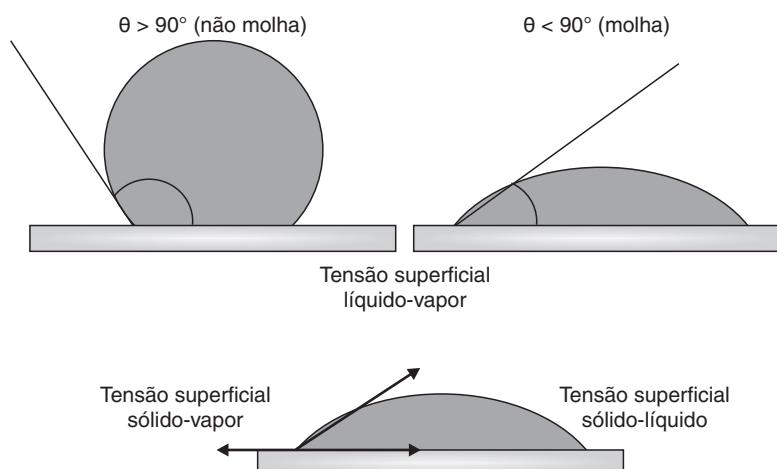


FIGURA 34.15 O ângulo de contato (θ) se determina por meio de uma gota do líquido sobre a superfície de um sólido. É resultado do equilíbrio de três tensões interfaciais. Ângulo acima de 90° trata-se de um material hidrofóbico; a superfície do material não é molhada pelo líquido. Ângulo inferior a 90° trata-se de um material hidrofílico, ou seja, a superfície é molhada pelo líquido.

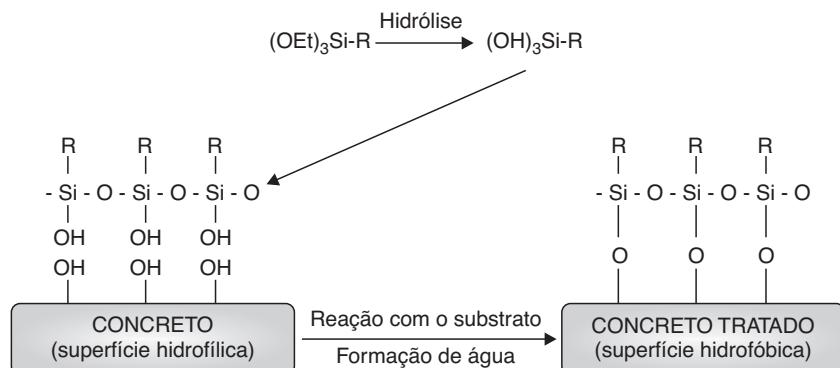


FIGURA 34.16 Representação esquemática da funcionalização da superfície de um concreto por meio da reação de umtrialquoxissilano com a superfície (que adquire caráter hidrofóbico). Fonte: adaptada de Ciriminna *et al.* (2020).

também pela alteração da sua rugosidade (Midtdal; Jelle, 2013), conforme se vê na Figura 34.17. Rugosidade pode ser feita no vidro, sem ser visível a olho nu mas suficiente para capturar ar (O_2 , N_2 , apolares) na textura superficial, evitando que ela seja molhada. Esse conceito foi inspirado na micro(nano)estrutura das folhas de lótus (Baumann *et al.*, 2003). Uma gota de água que não molhe a superfície tem maior poder de arraste de sujeira. Materiais que são desenvolvidos desta forma são considerados materiais bioinspirados, também chamados de materiais biomiméticos (Nosonovsky; Rohatgi, 2012).

Materiais fotocatalíticos como o dióxido de titânio (TiO_2), quando expostos a radiação UV com comprimentos de onda de 300 a 400 nm, geram pares [elétron – buraco eletrônico]. Esses pares reagem com a água e o oxigênio presentes no ambiente. Os buracos eletrônicos (h^+) reagem com hidroxilas dissociadas da água, produzindo radicais hidroxila (OH^\bullet). Os elétrons (e^-) reagem com oxigênio do ar formando ânions superóxido (O_2^-), que reagem a seguir com cátions H^+ da água dissociada produzindo radicais HO_2^\bullet (Chen; Poon, 2009). Os radicais produzidos são capazes de oxidar poluentes como NO_x e outros compostos orgânicos voláteis (VOCs), e igualmente de degradar matéria orgânica, conforme esquematizado na Figura 34.18. A superfície das partículas de TiO_2 se torna altamente hidrofílica, podendo, inclusive, a camada de água que a molha contribuir com propriedades de mudança de fase – ou seja, ela absorve calor para evaporar a água adsorvida na superfície, esfriando-a e aumentando a inércia térmica, reduzindo as temperaturas de picos dentro dos ambientes internos dos edifícios.

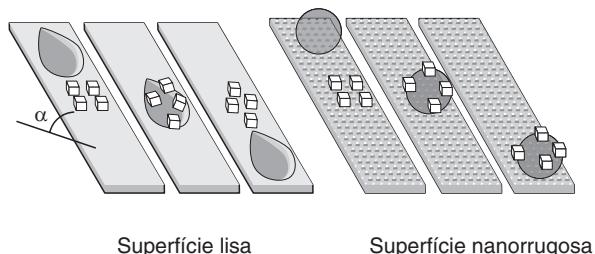


FIGURA 34.17 Descrição do fenômeno de autolimpeza em superfícies super-hidrofóbicas, produzidas por nanorrugosidade da superfície, mecanismo similar inspirado pela observação biomimética da flor de lótus. Fonte: adaptada de Midtdal e Jelle (2013).

A eficiência de limpeza de uma superfície pode ser medida, de forma comparativa, através de diversos métodos sugeridos na literatura (Martinez *et al.*, 2014). Nestes, são simulados testes de *run-off* (lavagem) da superfície com água, controlando-se ciclos de lavagem, e exposição ao UV, e assim o crescimento de biofilme é comparado nas duas superfícies: com e sem tratamento com material autolimpante.

34.6 MATERIAIS COM GRAADAÇÃO FUNCIONAL E A OTIMIZAÇÃO TOPOLOGÍCA

O bambu, que tem espessura das paredes que reforçam o material em função da altura e de forma otimizada

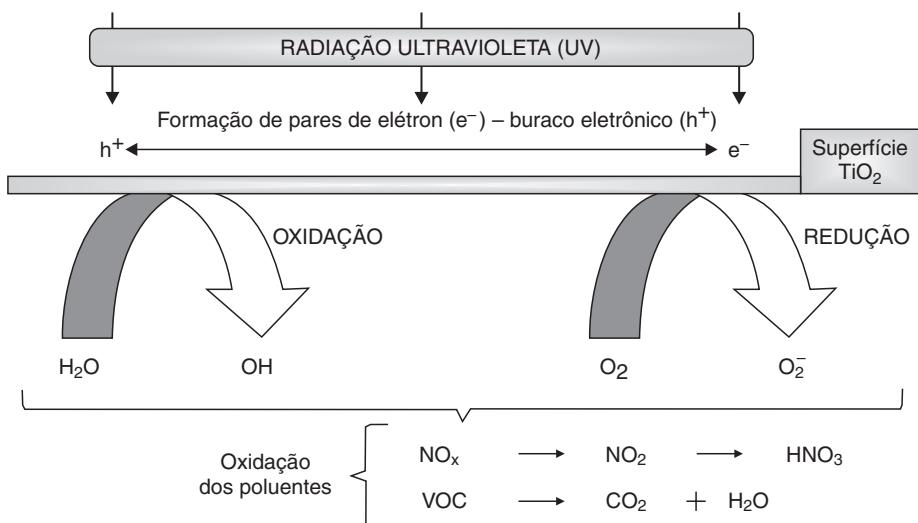


FIGURA 34.18 Representação esquemática das reações que ocorrem na superfície de um material fotocatalítico (como o TiO_2). Fonte: adaptada de Chen e Poon (2009).

para resistir melhor aos esforços, é um exemplo de material com graduação funcional (Tan *et al.*, 2011), como na Figura 34.19.

Conceitos relacionados aos materiais de graduação funcional já foram e são constantemente desenvolvidos gerando novos materiais de construção. No caso de telhas de fibrocimento reforçadas (Dias; Savastano Jr.; John, 2010), tese defendida na Universidade de São Paulo (USP) há quase 10 anos (Dias, 2011), foi otimizada a quantidade de fibras, em função da posição na telha, assim como a resistência e a porosidade do material na camada de topo da telha. Essa solução trouxe redução do custo do produto e permitiu a substituição do amianto, fibra mineral barata e eficiente que era então usada, mas que pode causar câncer pulmonar.

Existem outras formas de produzir materiais de graduação funcional com materiais cimentícios, além

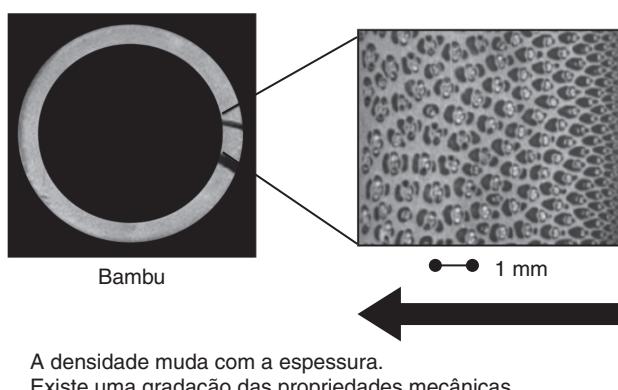


FIGURA 34.19 Microestrutura e propriedades no bambu. Fonte: adaptada de Tan *et al.* (2011).

de prensagem e alimentação variável de materiais como no caso mencionado. Podemos extrudar camadas de materiais cimentícios com diferentes teores de fibras, ou porosidade, ou quantidade e densidade de agregado reciclado, fabricando materiais que gerem respostas mecânicas otimizadas ou capazes de resistir a esforços que variam ao longo das seções, como de uma peça fletida (Fig. 34.20).

Outro exemplo de material natural que pode inspirar estruturas biomiméticas é o nácar – madreperola, material constitutivo de conchas de várias espécies de moluscos (Wegst *et al.*, 2015) –, que combina placas de aragonita (CaCO_3), material resistente mas de comportamento frágil, com uma cola orgânica, capaz de dissipar energia associada ao impacto por meio de deformações viscoelásticas, resultando em um material de alta resistência ao impacto (Fig. 34.21). Muitos desses materiais bioinspirados, a exemplo dos comentados, possuem uma otimização da topologia (Fig. 34.22), como também possui o próprio osso humano, superando as propriedades das classes de materiais convencionalmente estabelecidas, como metálicos ou cerâmicos, e também as leis básicas das misturas e seus efeitos nas propriedades (Fig. 34.22).

A otimização da topologia e o campo de otimização estrutural com relação às tensões de solicitação ao longo da peça projetada devem ganhar espaço no desenvolvimento dos novos materiais, revelar novos mecanismos de tenacificação e capacidade de interferir no mecanismo de fratura e ampliar a energia de fratura, incluindo a própria habilidade do material de se autorreparar (*self healing*), análoga à cicatrização.

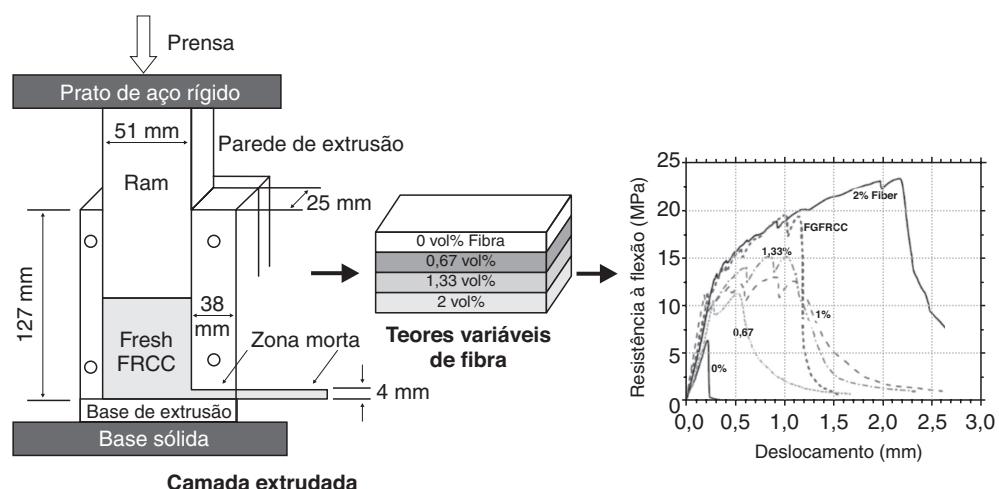


FIGURA 34.20 Exemplo de fabricação de um material de graduação funcional. A graduação do teor de fibras garante deslocamento e resistência à flexão residual (pós-fissuração) suficiente, economizando pela metade o consumo de fibras. Fonte: Shen *et al.* (2008).

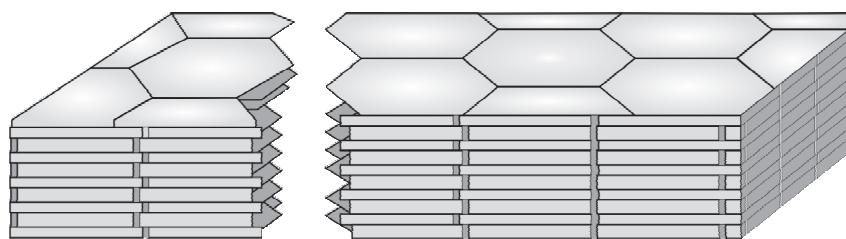
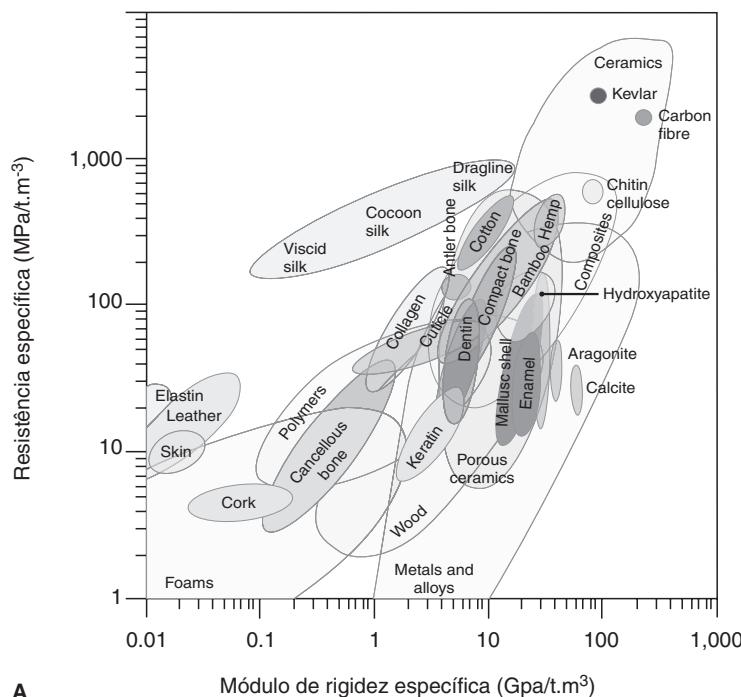
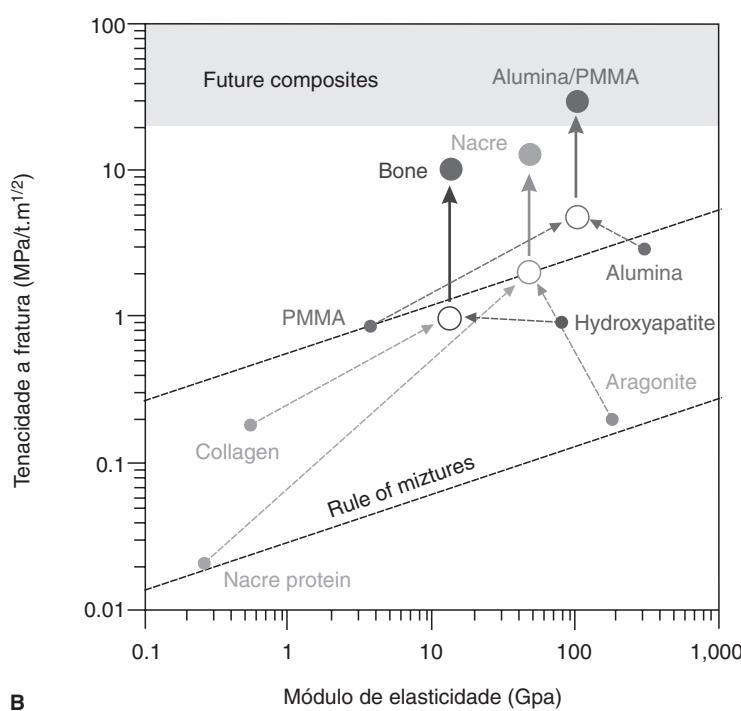


FIGURA 34.21 Estrutura do nácar. Placas de aragonita (CaCO_3), que é um material resistente, mas tem comportamento frágil, com uma cola orgânica, capaz de dissipar energia associada ao impacto, a partir de deformações viscoelásticas. Fonte: adaptada de Wegst et al. (2015).



A



B

FIGURA 34.22 Propriedades mecânicas dos materiais convencionais e de certos materiais bioinspirados. Fonte: Wegst et al. (2015).

Em relação a essa capacidade de autorreparação, no campo dos materiais cimentícios, a precipitação de carbonato de cálcio nos poros, por processo autogerido, promovido pela ação de microrganismos ou atuando no próprio meio existente nos poros, é um exemplo para recuperar fissuras e danos nos materiais cimentícios.

É claro que esses processos requerem uma mudança fundamental no processo de manufatura dos materiais, onde não seria lógico continuar a produzir somente os materiais ditos isotrópicos, ou seja, com mesma resistência e mesmo módulo ao longo de todo o volume sólido definido. Tal não seria mais necessário, uma vez que um material com graduação funcional de propriedades, cujas propriedades variassem de acordo com as exigências de uso, deveria ser mais sustentável. Novamente, um conceito bioinspirado: a natureza não exagera, usa os recursos e produz suas estruturas na medida do necessário. Vejamos: o estado de tensão de um corpo sólido (por exemplo, uma viga) não é constante ao longo do seu comprimento ou seção transversal. Tipicamente, usamos modelos estruturais simplificados para representar sólidos tridimensionais, encontrando soluções uni ou bidimensionais. Uma viga estrutural pode ser executada em diferentes camadas (Shen *et al.*, 2008), e gradar a resistência do material em função de sua solicitação (Udupa; Rao; Gangadharan, 2014). Tipicamente, em peças fletidas, as tensões máximas estão próximas das extremidades, a partir da linha neutra. Assim, estruturas ou peças submetidas a esses tipos de esforço podem conter diferentes teores de fibras para ajustar seu comportamento à fratura, economizando um insumo caro, como fibras, usando-o onde é necessário e não desperdiçando onde não é necessário. O desenvolvimento desse campo depende não somente do avanço no desenvolvimento de materiais, mas também das ferramentas de simulação computacional e do avanço nas metodologias de elementos finitos, de contorno e diversos outros progressos da mecânica computacional.

34.7 CONCLUSÕES

Não pretendemos neste capítulo estabelecer uma lista completa de materiais inovadores. Apresentamos aqui alguns, como materiais isolantes de alta eficiência – painéis de vácuo, aerogel, materiais frios –, por meio de revestimentos (*coatings*) metálicos, capazes de refletir os espectros de comprimento de onda relacionados ao infravermelho, ser transparentes, ou responsivos, como o material termocrômico, mudando de cor, ou eletrocrômicos, tornando-se translúcidos.

Uso de materiais de mudança de fase, fazendo uso do calor latente, para consumir ou liberar energia, sem gerar aumento de temperatura. No campo dos materiais autolimpantes, entender conceitos como tensão superficial, ângulo de contato com os sólidos e molhabilidade permite definir a natureza hidrofílica ou hidrofóbica de uma superfície. Explicar como a físico-química e a morfologia de superfícies podem gerar o fenômeno de autolimpeza, compreender a natureza super-hidrofóbica de certos materiais bioinspirados. No campo dos materiais responsivos, apresentar as bases do comportamento de fotocatalise, seu potencial para degradar matéria orgânica e auxiliar dessa forma na limpeza das superfícies, e para oxidar compostos gasosos nocivos e compostos orgânicos voláteis, contribuindo para mitigação da poluição atmosférica. O biomimetismo (*biomimicry*), procedimento de observar a natureza e buscar imitá-la, é importante ferramenta para buscar a otimização topológica dos produtos – muitos materiais conceitualmente bioinspirados mostram novos paradigmas para o desempenho mecânico, explorando geometrias complexas, materiais com graduação de propriedades, ou seja, não homogêneos, não isotrópicos. É claro que, para que tudo isso se torne viável, não basta apenas o desenvolvimento de novos materiais, mas é necessário um avanço contínuo dos *softwares* de simulação, que são fundamentais não somente para avanços na área da mecânica computacional (que permite avanços no desenvolvimento de projeto de estruturas inovadoras), mas também na área de simulação molecular, que permite buscar avanços na própria síntese de novos materiais. Materiais multifuncionais são aqueles que combinam diversas dessas múltiplas funções – sistemas mecânicos, físicos, químicos, em múltiplas escalas – mostrando que a solução dos problemas não precisa ser “fator por fator”; ou seja, tratada individualmente, mas tratada em conjunto, para gerar múltiplos benefícios e inovações cada vez mais relevantes.

Pelo estudo dessas novas categorias de materiais, um conjunto de conceitos/objetos de estudo que tradicionalmente não eram objeto de atenção dos estudantes e engenheiros civis pode e deve ser sucessivamente assimilado, para que inovações significativas possam ser alcançadas. Um exemplo de lista de temas e conceitos, não exaustiva e baseada nos materiais discutidos neste texto, poderia ser:

- fluxo de calor de um sistema construtivo;
- condutividade térmica em sólidos, líquidos e em sistemas porosos;

- isolantes de alta eficiência, como aerogéis e painéis VIP (*vacuum insulation panels*);
- pressão de vapor de água;
- ilhas de calor: radiação solar e as respectivas faixas do seu espectro; conceitos de albedo, refletância, emitância;
- *coatings* metálicos; materiais frios; materiais responsivos; cerâmicas condutoras e cristais líquidos; materiais termocrônicos e eletrocrônicos;
- materiais de mudança de fase: calores latentes de fusão e de evaporação; calor específico; história térmica; resfriamento evaporativo;
- materiais autolimpantes: química das superfícies; hidrofobicidade, hidrofilicidade e molhabilidade; ângulo de contato; fotocatálise; nanorrugosidade superficial; eficiência de limpeza, biofilme, *run-off*;
- materiais com graduação funcional e bioinspirados: otimização topológica; graduação funcional; tenacificação, resistência à fratura; manufatura aditiva; biomimética: flor de lótus, nácar, bambu, osso humano...;
- ...isso, sem esquecer alguns temas de Física, como: entalpia; constante de Boltzmann; estrutura eletrônica dos átomos (com suas bandas de valência e de condução...); tensão superficial;
- ...e um pouquinho de Química, para conseguir entender o básico sobre compostos inorgânicos e orgânicos, como TiO_2 e silanos.

BIBLIOGRAFIA

- ABUNDIZ-CISNEROS, N.; SANGINÉS, R.; RODRÍGUEZ-LÓPEZ, R.; PERALTA-ARRIOLA, M.; CRUZ, J.; MACHORRO, R. Novel low-e filter for architectural glass pane. *Energy and Buildings*, n. 206, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109558>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- AGOPYAN V.; JOHN, V. M. *O desafio da sustentabilidade na construção civil*. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.
- AKBARI, H.; KOLOKOTSA, D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings*, n. 133, p. 834–842, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.067>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- AKEIBER, H.; NEJAT, P.; ABD MAJID, M. Z.; WAHID, M. A.; JOMEHZADEH, F.; ZEYNALI FAMILEH, I.; CALAUTIT, J. K.; HUGHES, B. R.; ZAKI, S. A. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 60, p. 1470-1497, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>. Acesso em: 24 jan. 2024.

- ALLWOOD, J. M.; ASHBY, M. F.; GUTOWSKI, T. G.; WORRELL, E. Material efficiency: a white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, n. 55, p. 362–381, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.002>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- ANGULO, S. C.; ULSEN, C. Resíduos de construção e demolição: fundamentos sobre gestão e reciclagem. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786589190202>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- BAETENS, R.; JELLE, B. P.; THUE, J. V.; TENPIERIK, M. J.; GRYNNING, S.; UVSLØKK, S.; GUSTAVSEN, A. Vacuum insulation panels for building applications: a review and beyond. *Energy and Buildings*, n. 42, p. 147–172, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.005>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- BAUMANN, M.; SAKOSKE, G.; POTH, L.; TÜNKER, G. Learning from the lotus flower-selfcleaning coatings on glass. *Glass Processing Days*, n. 15, p. 330-333, 2003.
- BELIZARIO-SILVA, F.; GALIMSHINA, A.; REIS, D. C.; QUATTRONE, M.; GOMES, B.; MARIN, M. C.; MOUSTAPHA, M.; JOHN, V.; HABERT, G. Stakeholder influence on global warming potential of reinforced concrete structure. *Journal of Building Engineering*, n. 44, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobr.2021.102979>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- BRUSSELS ENVIRONMENT. *European Union's Horizon 2020: buildings as material banks*, 2019. Disponível em: <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/03/20190228-BAMB-D14.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- CABEZA, L. F.; CASTELL, A.; BARRENECHE, C.; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, A. I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 15, p. 1675-1695, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. 9. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.
- CIRIMINNA, R.; ALBO, Y.; FIDALGO, A.; ILHARCO, L.; PAGLIARO, M. Silanes for building protection: a case study in systems thinking approach to materials science. *Education Sciences*, n. 10, p. 171, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/educsci10070171>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- CHEN, J.; POON, C. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Building and Environment*, n. 44, p. 1899-1906, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bulenv.2009.01.002>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- DIAS, C. M. R.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V. M. Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement. *Construction and Building Materials*, n. 24, p. 140-146, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.017>. Acesso em: 24 jan. 2024.

- DIAS, C. M. R. Fibrocimentos com gradação funcional. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2011.tde-31052011-164232>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- DUNANT, C. F.; SHAH, T.; DREWNIOK, M.P.; CRA-GLIA, M.; CULLEN, J. M. A new method to estimate the lifetime of long-life product categories. *Journal of Industrial Ecology*, n. 25, p. 321-332, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jiec.13093>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the circular economy*, 2012.
- GOULOUTI, K.; FAVRE, D.; GIORGI, M.; PADEY, P.; GALIMSHINA, A.; HABERT, G.; LASVAUX, S. Dataset of service life data for 100 building elements and technical systems including their descriptive statistics and fitting to lognormal distribution. *Data in Brief*, n. 36, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107062>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- HABERT, G.; ARRIBE, D.; DEHOVE, T.; ESPINASSE, L.; LE ROY, R. Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges, *Journal of Cleaner Production*, n. 35, p. 250–262, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.028>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- HEEREN, N.; MUTEL, C. L.; STEUBING, B.; OSTER-MEYER, Y.; WALLBAUM, H.; HELLWEG, S. Environmental impact of buildings: what matters? *Environ. Sci. Technol.*, n. 49, p. 9832–9841, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01735>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- IMRAN KHAN, M.; ASFAND, F.; AL-GHAMDI, S. G. Progress in research and development of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar power. *Applied Thermal Engineering*, n. 219, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119546>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A.; BAETENS, R. The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. *Journal of Building Physics*, n. 34, p. 99–123, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1744259110372782>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- KALNÆS, S. E.; JELLE, B. P. Phase change materials and products for building applications: a state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, n. 94, p. 150–176, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- KRAUSMANN, F.; WIEDENHOFER, D.; LAUK, C.; HAAS, W.; TANIKAWA, H.; FISHMAN, T.; MIATTO, A.; SCHANDL, H.; HABERL, H. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n. 114, p. 1880–1885, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1613773114>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- KRAUSMANN, F.; GINGRICH, S.; EISENMENGER, N.; ERB, K.-H.; HABERL, H.; FISCHER-KOWALSKI, M. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century, *Ecological Economics*, n. 68, p. 2696–2705, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- LANG, S.; GERSCHITZKA, M.; BAUER, D.; DRÜCK, H. Thermal conductivity of vacuum insulation materials for thermal energy stores in solar thermal systems. *Energy Procedia*, n. 91, p. 172–181, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.196>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- LIOU, K. N. *An introduction to atmospheric radiation*. 2. ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2002.
- LING, T.-C.; POON, C.-S. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: an overview. *Construction and Building Materials*, n. 46, p. 55–62, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- MACK-VERGARA, Y. L.; JOHN, V. M. Life cycle water inventory in concrete production: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, n. 122, p. 227–250, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.004>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- MARTINEZ, T.; BERTRON, A.; ESCADEILLAS, G.; RINGOT, E. Algal growth inhibition on cement mortar: efficiency of water repellent and photocatalytic treatments under UV/VIS illumination. *International Biodeterioration & Biodegradation*, n. 89, p. 115–125, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.018>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- MIDTDAL, K.; JELLE, B. P. Self-cleaning glazing products: a state-of-the-art review and future research pathways. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, n. 109, p. 126–141, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.09.034>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- NOSONOVSKY, M.; ROHATGI, P. K. *Biomimetics in materials science: self-healing, self-lubricating, and self-cleaning materials*. New York: Springer New York, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0926-7>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- PAPE, P. G. Silylating agents. In: KIRK-OTHMER (ed.). *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*. Wiley, 2017. p. 1–15. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0471238961.1909122516011605.a01.pub3>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, n. 37, p. 295–300, 2005. Disponível em: <https://sindusconsp.com.br/biblioteca/>. Acesso em: 24 jan. 2024.

- RASHIDI, S.; ESFAHANI, J. A.; KARIMI N., Porous materials in building energy technology: a review of the applications, modelling and experiments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 91, p. 229–247, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.092> Acesso em: 24 jan. 2024.
- REZAEI, S. D.; SHANNIGRAHI, S.; RAMAKRISHNA, S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, n. 159, p. 26–51, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026> Acesso em: 24 jan. 2024.
- SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, n. 85, p. 3085–3102, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023> Acesso em: 24 jan. 2024.
- SCHIAVONI, S.; D'ALESSANDRO, F.; BIANCHI, F.; ASDRUBALI, F. Insulation materials for the building sector: a review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 62, p. 988–1011, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045> Acesso em: 24 jan. 2024.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, n. 114, p. 2–26, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015> Acesso em: 24 jan. 2024.
- SHEN, B.; HUBLER, M.; PAULINO, G. H.; STRUBLE, L. J. Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: processing, microstructure, and properties. *Cement and Concrete Composites*, n. 30, p. 663–673, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.002> Acesso em: 24 jan. 2024.
- SHIRAKAWA, M. A.; LIMA, L. N. de; GAYLARDE, C. C.; SILVA JUNIOR, J. A.; LOZ, P. H. F.; JOHN, V. M. Effects of natural aging on the properties of a cool surface exposed in different Brazilian environments. *Energy and Buildings*, n. 221, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110031> Acesso em: 24 jan. 2024.
- SOUZA, R. B. de; REBOITA, M. S.; WERLE, A. P.; CARVALHO COSTA, E. B. Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil.
- REEC. 13, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v13i1.41448>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- STROMBERG, L. L.; BEGHINI, A.; BAKER, W. F.; PAULINO, G. H. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. *Struct Multidisc Optim.*, n. 43, p. 165–180, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0563-1> Acesso em: 24 jan. 2024.
- TAN, T.; RAHBAR, N.; ALLAMEH, S. M.; KWOFIE, S.; DISSMORE, D.; GHAVAMI, K.; SOBOYEJO, W. O. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia*, n. 7, p. 3796–3803, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008> Acesso em: 24 jan. 2024.
- TORGAL, F. P.; JALALI, S.; FUCIC, A. (ed.). *Toxicity of building materials*. Oxford: Woodhead, 2012.
- UDUPA, G.; RAO, S. S.; GANGADHARAN, K. V. Functionally graded composite materials: an overview. *Procedia Materials Science*, n. 5, p. 1291–1299, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.442> Acesso em: 24 jan. 2024.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. 2022 *Global status report for buildings and construction: towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*, 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. Kenya: UNEP, 2011.
- WEGST, U. G. K.; BAI, H.; SAIZ, E.; TOMSIA, A. P.; RITCHIE, R. O. Bioinspired structural materials. *Nature Materials*, n. 14, p. 23–36, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nmat4089> Acesso em: 24 jan. 2024.
- YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact angle and wetting properties. In: BRACCO, G.; HOLST, B. (Ed.). *Surface science techniques*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013. p. 3–34. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1_1 Acesso em: 24 jan. 2024.
- ZHOU, D.; ZHAO, C. Y.; TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, n. 92, p. 593–605, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025> Acesso em: 24 jan. 2024.