



O Incrível Mundo dos Materiais Porosos – Características, Propriedades e Aplicações

Amanda V. Santos, Marcelo M. Viana, Fernando H. A. Medeiros e Nelcy D. S. Mohallem

Os materiais porosos são abordados neste trabalho inicialmente de forma questionadora e reflexiva, correlacionando suas propriedades físico-químicas e aplicações à presença de poros. Alguns experimentos simples envolvendo materiais porosos são apresentados ao longo do texto, assim como alguns exemplos, dando maior ênfase para o carvão ativado, os catalisadores automotivos e os biomateriais. Diversas aplicações de cada um deles são também apresentadas, o que evidencia a grande aplicabilidade dos materiais porosos e justifica o crescente interesse da sociedade por eles.

► materiais porosos, porosidade, poros ◀

4

Recebido em 25/08/2014, aceito em 10/01/2015

Os materiais e a sociedade

Os materiais têm acompanhado a evolução do homem desde a pré-história na busca incessante por melhorias em sua qualidade de vida. Entre os primeiros materiais utilizados por nós estão a madeira e a pedra, além de ossos, peles, penas e outros de origem animal, que atenderam às necessidades do homem pré-histórico. Os materiais estão ligados à nossa história, ao nosso desenvolvimento e às nossas tradições. A importância deles é tão grande que dividimos nossa história em quatro grandes períodos, associados ao desenvolvimento e à utilização destes. São eles: Idade da Pedra, Idade da Pedra-Cobre, Idade do Bronze e Idade do Ferro (Callister Jr., 2012). Atualmente, após milhares de anos de desenvolvimento, temos como principais tipos de materiais: os cerâmicos, os poliméricos, os metálicos, os semicondutores e os compósitos. Esses últimos, por sua vez, são um tipo de material formado pela combinação de dois outros, que apresentam propriedades físicas e químicas nitidamente distintas. Separadamente, os constituintes do compósito mantêm suas características, porém quando estão combinados, formam um material com propriedades funcionais impossíveis de serem

conseguidas em um componente individual. Todos esses materiais podem ser porosos ou não e eles todos fazem parte do nosso cotidiano, tornando nossa vida melhor e mais prática.

Agora, gostaríamos que você interrompesse por um instante sua leitura e desse uma olhada nos objetos que estão ao seu redor. Olhe e perceba os inúmeros materiais com diferentes níveis de tecnologia que o cercam, materiais desenvolvidos ao longo de séculos de estudos e aprimoramento. E então? Não viu nada assim? Preste mais atenção! Não precisa procurar apenas por aparelhos eletrônicos ou afins. Repare em objetos aparentemente simples. Olhe as paredes, o chão, os móveis. O que você vê? Concreto, madeira, papel, vidro, cerâmica, aço, plástico? Esses materiais supostamente simples são, na verdade, frutos de muito trabalho e pesquisa. Neles, há mais tecnologia e conhecimento químico do que você imagina!

Preste atenção agora nas paredes da sua casa. Na maior parte das vezes, elas são construídas utilizando-se tijolos, que são um exemplo de material poroso. É notável a presença de poros na superfície dos tijolos, mas será que eles estão presentes apenas na superfície desse material? Essa pergunta pode ser facilmente respondida se você quebrar um pedaço de tijolo e avaliar sua textura interna, o que comprovará a existência de poros internos com tamanhos e formatos variados.

Assim como o tijolo, existem inúmeros outros materiais com poros, externos e internos, que influenciam nas

A seção "Química e sociedade" apresenta artigos que focalizam diferentes inter-relações entre Ciência e sociedade, procurando analisar o potencial e as limitações da Ciência na tentativa de compreender e solucionar problemas sociais.

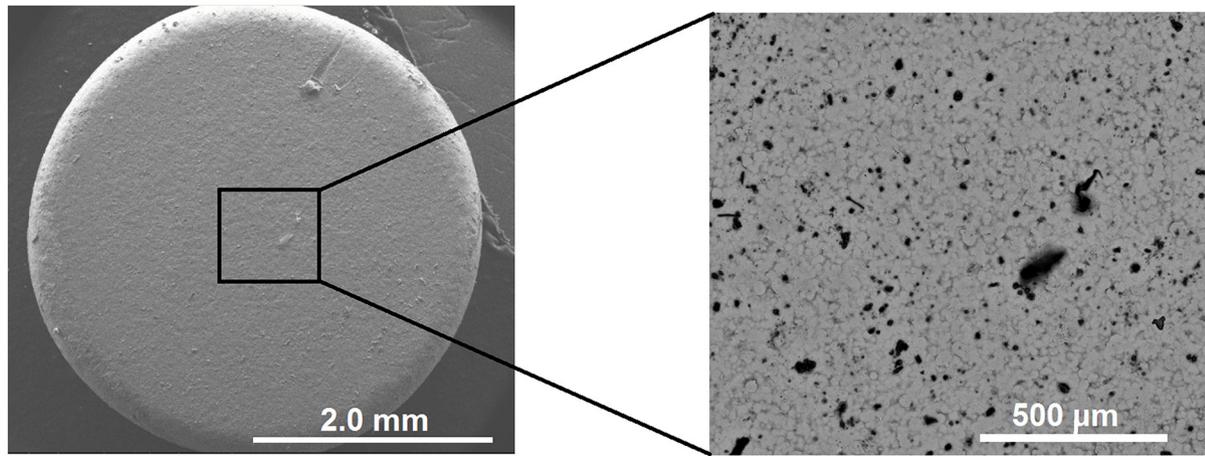


Figura 1: Imagens de MEV obtidas no Centro de Microscopia da UFMG mostrando a superfície de um sólido monolítico à base de neodímio-ferro-boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) em duas magnificações diferentes: esquerda – imagem de baixa magnificação (aumento de 30 vezes) – e direita – imagem de alta magnificação (aumento de 100 vezes).

características e propriedades destes. Com nosso tato e nossa visão, é possível ter uma percepção macroscópica da textura desses materiais. No entanto, será que essa percepção é suficiente para uma completa caracterização deles? Será que podemos prever suas propriedades utilizando apenas métodos convencionais? Uma avaliação minuciosa do tijolo, por exemplo, pode revelar grandes surpresas! Muitas vezes, existem poros tão pequenos nos materiais que eles só podem ser visualizados claramente com o auxílio de microscópios de alta resolução como os eletrônicos e os de ponta de prova (Mannheimer, 2002). Para exemplificar, a Figura 1 apresenta a imagem da superfície de um sólido monolítico – um magneto a base de neodímio-ferro-boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) recoberto com níquel – observada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Na Figura 1 – imagem de baixa amplificação –, não se observam poros na superfície, mas na imagem de maior ampliação à direita, observa-se que a superfície na verdade apresenta poros de formatos e tamanhos irregulares.

Os materiais podem apresentar poros abertos ou fechados, externos ou internos e ter diversas formas como mostrado na Figura 2. Além disso, a União Internacional de Química Pura e Aplicada (em inglês, International Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC) propõe uma classificação em microporos, mesoporos e macroporos, de acordo com sua faixa de tamanho, conforme representado na Tabela 1.

A presença de poros e suas características, como tamanho, formato e posição, concedem propriedades diferenciadas aos materiais porosos, possibilitando inúmeras aplicações nas mais diversas áreas. Por exemplo, esses materiais são usados como catalisadores na indústria e como conversores em carros; estão presentes não só nos tijolos, mas também no concreto da sua casa; são encontrados no isopor, nos potes de barro, nos filtros de água, em pedras-pomes e no carvão; estão também nos hospitais, seja como o tradicional gesso ou como biomateriais de alta tecnologia; e podem ser utilizados ainda como materiais funcionais para proteção ambiental (Ferreira; Alves, 2007). Alguns exemplos de materiais porosos presentes no nosso cotidiano são mostrados na Figura 3.

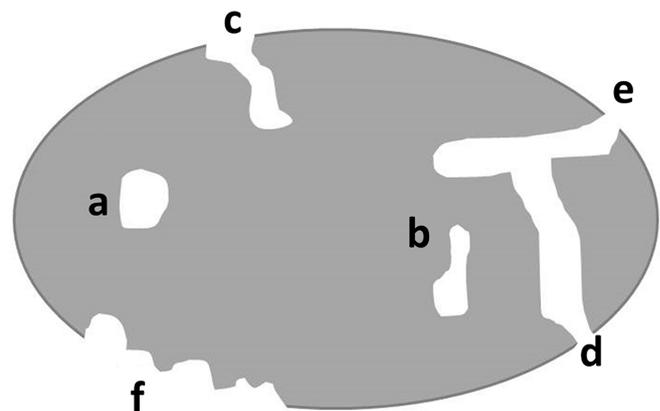


Figura 2: Esquema representativo de poros com diferentes tamanhos e formas: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície.

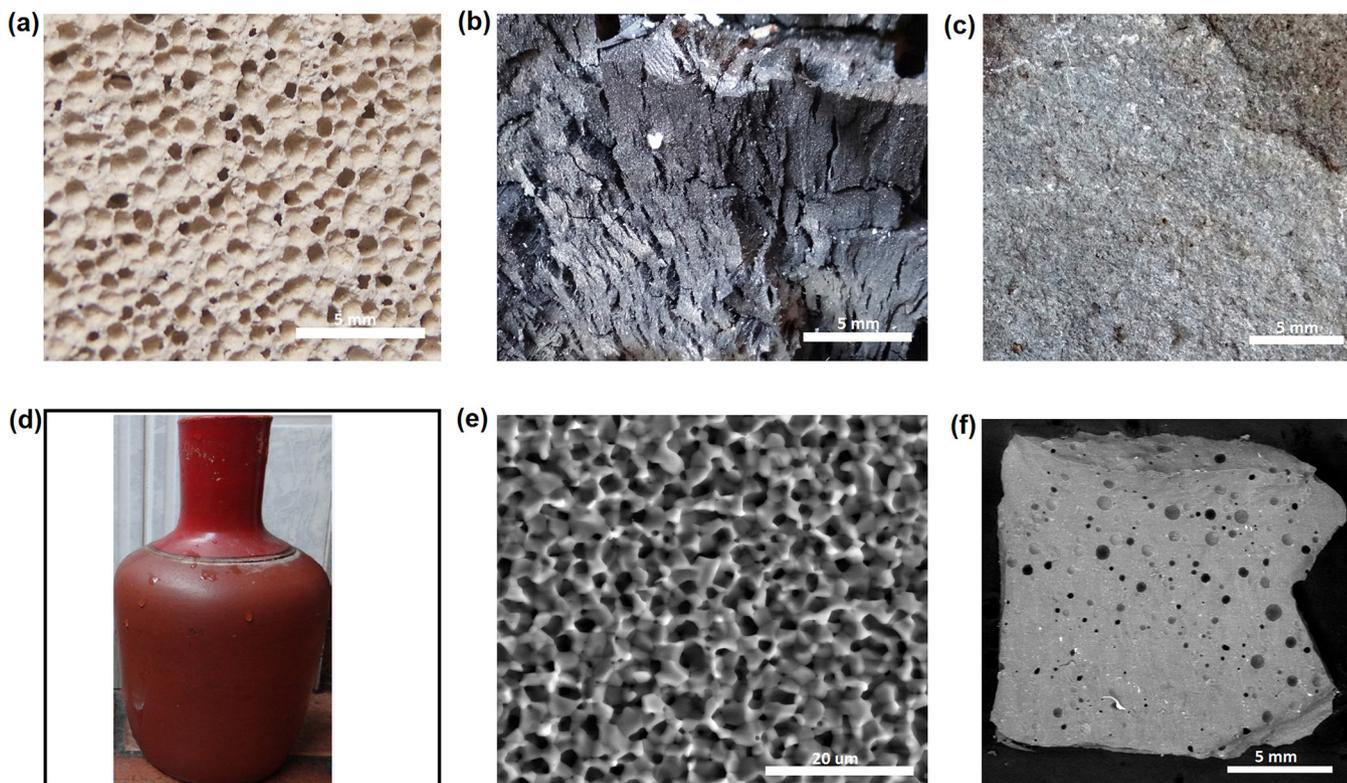
Tabela 1: Classificação dos poros de acordo com seu tamanho, segundo a IUPAC.

Classificação	Tamanho do poro
Microporos	Diâmetro < 2 nm
Mesoporos	2 nm < Diâmetro < 50 nm
Macroporos	Diâmetro > 50 nm

Percebeu como os materiais porosos estão ligados às nossas vidas e ao nosso dia a dia? O que acha de descobrir como a ciência se aplica a esse fantástico e ainda não totalmente desvendado mundo dos materiais porosos? Que tal conhecer a tecnologia por detrás deles, explorar os métodos utilizados para caracterizá-los e descobriremos juntos algumas de suas aplicações? É esse o convite que nós te fazemos: venha explorar conosco o incrível mundo dos materiais porosos e aprender um pouco sobre sua ciência!

A porosidade - uma importante propriedade

A presença de poros em um material é uma característica



6

Figura 3. Fotografias de: (a) superfície de um monólito de pedra pomes; (b) superfície de um monólito de carvão vegetal; (c) superfície de um piso com cimento grosso; (d) uma jarra de barro; (e) superfície de uma pastilha de cerâmica; (f) superfície interna de uma panela de cerâmica.

que, em princípio, pode parecer irrelevante ou até mesmo dispensável. No entanto, isso não é verdade. Os poros podem trazer tanto vantagens quanto desvantagens ao material onde eles existem. Por exemplo, dependendo se esse material é metálico, cerâmico, polimérico ou um composto, a presença não controlada de poros pode gerar tensões estruturais que levam à formação de trincas no corpo em análise. Por outro lado, a presença de poros em certos materiais pode ser bastante positiva e possibilitar diversas aplicações como veremos no decorrer do texto.

Um típico exemplo de material poroso é o pote de barro (ilustrado na Figura 3d), muito utilizado por nós para armazenar água potável. É perceptível que a temperatura da água contida nesse pote é menor quando comparada à temperatura da água que é armazenada em outros tipos de recipientes. Isso ocorre devido à presença de minúsculos poros na parede do pote de barro que permitem que moléculas de água atravessem a cerâmica e evaporem. Como a evaporação é um processo endotérmico, a água que evapora pela superfície externa do pote retira calor da vizinhança, fazendo com que a temperatura da água no interior deste abaixe. Você pode verificar esse fato experimentalmente de maneira muito simples: coloque um litro de água em um recipiente de vidro e meça sua temperatura com o auxílio de um termômetro; em seguida, coloque a mesma quantidade de água em um pote de barro; espere pelo menos uma hora; e meça novamente a sua temperatura. Você perceberá que a temperatura da água no pote de barro

é menor que a temperatura da água no recipiente de vidro, apesar de não ter sido colocada na geladeira. É importante ressaltar que as temperaturas encontradas e a diferença entre elas dependerão da temperatura ambiente, da umidade relativa do ar no dia em que o experimento for realizado e da quantidade de água utilizada. A água no pote de barro pode ficar entre 3°C e 6°C abaixo da temperatura da água no recipiente de vidro.

Uma importante propriedade dos sólidos e materiais porosos é a densidade, propriedade física da matéria que reflete o estado de agregação desta. A densidade de um sólido é definida como sendo a razão entre sua massa e seu volume. Em materiais porosos, a região ocupada por poros é preenchida com ar, que possui um estado de agregação muito diferente do estado de agregação do sólido não poroso e, por isso, o volume de poros em um material tem grande influência sobre a densidade deste (Gregg; Sing, 1997).

Talvez você não saiba, mas existem diversos tipos de densidades: a teórica, a aparente e a real são alguns exemplos. A chamada densidade teórica é definida a partir do arranjo cristalino dos sólidos e é facilmente encontrada tabelada na literatura. No cálculo desse tipo de densidade, considera-se que não existem poros no material em análise e seus valores são geralmente muito próximos dos valores de densidade real. Para o melhor entendimento das densidades aparente e real, consideremos dois blocos com a mesma dimensão e constituídos pelo mesmo material como representado na Figura 4.

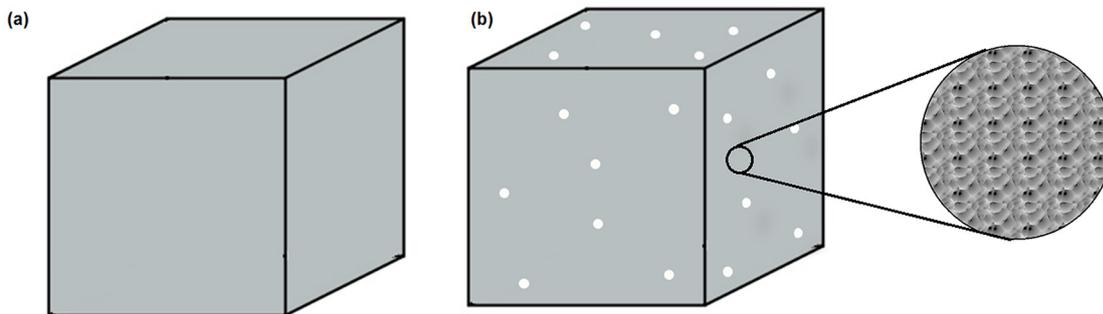


Figura 4: Comparação entre densidade real e aparente em materiais: a) não poroso; b) poroso.

O bloco da Figura 4a não apresenta poros, logo sua densidade é facilmente calculada pesando-se o bloco e determinando seu volume geometricamente. Nesse caso, o volume será o de um cubo. Você se lembra da expressão para o cálculo do volume de um cubo de aresta a ? Tente recordar. Como não existem poros no interior desse sólido, o volume determinado é de fato o volume ocupado pelo próprio material e, portanto, a densidade calculada é sua densidade real - definida como sendo a razão entre a massa do sólido e seu volume real. Já o bloco da Figura 4b apresenta poros facilmente visualizados a olho nu e também poros menores como mostrado na ampliação. Sendo assim, o volume ocupado de fato pelo material é menor que o volume geométrico do sólido, já que neste existem espaços vazios. Logo, se calcularmos sua densidade da mesma maneira que fizemos para o bloco da Figura 4a, encontraremos a chamada densidade aparente. Você consegue perceber o porquê desse nome? Quando calculamos a densidade assim, nós não levamos em consideração a presença de poros no material. Dessa forma, atribuímos ao material um volume maior do que seu volume real, o que leva a uma medida de densidade menor do que deveria ser e, portanto, é chamada de aparente. Para determinarmos a densidade real desse bloco, é importante analisarmos a presença de poros internos que não apresentem conexão com a sua superfície: os chamados poros fechados. Dessa maneira, levamos em consideração somente o espaço ocupado de fato pelo material em questão, determinando seu volume real (Diniz, 2004).

Para verificar na prática como a densidade de um material é alterada pela presença de poros, você pode utilizar um pedaço de isopor (poliestireno $(C_8H_8)_n$) mergulhado em um recipiente contendo acetona. Inicialmente, quando colocamos o isopor na acetona, ele boia, uma vez que seus inúmeros poros internos estão cheios de ar. Entretanto, à medida que o tempo passa, a acetona interage com o poliestireno, modificando as interações intercadeias desse polímero. Isso leva à abertura dos poros e o ar que ali estava contido é perdido, fazendo com que a densidade do sistema aumente e o isopor passe, então, a afundar na acetona. Esse experimento mostra que o poliestireno é, na verdade, mais denso que a acetona, porém o isopor se torna menos denso devido à presença de seus poros internos.

Contudo, será que a porosidade e a densidade estão relacionadas às propriedades funcionais de um material? A resposta é sim. Os poros e a densidade influenciam

importantes propriedades como propriedades mecânicas, ópticas e elétricas, entre outras. Tais propriedades dependem também dos formatos, dos tamanhos e de onde se encontram os poros: se interna ou externamente.

Técnicas de medida de densidade e de porosidade

Agora que você já sabe como a porosidade é importante e pode influenciar nas propriedades de um material, você deve estar se perguntando como podemos medi-la, não é mesmo? Para determinarmos a porosidade de um material, precisamos primeiro calcular suas densidades real e aparente. Então, como podemos calculá-las?

Para a determinação da densidade de sólidos, o primeiro passo é a determinação da massa deste, o que pode ser feito utilizando uma balança analítica com a precisão desejada. Determinada a massa, o próximo passo é determinar o volume do sólido. Além da estimativa do seu volume pelas medidas das suas dimensões geométricas e pela medida do volume de líquido deslocado por ele, existe uma técnica precisa que possibilita medir seu volume real, o que juntamente com a massa anteriormente medida permite o cálculo da densidade real do sólido. Tal técnica utiliza um aparelho chamado picnômetro a gás, que funciona baseado na lei do gás ideal (você se lembra qual é a equação do gás ideal? Procure descobrir!). Por esse motivo, o gás mais comumente utilizado é o hélio, uma vez que este é o gás real que melhor se aproxima de um ideal. Além disso, o hélio é inerte e apresenta átomos pequenos, conseguindo penetrar mais facilmente nos poros do material. No entanto, como esse equipamento funciona? O picnômetro a hélio é formado por duas câmaras de volumes exatamente conhecidos: uma câmara onde se coloca a amostra cujo volume se quer determinar e uma câmara de expansão, que atua como um volume de referência para a medida (Lowell; Shields, 1987). Essas duas câmaras são conectadas uma à outra por uma válvula de expansão como esquematizado na Figura 5.

Inicialmente, deixa-se todo o sistema à pressão atmosférica e mantém-se a válvula de expansão fechada. Admitindo-se que o hélio se comporta como um gás ideal e considerando-se apenas a câmara onde a amostra está, temos que:

$$P_a(V_a - V_s) = n_1RT_a \quad (1)$$

onde P_a é a pressão atmosférica, V_s é o volume verdadeiro do

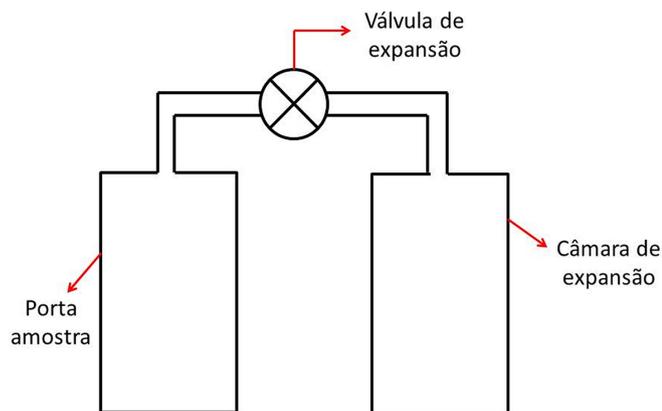


Figura 5: Esquema de um picnômetro a hélio.

sólido, V_a é o volume da câmara onde foi colocada a amostra, n_1 é o número de mols de hélio presentes em tal câmara, R é a constante universal dos gases e T_a é a temperatura ambiente.

Então, pressuriza-se a câmara de expansão até uma pressão P_1 , o que leva a:

$$P_1 V_e = n_2 R T_a \quad (2)$$

8

onde V_e é o volume da câmara de expansão e n_2 é o número de mols de hélio que ocupam esse volume. Logo em seguida, a válvula é aberta e, conseqüentemente, a pressão se reduz até uma pressão P_2 , devido à conexão entre as duas câmaras. Então, temos que:

$$P_2 (V_a - V_s + V_e) = (n_1 + n_2) R T_a \quad (3)$$

Resolvendo o produto do segundo membro dessa equação e substituindo nela as equações 1 e 2, chegamos a:

$$P_2 (V_a - V_s + V_e) = P_a (V_a - V_s) + P_1 V_e \quad (4)$$

Rearranjando matematicamente a equação 4, temos:

$$V_a - V_s = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_a} V_e \quad (5)$$

Como as pressões P_1 e P_2 são medidas em relação à pressão atmosférica P_a , esta pode ser considerada igual a zero, logo a equação 5 pode ser escrita como:

$$V_a - V_s = \frac{P_1 - P_2}{P_2} V_e \quad (6)$$

Isolando então o termo V_s , chegamos à equação de trabalho do picnômetro a hélio:

$$V_s = V_a - V_e \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \quad (7)$$

Essa equação determina o volume real do sólido. Então,

basta agora determinar a massa da amostra utilizando uma balança analítica e calcular a densidade real do material.

Para determinarmos a densidade aparente, por sua vez, podemos utilizar um método bastante simples. O primeiro passo é pesar, em uma balança analítica, uma amostra do material. Em seguida, colocamos determinado volume de água em uma proveta, sem que esta fique completamente cheia. Como devemos considerar o volume ocupado pelos poros no cálculo dessa densidade, envolvemos o sólido com filme plástico e o mergulhamos na proveta. O volume de água deslocado corresponderá então ao volume total da amostra. Basta agora dividir a massa encontrada pelo volume obtido para calcular a densidade aparente.

Pronto! Agora que já sabemos como podemos calcular as densidades real e aparente de um material, podemos determinar a porosidade deste. A porosidade P de um material, dada em porcentagem, pode ser calculada relacionando sua densidade aparente com sua densidade real - ou com sua densidade teórica - por meio da equação:

$$P = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_t} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \quad (8)$$

onde ρ_{ap} é a densidade aparente, ρ_t é a densidade teórica e ρ_r é a densidade real.

A porosidade de um material também pode ser determinada pela razão entre o volume ocupado pelos seus poros e o volume total do corpo em questão, como explicitado abaixo:

$$P = \frac{V_p}{V_p + V_s} \quad (9)$$

onde V_p é o volume total ocupado pelos poros e V_s é o volume real do sólido.

Dessa forma, existe uma técnica muito utilizada para determinar a porosidade de materiais, chamada porosimetria de mercúrio (Lowell; Shields, 1987). Com essa técnica, em apenas uma medida, é possível determinar as densidades real e aparente do material, o volume total de poros neste e sua distribuição de tamanhos. No entanto, a porosimetria é restrita à faixa dos macroporos. Vamos então entender como podemos utilizá-la para calcular a porosidade de um material? Quando um sólido é colocado em contato com um líquido, forma-se um ângulo de contato entre o líquido e a superfície sólida. Se esse ângulo for maior que 90° , o líquido não molha o sólido, ou seja, não é formada uma superfície sólido-líquido extensa e o líquido permanece na forma de gota como é mostrado na Figura 6a. O mercúrio apresenta esse comportamento para a maior parte dos materiais, logo, para que ele penetre nos poros de uma amostra, é necessário que seja exercida sobre ele uma força externa, causada pela aplicação de uma pressão externa. A Figura 6b mostra um esquema representativo dessa situação. Assim, o procedimento da porosimetria de mercúrio consiste em aumentar gradativamente a pressão externa aplicada e medir, para cada valor de pressão, o volume de mercúrio que é introduzido nos

poros da amostra. Quando esse volume não mais aumentar, significa que todos os poros externos do material já foram preenchidos e, então, o volume de mercúrio introduzido corresponde ao volume total de poros da amostra em análise. Então, determina-se o volume total do sólido por meio do mesmo procedimento sugerido no cálculo da densidade aparente. Conhecendo-se o volume total de poros e o volume total da amostra, basta dividir um pelo outro para determinar a porosidade.

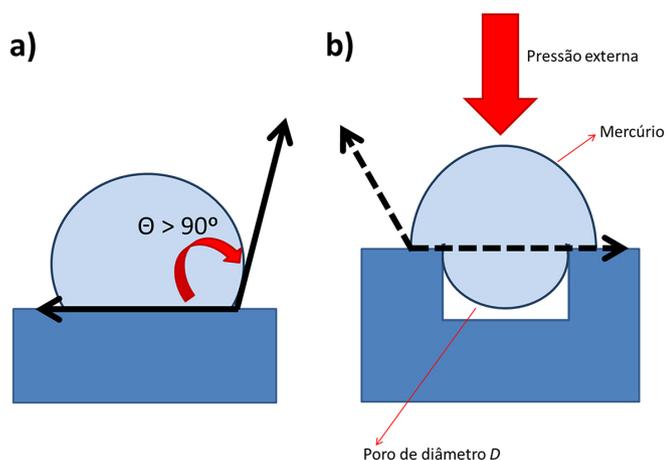


Figura 6: Mercúrio em contato com um sólido: a) relação entre a superfície sólido-líquido e o ângulo de contato; b) esquema de um porosímetro de mercúrio.

E então? O que você já aprendeu até aqui? Já entendemos como a porosidade dos materiais é uma característica importante e já sabemos como calculá-la. Percebemos também que os materiais porosos estão muito presentes no nosso dia a dia e que nós os utilizamos nas mais diferentes áreas com diversas finalidades. Vamos então falar um pouco mais sobre tais aplicações?

Aplicações – Os materiais porosos nas mais diversas áreas

Carvão ativado

Um exemplo de material poroso muito importante e amplamente utilizado é o carvão ativado. Carvões ativados são materiais carbonosos porosos que sofreram um processamento para aumentar sua reatividade por meio do aumento de sua porosidade interna. Praticamente todos os materiais que apresentam alto teor de carbono podem ser ativados, mas se utilizam mais comumente madeiras, carvões minerais, resíduos de petróleo, caroço de azeitona, grãos de café e cascas de coco. Para transformar esses materiais precursores em carvão ativado, são necessárias duas etapas básicas: a carbonização do precursor e a ativação propriamente dita. A primeira delas – a carbonização – consiste na pirólise, ou seja, um tratamento térmico do material precursor em atmosfera inerte e temperatura superior a 473 K. Você saberia calcular o valor dessa temperatura mínima em graus Celsius? Essa é uma etapa de preparação do material, na qual se removem componentes voláteis e gases leves – como

CO, H₂, CO₂ e CH₄, o que leva a uma massa de carbono fixa com uma estrutura porosa primária que favorecerá a posterior ativação. Já na segunda etapa do processo – a ativação propriamente dita – será promovido o aumento da porosidade do carvão. Nesse processo, é muito importante que se controle as características básicas do material como distribuição de tamanho dos poros e atividade química da superfície, de acordo com o que é necessário para cada aplicação pretendida. A ativação pode ser feita por dois tipos de processos: ativação química e ativação física (Sugumaran et al., 2012). A ativação química consiste em submeter o material carbonizado a reações secundárias, que têm como objetivo aumentar a área superficial. Assim, ela ocorre a partir da impregnação do material não carbonizado com substâncias como ácido fosfórico, hidróxido de potássio e cloreto de zinco e posterior carbonização a temperaturas superiores a 673 K para remoção do reagente químico, expondo a estrutura porosa do carvão ativado. Já na ativação física, o material carbonizado passa por gases de arraste contendo oxigênio combinado, normalmente H₂O e CO₂, que se comportam como agentes oxidantes moderados na faixa de temperatura de 1073 K a 1273 K.

Os carvões ativados contêm micro, meso e macroporos em sua estrutura, cujas quantidades relativas dependem do precursor e do processo de fabricação. Devido a porosidade elevada, o carvão ativado apresenta grande capacidade de adsorção. Você sabe qual é a diferença entre absorção e adsorção? Na primeira, ocorre um aprisionamento de uma substância em um material poroso, enquanto que na segunda ocorre uma interação física ou química na superfície externa ou interna do material. Na adsorção, uma substância se acumula na superfície de outro material e pode ser removida do meio onde se encontrava. A substância adsorvida é chamada de adsorbato e o material onde ela fica retida é chamado de adsorvente. A Figura 7 mostra esquematicamente o fenômeno da adsorção superficial. Logo, quando dizemos que o carvão ativado tem grande poder adsorvente significa que ele é capaz de reter diferentes substâncias em seus poros e, por esse motivo, é o adsorvente mais amplamente utilizado na indústria. Ele é utilizado em processos de refinamento de açúcar, óleos e gorduras, por ser capaz de remover impurezas, melhorando a aparência e algumas das propriedades desses produtos. Ele é usado também na purificação de ar em hospitais e laboratórios de pesquisa. Na medicina, o carvão ativado é usado em casos de intoxicação e de envenenamento, uma vez que adsorve rapidamente toxinas que são eliminadas com ele, sem serem absorvidas pelo organismo e sem causarem maiores danos à saúde do indivíduo. Por essa mesma razão, ele também é usado para despoluir águas contaminadas com metais pesados – mercúrio e cádmio, por exemplo – ou com compostos orgânicos tóxicos.

Biomateriais

Podemos também citar como exemplo os biomateriais porosos, utilizados em próteses ou no reparo e preenchimento do tecido ósseo natural dos seres vivos. Tais biomateriais

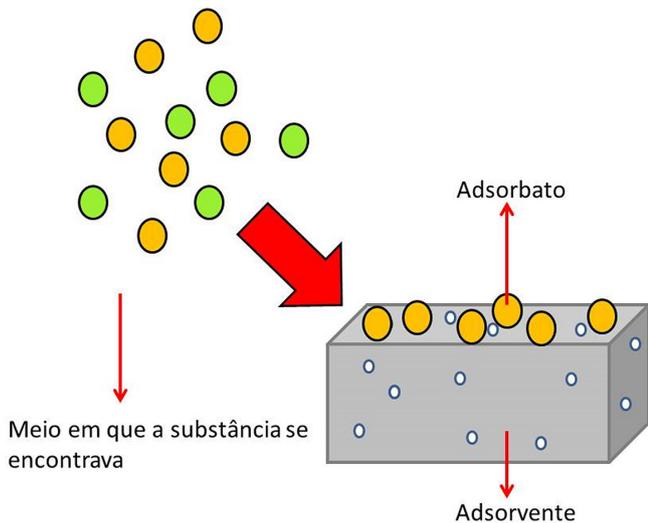


Figura 7: Ilustração do fenômeno adsorção na superfície de um material poroso.

agem como suporte à parte fisiologicamente ativa. A estrutura óssea natural humana apresenta micro, meso e macroporos interconectados, o que é extremamente útil para a fixação de componentes celulares, extracelulares e vasos sanguíneos. Portanto, algumas cerâmicas ou vitrocerâmicas porosas baseadas em fósforo e cálcio e confeccionadas por técnicas não convencionais podem ser utilizadas em substituição a tecidos ósseos. Como exemplo para o processo de preparação de cerâmicas macroporosas, podemos citar o método de replicação, que é baseado na impregnação de uma estrutura molde – sintética ou natural – à suspensão da cerâmica ou à sua solução precursora com o intuito de produzir poros que apresentem a mesma morfologia do material poroso original. Outra técnica, conhecida como molde de sacrifício, consiste na preparação de um compósito bifásico de uma matriz de partículas cerâmicas com outra fase, geralmente polimérica, chamada de fase de sacrifício, que pode ser eliminada termicamente, gerando a estrutura de poros desejada. Por fim, a técnica de formação de espumas a partir da estabilização com surfactantes ou partículas se apresenta como promissora por ser barata e rápida. Esta consiste na incorporação de ar ao interior da suspensão precursora da cerâmica que, após secagem, é submetida a um processo de sinterização a altas temperaturas para obtenção dos poros (Stuart et al., 2006).

Alguns exemplos de materiais porosos utilizados como biomateriais em reconstituições ósseas são a hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) e o biovidro ($Na_2O-CaO-P_2O_5-SiO_2$), que por possuírem composição e estrutura bastante semelhantes à do tecido ósseo, apresentam altas biocompatibilidade e bioatividade. Essas propriedades garantem uma eficaz interação dos tecidos vivos e do meio corpóreo com o biomaterial implantado. A hidroxiapatita é também muito importante e amplamente usada no tratamento de cáries dentárias, pois está diretamente relacionada com os processos de mineralização e desmineralização dos dentes (Silva, 2001). Outra importante aplicação das cerâmicas porosas

como biomateriais é a liberação controlada de fármacos, em que um princípio ativo impregnado na matriz porosa é liberado de maneira precisa e eficiente, sendo possível diminuir a frequência com que um medicamento é ingerido. Nesse sentido, a cerâmica porosa atua como suporte para o fármaco, que é incorporado em seus poros e pode ser, por exemplo, marcado magneticamente para que seja guiado especificamente até o órgão no qual ele deve atuar.

Conversor catalítico

Um outro exemplo de material poroso é o conversor catalítico – ou catalisador automotivo – utilizado em veículos automotores. Você sabe qual é a função dele? A queima da gasolina nos veículos produz em maior quantidade gás carbônico e água, porém esses não são os únicos produtos resultantes da queima. São liberados também óxidos de enxofre e de nitrogênio, provenientes de impurezas contidas na gasolina; vapores de hidrocarbonetos que não foram queimados; e compostos de chumbo, quando a gasolina possui aditivos a base desse metal. Todos esses subprodutos resultantes da queima da gasolina são poluentes e causam danos ao ambiente e à nossa saúde. Por isso, é extremamente importante tomar providências para diminuir a liberação desses gases na atmosfera. É essa a função dos catalisadores automotivos: encontrados no escapamento dos veículos, eles convertem esses gases poluentes em dióxido de carbono, água e nitrogênio, que são produtos menos nocivos à nossa saúde ou ao ambiente. No entanto, como eles fazem isso? Os conversores catalíticos, mostrados na Figura 8, são feitos utilizando um material cerâmico poroso, a cordierita de magnésio ($2MgO.2Al_2O_3.5SiO_2$), que apresenta estrutura semelhante à de uma colmeia formada por minúsculos canais (Silva, 2010). Usualmente, a cordierita é fundida pelo processo de extrusão, formando um monólito com elevada

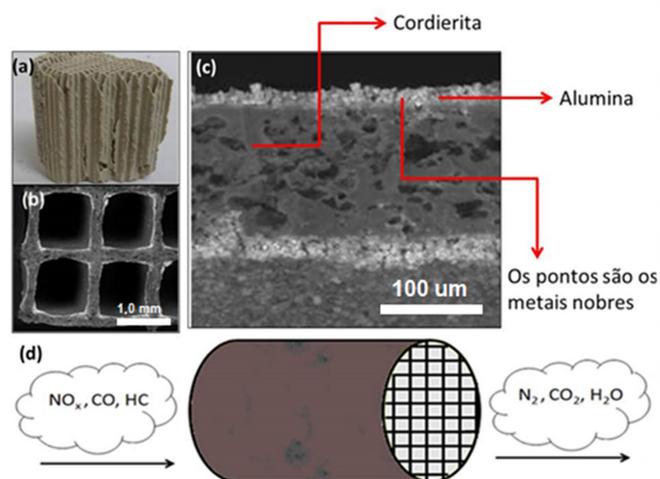


Figura 8: Imagem de um conversor catalítico evidenciando: a) estrutura longitudinal; b) estrutura porosa semelhante a uma colmeia (imagem de MEV); c) imagem do conversor visto no microscópio eletrônico de varredura, mostrando as morfologias da cordierita, do filme de alumina e os metais nobres; d) Imagem mostrando a conversão química de gases em um catalisador automotivo.

área superficial geométrica. Sobre essa estrutura porosa são aplicados filmes de alumina, também porosos, que suportam em seus poros metais nobres como platina, paládio, ródio e molibdênio. Tais metais são capazes de catalisar reações de oxidação e redução. Logo, ao passarem pelo catalisador automotivo, os gases advindos da queima do combustível sofrem essas reações e são oxidados ou reduzidos a gases menos poluentes. Dessa forma, diminui-se a quantidade de gases nocivos lançados na atmosfera e reduz-se o impacto ambiental causado pelo uso de combustíveis fósseis. Atualmente, os conversores catalíticos podem reduzir as emissões de gases poluentes em mais de 90%.

Diversos outros materiais porosos como zeólitas, utilizadas no craqueamento de moléculas que compõem o petróleo, nanotubos de carbono utilizados como adsorvedores de moléculas poluentes e metais pesados, e dióxido de titânio (TiO₂) poroso para confecção de células solares mais eficientes também demonstram a importância destes e seus impactos tecnológicos na sociedade.

Considerações finais

Como você pôde perceber, os materiais porosos estão em toda parte e têm grande importância na nossa sociedade. Nessa nossa jornada de descobertas, aprendemos como algo aparentemente insignificante como a porosidade, é na verdade muito importante, por permitir um amplo espectro de aplicações. Comentamos e compreendemos as características e as aplicações de alguns materiais porosos por meio dos nossos conhecimentos de sala de aula e do dia

a dia. Aprendemos o significado de certos termos e novas teorias e percebemos como a ciência é essencial para o entendimento do mundo em que vivemos.

Nossa intenção neste texto não foi de abordar todos os usos dos materiais porosos apresentados nem mesmo de aprofundar em técnicas de caracterização. Buscamos tratar de forma simples e compreensível aspectos básicos referentes a materiais porosos, a fim de que você conhecesse um pouco mais sobre esses materiais, tão importantes e dos quais tão pouco se fala ou se tem acesso em livros didáticos. Esperamos ter contribuído para a construção do seu conhecimento e para instigar sua curiosidade acerca da ciência dos materiais.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CNPq, FAPEMIG e CAPES e ao Centro de Microscopia da UFMG pelas imagens

Amanda Vitória Santos (amandasantosenq@outlook.com) é graduanda em Engenharia Química (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas). Belo Horizonte, MG – BR. **Marcelo Machado Viana** (marcelomavi@yahoo.com.br), licenciado em Química, mestre e doutor em físico-química (Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG), é docente no Departamento de Física e Química da PUC Minas. Belo Horizonte, MG – BR. **Fernando Henrique Alves Medeiros** (fernando100zxy@yahoo.com.br) é graduando em Engenharia Química (UFMG). Belo Horizonte, MG – BR. **Nelcy Della Santina Mohallem** (nelcy@ufmg.br) graduada em física pela UNICAMP, mestre em Ciências Técnicas Nucleares pela UFMG, doutora em Física Aplicada pela USP, é docente do Departamento de Química da UFMG. Belo Horizonte, MG – BR.

Referências

CALLISTER JR., W.D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

DINIZ, C.F. *Síntese de aluminas porosas: aplicações em dispositivos de liberação controlada de drogas*. 2004. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FERREIRA, O.P.; ALVES, O.L. Ecomateriais: desenvolvimento e aplicação de materiais porosos funcionais. *Química Nova*, v. 30, n. 2, p. 464-467, 2007.

GREGG, S.J.; SING, K.S.W. *Adsorption, surface area and porosity*. 4. ed. Londres: Academic Press, 1997.

LOWELL, S.; SHIELDS, J.E. *Powder surface area and porosity*. 3. ed. Londres: Chapman and Hall, 1998.

MANNHEIMER, W.A. *Microscopia dos materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: E-papers, 2002.

SILVA, R.A. *Estudo das características morfológicas, texturais e estruturais dos catalisadores automotivos, síntese e caracterização de filmes alternativos*. 2010. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SILVA, R.R.; FERREIRA, G.A.L.; BAPTISTA, J.A.; DINIZ, F.V. A química e a conservação dos dentes. *Química nova na escola*, v. 13, p. 3-8, 2001.

STUDART, A.R.; GONZENBACH U.T.; TERVOORT E.; GAUCKLER L.J. Processing routes to macroporous ceramics: a review. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 89, n. 6, p. 1771-1789, 2006.

SUGUMARAN, P.; SUSAN, V.P.; RAVICHANDRAN, P.; SESHADRI, S. Production and characterization of activated carbon from banana empty fruit bunch and Delonix regia fruit pod. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, v. 3, p. 125-132, 2012.

Abstract: *The amazing world of porous materials – characteristics, properties and applications.* In this work, porous materials are discussed initially in an inquisitive and reflective way, correlating their physicochemical properties and applications with the presence of pores. Some simple experiments involving porous materials are presented throughout the text as well as some examples, emphasizing materials as activated carbon, automotive catalysts and biomaterials. Several applications of each one are also shown, which evidences the wide applicability of the porous materials and justifies the growing interest of society for them.

Keywords: porous materials, porosity, pores.