064-068 Eng 1.qxp 1/3/06 6:57 PM Page 1

SEM MATERIAIS NÃO HÁ ENGENHARIA

Que material deveremos seleccionar para uma determinada aplicação? Quais os parâmetros de projecto a especificar, tendo em vista a escolha desse material? A resposta exige o conhecimento das propriedades do material, do desempenho em serviço, da facilidade de limpeza e de manutenção, do *design*, do processo de fabrico, da reciclabilidade/impacto ambiental, da durabilidade e, finalmente, do custo

Texto de **M. Clara Gonçalves***

A ENGENHARIA CIVIL é o ramo mais antigo da engenharia. No Ocidente, começa por definir-se como uma engenharia militar, à data do Império Romano, onde alcança notoriedade e elevado prestígio, mas só no séc. XVIII se assume com a designação de engenharia civil. A ciência e a engenharia de materiais, por outro lado, é dos ramos mais recentes da engenharia. Só na segunda metade do séc. XX é aceite esta designação no meio científico. A parceria entre engenharia civil e engenharia de materiais, porém, remonta à sua génese – sem materiais não há engenharia.

Aos materiais foi reconhecida tal importância pelos historiadores que os grandes períodos de desenvolvimento da sociedade humana foram classificados de acordo com o material que mais significativamente contribuiu para o seu avanço (Fig. 1). Assim, temos uma Idade da Pedra com dois períodos distintos – Paleolítico e Neolítico –, seguida de uma Idade dos Metais que se subdivide em Idade do Cobre, Idade do Bronze e, logo depois, a Idade do Ferro, que perdura quase até ao presente.

É no domínio da tecnologia do processamento metálico que parece ter assente, durante milénios, o grau de desenvolvimento civilizacional. No final do séc. XX, começa a desenhar-se uma nova fase do desenvolvimento, cuja classificação não é, porém, consensual – Idade da Electrónica/Comunicações ou Idade dos Novos Materiais? Desta vez, optaremos pela função ou pelo material?

As primeiras sociedades humanas tiveram acesso a um número limitado de materiais. As fibras naturais encontram-se, certamente, entre os primeiros quer as de origem vegetal – madeira, junco, algodão, linho, etc. – quer as de origem animal – pele, lã, seda, etc. Mas este tipo de materiais degrada-se rapidamente por decomposição bacteriana, pelo que não existem registos da sua utilização que remonte às origens da humanidade. Com o passar do tempo, algumas técnicas para a produção de novos materiais, com propriedades superiores às dos materiais naturais, foram sendo encontradas. A obsidiana, a argila e o quartzo foram, provavelmente, as descobertas seguintes. A argila, em particular, apresenta um interesse singular quer pela abundância relativa na crosta terrestre quer pela diversidade composicional e multiplicidade nos graus de pureza. Propriedades como plasticidade, retenção de forma e dureza após secagem e, em especial, a obtenção de um produto poroso e duro embora frágil, após cozedura a 500 °C, cedo se

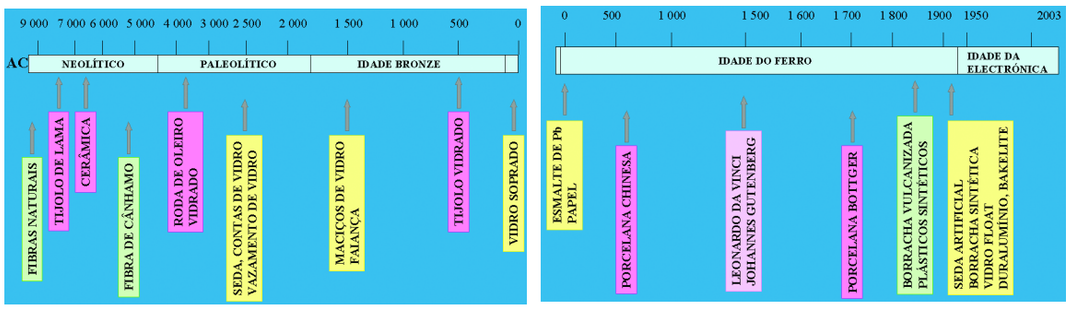

Figura 1 – Os Materiais na História – cronograma da Europa (adaptado de *Understanding Materials Science: history, properties, applications*, Rolf E. Hummel, Springer-Verlag New York. 2nd Ed. 1998)

064-068 Eng 1.qxp 1/3/06 6:57 PM Page 2

revelaram de importância particular. A cerâmica e, mais tarde, o vidro, cujas origens remontam a 23 000 a.C. e 12 000 a.C., respectivamente, foram materiais de grande difusão, estando associados à estratificação social e permitindo ainda definir rotas comerciais. Curiosamente, as classificações dos períodos históricos nunca contemplaram uma Idade da Cerâmica. E, no entanto, quer os artefactos cerâmicos quer os vítreos detêm uma importância especial na arqueologia e na história, pois são menos susceptível do que os metais a interacções ambientais, sobrevivendo no tempo com alterações mínimas. Em particular a cerâmica, pelo facto de não ser reciclável, ao contrário do que acontece com o vidro ou o metal, apresenta-se como um artefacto de importância singular em muitos achados arqueológicos.

O homem do Neolítico terá, provavelmente, descoberto que o metal puro poderia ser deformado ou endurecido por forjagem e amaciado por aquecimento. No entanto, estas peças não poderiam substituir com igual desempenho os objectos ou armas fabricados em pedra. E, assim, o cobre, a prata e o ouro ficariam reservados para uso cerimonial, como peças decorativas. A partir de 1500 a.C., a extracção, a fundição e a forjagem dos metais começam a ganhar importância e difusão crescentes. As propriedades dos metais começariam, então, a ser melhoradas ou por tratamentos térmicos ou pela adição de outras substâncias (elementos de liga). Inicia-se a selecção de materiais.

Figura 2 – Ciência de Materiais – a relação entre Estrutura, Propriedades, Processamento e Performance (adaptado de *Properties of Materials*, Mary Anne White, Oxford University Press, 1999)

Outrora, tal como hoje, as civilizações mais desenvolvidas, aquelas que alcançaram um predomínio sobre outras civilizações contemporâneas, foram precisamente as que detiveram conhecimentos sobre processamento de novos materiais e/ou materiais mais elaborados. É, no entanto, com o nascimento da ciência e engenharia de materiais, no séc. XX, que estes deixam de ser usados de forma empírica e passam a ser estudados de forma sistemática, conduzindo a uma nova área interdisciplinar. A ciência de materiais pode definir-se como as relações entre Estrutura <-> Propriedades <-> Processamento <-> Performance (Fig. 2).

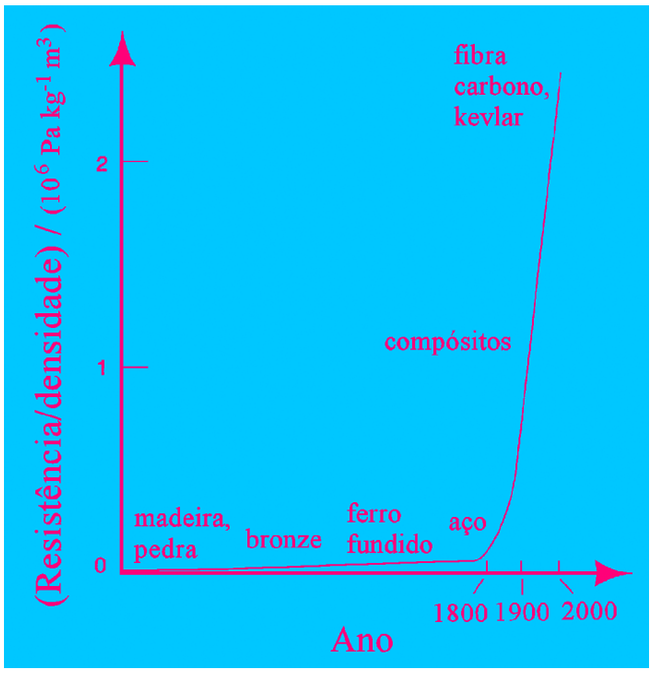

Figura 3 – O desenvolvimento de novos produtos alterou profundamente a importância relativa das várias classes de materiais (adaptado de *Properties of Materials*, Mary Anne White, Oxford University Press, 1999)

Tradicionalmente, os materiais têm sido classificados em classes de metais/ cerâmicos e vidros/polímeros/materiais compósitos, de acordo com considerações estruturais e de classes de propriedades. Hoje, o projecto e o fabrico de materiais a escalas do nano (10^{-9} m) e a possibilidade de caracterização a uma escala quase molecular, conduziu ao fabrico de uma nova classe de materiais que poderemos designar de nanomateriais. Semicondutores, materiais com propriedades eléctricas intermédias entre os condutores eléctricos e os isolantes, e biomateriais, materiais concebidos para implantes no corpo humano, são outras novas classes de materiais. A classificação clássica de metais/cerâmicos e vidros/polímeros/materiais compósitos está a perder-se. As fronteiras entre as diferentes classes de materiais também se tem esbatido. A classe dos materiais compósitos foi a primeira onde se combinaram as pro-

064-068 Eng 1.qxp 1/3/06 6:57 PM Page 3

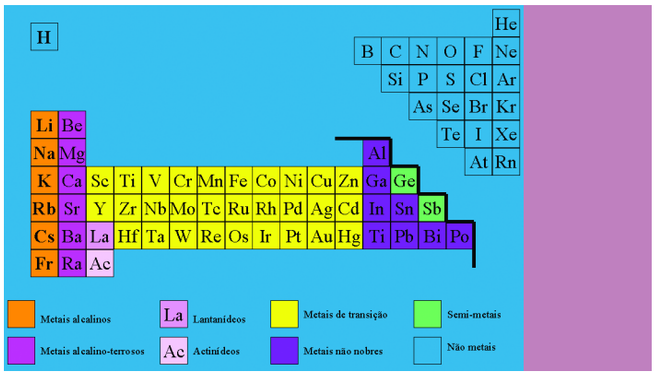

Figura 4 – O carácter metálico na Tabela Periódica

priedades de duas ou mais das anteriores classes.
A importância relativa das várias classes de materiais têm-se movido da área dos metais, para os cerâmicos/vidros, para os compósitos, para os polímeros e, recentemente, para os nanomateriais (Fig. 3). Hoje, o grande desafio para a engenharia de materiais coloca-se no fabrico de materiais cujas propriedades e desempenho tenham sido previamente definidos – estamos na era do "material fabricado por medida".

OS METAIS

A maior parte dos elementos da tabela periódica tem carácter metálico (Fig. 4). É necessário referir, no entanto, que nem todos os elementos metálicos se encontram com uma expressão significativa na crosta terrestre, pelo que a sua exploração, por exemplo a partir da extracção de minas e posterior purificação, pode englobar processos morosos e de tecnologia dispendiosa e ou poluente. Por outro lado, a exploração de minas torna-se cada vez mais difícil e onerosa à medida que o mineral se vai esgotando e é necessário descer a níveis mais baixos na exploração.

CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS

- Matérias-primas: metais como alumínio e ferro são abundantes. Outros, como zinco, crómio, cobre ou chumbo, são limitados.
- Extracção: alteração da paisagem
- Energia: uso intensivo de energia.
- Segurança: eliminação de gases tóxicos durante a produção. Possibilidade da presença de metais tóxicos como chumbo ou cádmio
- Reciclabilidade: facilmente recicláveis, a baixo custo.

Os metais distinguem-se dos outros sólidos cristalinos por um número de propriedades físicas que lhe são comuns.

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS METAIS

- elevadas densidade, ponto de fusão e de ebulição
- elevadas condutibilidades térmica e eléctrica
- elevado coeficiente de dilatação
- elevada maleabilidade (podem ser prensados em folhas)
- elevada ductilidade (podem ser estirados em fios)
- elevada resistência mecânica
- brilho acentuado

As propriedades dos metais impuros, no entanto, podem diferir significativamente das dos metais puros. A adição de pequenas impurezas (metálicas ou não metálicas) a metais puros, formando uma liga metálica, pode conduzir a propriedades especiais de grande interesse tecnológico de que são exemplo os aços, os latões e os bronzes.
O objectivo da ciência de materiais consiste em relacionar as características estruturais dos materiais com as suas propriedades macroscópicas.

CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS METAIS

- substâncias inorgânicas constituídas por um ou mais elementos metálicos (*e.g.* ferro, cobre ou titânio) e, por vezes, elementos não metálicos (*e.g.* oxigénio, azoto, carbono);
- os átomos metálicos apresentam uma ligação química característica – ligação metálica;
- nos metais, os átomos encontram-se dispostos de forma ordenada, formando cristais de elevada compacidade, NC entre 8 e 12.

Por exemplo, a ligação química característica dos metais – a ligação metálica – envolve a partilha dos electrões de valência por todos os átomos presentes, logo é uma ligação não direccional. A não direccionalidade da ligação metálica favorece um empilhamento compacto dos átomos nos metais, pelo que os números de coordenação (NC) observados são, em geral, elevados: de 8 a 12. As ligações químicas podem ser mais ou menos intensas, variando entre 68 kJ/mol no mercúrio (Hg) (com um ponto de fusão de -39 °C) até 850 kJ/mol, no tungsténio (W) (com um ponto de fusão de 3410 °C).
A densidade, que depende do grau de compactação e das massas atómicas envolvidas, é, em geral, elevada nos metais. No entanto, elementos leves como o berílio (Be) (PA = 90 122 g/mol) ou o alumínio (Al) (PA = 26,9815 g/mol), apresentam valores de densidade tão baixos como 1,85 g/cm^3 e de 2,71 g/cm^3, respectivamente. Elementos como o ferro (Fe) (PA = 55,8470 g/mol) ou o cobre (Cu) (PA = 63 546

064-068 Eng 1.qxp 1/3/06 6:57 PM Page 4

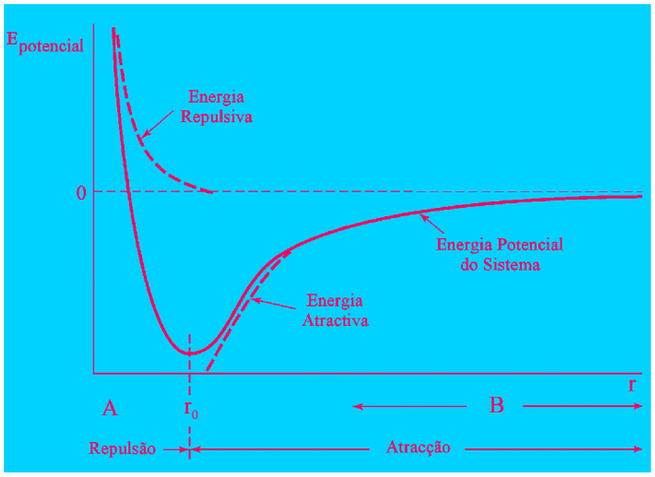

Figura 5 – Curva de energia potencial entre dois átomos isolados, em função da distância entre núcleos

g/mol), apresentam valores de densidade intermédios, de 7,87 g/cm^3 e de 8,94 g/cm^3, e elementos mais pesados, como o chumbo (Pb) (PA= 207,2000 g/mol) ou a platina (Pt) (PA = 195,0900 g/mol), apresentam valores de densidade mais elevados, 11,35 g/cm^3 e 21,45 g/cm^3, respectivamente.

LIGAÇÃO METÁLICA

A ligação metálica, que assegura a coesão da estrutura, caracteriza-se por forças interatómicas relativamente intensas e não direccionais, resultantes de forças electrostáticas entre os cernes positivos e os electrões livres.

~ 20 - 240 kJ.mol^{-1}

O ponto de fusão de um sólido representa a temperatura à qual o material terá de ser aquecido para quebrar as suas ligações químicas. Quer para o ponto de fusão quer para a energia de ligação, os elementos metálicos apresentam um leque muito diversificado de valores. Por exemplo, o sódio (Na) e o potássio (K), com energias de ligação de 108 kJ/mol e 89,6 kJ/mol, respectivamente, apresentam pontos de fusão de 97,9 °C e 63,5 °C, respectivamente. Metais como o titânio (Ti) ou o ferro (Fe), por outro lado, apresentam energias de ligação de 473 kJ/mol e 418 kJ/mol, e pontos de fusão de 1812 °C e 1535 °C, respectivamente.

Se acrescentarmos ainda a possibilidade dos electrões de valência partilhados na ligação metálica se poderem mover livremente por toda a estrutura (Modelo do Electrão Livre), então explicaremos as boas propriedades de condução eléctrica e térmica observadas nos metais. Nos metais puros mais comuns, a condutividade térmica varia entre 80 W/mK para o ferro (Fe) e 428 W/mK para a prata (Ag), e a condutividade eléctrica entre 0,94 x 10^7 $(\Omega m)^{-1}$ para a platina (Pt) e 6,8 x 10^7 $(\Omega m)^{-1}$ para a prata (Ag).

TEORIA CLÁSSICA DO ELECTRÃO LIVRE

Num metal, os electrões exteriores encontram-se fracamente ligados aos núcleos. Estes electrões formam um "mar" de electrões livres, que se movem livremente.

Ao aplicar-se ao metal um campo eléctrico, os electrões passam a deslocar-se preferencialmente numa dada direcção, de acordo com o potencial aplicado, dando origem a uma corrente eléctrica.

Nos metais, para além da ligação metálica, os critérios termodinâmicos favorecem também estruturas de elevada compacidade.

TERMODINÂMICA

A curva de energia entre dois átomos isolados, A e B, em função da distância a que se encontram, ilustra a diminuição de energia do sistema com a proximidade atómica (Fig. 5). O limite físico desta aproximação é determinado pelas dimensões atómicas.

A grandes distâncias, as interacções entre os dois átomos são negligenciáveis, mas, à medida que os dois átomos se aproximam, passam a exercer forças um sobre o outro. Estas forças são de dois tipos – atractiva e repulsiva. A origem e a intensidade da força atractiva depende do tipo de ligação entre os dois átomos. A força repulsiva tem como origem a repulsão entre as nuvens electrónicas. A distância interatómica à qual a força repulsiva iguala a força atractiva é designada por distância de equilíbrio, r_0, e corresponde ao mínimo da curva de energia potencial do sistema.

Para mover os átomos da sua posição de equilíbrio é necessário fornecer trabalho ao sistema, por compressão ou por tracção.

A forma mais eficaz de realizar um empacotamento denso é através da ocupação periódica do espaço. Os sólidos cristalinos são formados por átomos ou iões organizados periódica e tridimensionalmente, dando origem a uma estrutura ordenada.

De entre as várias redes cristalinas, as mais comuns em metais são a cúbica de corpo centrado (ccc), a cúbica de faces centradas (cfc) e a hexagonal compacta (hc).

ESTRUTURA CRISTALINA

À rede tridimensional de pontos que representa a periodicidade do

064-068 Eng 1.qxp 1/3/06 6:57 PM Page 5

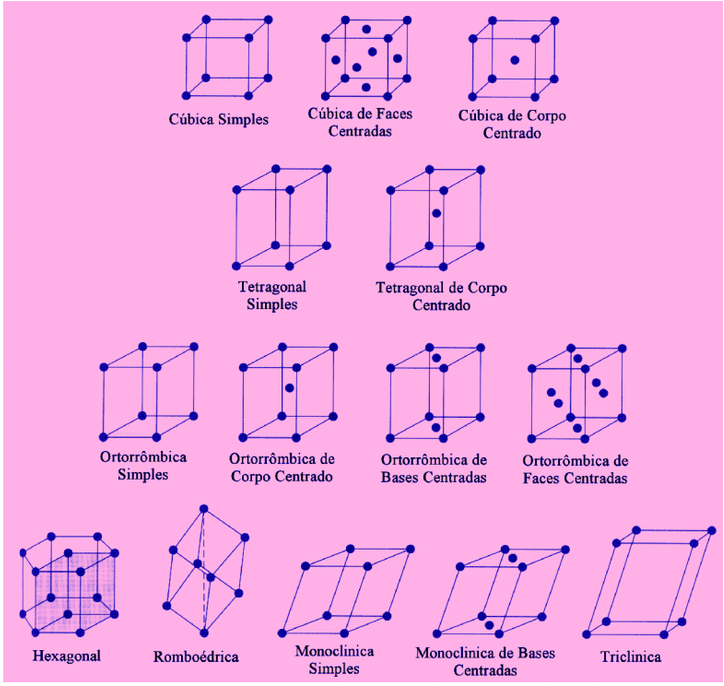

Figura 6 – Redes de Bravais

sólido cristalino dá-se o nome de rede espacial. Existem 14 redes distintas, designadas por redes de Bravais (Fig. 6). Os pontos da rede espacial designam-se por nós da rede.
Aos átomos ou iões do sólido cristalino dá-se a designação de motivo. Embora os nós da rede representem localizações atómicas, não é necessário que nós da rede e motivos sejam coincidentes.
Rede Espacial + Motivo → Rede Cristalina

A importância dos metais ao longo da história deve-se, em grande parte, às suas propriedades mecânicas – em especial resistência e ductilidade – e a sua utilização em projecto de engenharia é, maioritariamente, como elemento estrutural. Quando um metal é submetido a esforços mecânicos, por exemplo, pela acção de martelar ou de prensar, o metal deforma-se, mas só partirá se a intensidade da acção mecânica atingir um determinado valor. A ductilidade é a propriedade mecânica que mede o grau de deformação plástica à fractura, *i.e.*, quanto mais elevada, maior a capacidade do material se deformar antes de partir. Quer a resistência quer a ductilidade dependem das forças que mantêm os átomos unidos. No entanto, se estimarmos a resistência mecânica de um metal somente a partir do conhecimento das suas forças de ligação química, esta será entre três a cinco ordens de grandeza superior à medida experimentalmente.
Existe uma relação entre a intensidade das forças de ligação química e a deformação plástica dos metais, mas esta relação é complexa. A não direccionalidade da ligação metálica permite o deslizamento de planos de átomos, uns sobre os outros. Mas a presença de certos defeitos cristalinas facilita este processo [1].
Valores típicos de ductilidade são, por exemplo, 40 por cento para o níquel (Ni) e alumínio (Al) e 45 por cento para o ferro (Fe) e cobre (Cu). ■

[1] O tema das propriedades mecânicas dos metais, pela sua importância, será desenvolvido num outro artigo. No próximo número, será abordada a classe dos cerâmicos e vidros

* professora do departamento de engenharia de materiais do IST