



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU  
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS  
LAMAT - LABORATÓRIO DE MATERIAIS**



# **APOSTILA DE MATERIAIS ELÉTRICOS**

**COMPILAÇÃO:  
PROF<sup>ª</sup> NORA DÍAZ MORA**

**APOIO TÉCNICO:  
JULIANA FENNER R. LUCAS  
MAYCON A. MARAN**

**FOZ DO IGUAÇU  
2010**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO A MATERIAIS EM ENGENHARIA ELÉTRICA

### Sumário

Objetivos deste capítulo .....	2
1.1 Introdução .....	2
1.2 Materiais nas usinas hidrelétricas .....	3
1.3 Dispositivos semicondutores .....	5
1.4 Ciência de materiais .....	5
1.5 Classificação dos materiais .....	7
1.5.1 Metais .....	7
1.5.2 Cerâmicos .....	8
1.5.3 Polímeros .....	8
1.5.4 Semicondutores .....	8
1.5.5 Compósitos .....	9
1.5.6 Biomateriais .....	9
1.6 Materiais avançados .....	10
1.7 Necessidades dos materiais modernos .....	11
1.8 Referências bibliográficas do capítulo .....	12
Exercícios .....	12

# 1 INTRODUÇÃO A MATERIAIS EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Objetivos deste capítulo

Finalizado o capítulo o aluno será capaz de:

- conhecer a importância do estudo de materiais na engenharia;
- conhecer a classificação geral e materiais como: metais, polímeros e cerâmicas;
- estabelecer a correlação entre estrutura, propriedades processamento e aplicações dos materiais.

## 1.1 Introdução

Observa-se que todos os segmentos da vida diária dependem de materiais, incluindo: transporte, residências, vestimenta, meios de comunicação, processamento de dados, comércio, lazer, produção de alimentos, itens de saúde, ensino, geração e transporte de energia e muitos outros. Assim, o conhecimento e habilidade em produzir e manipular materiais afeta diretamente o nível de vida da população.

O nível de desenvolvimento de um povo está diretamente relacionado à sua habilidade em produzir e manipular os materiais. As culturas passadas foram classificadas em: idade da pedra, idade de bronze, e a idade da cultura atual, das décadas em torno da virada do terceiro milênio, é idade do silício. Isto não constitui um exagero considerando, o silício ser o material base para a fabricação de componentes eletrônicos e que os sistemas eletrônicos estão presentes na grande maioria das atividades humanas, incluindo transporte (automóveis, aviões, trens, foguetes espaciais, etc.) comunicações, computação, controle de processos industriais, medicina, instrumentos de análise e de pesquisa em todas as áreas, esporte e muitas outras.

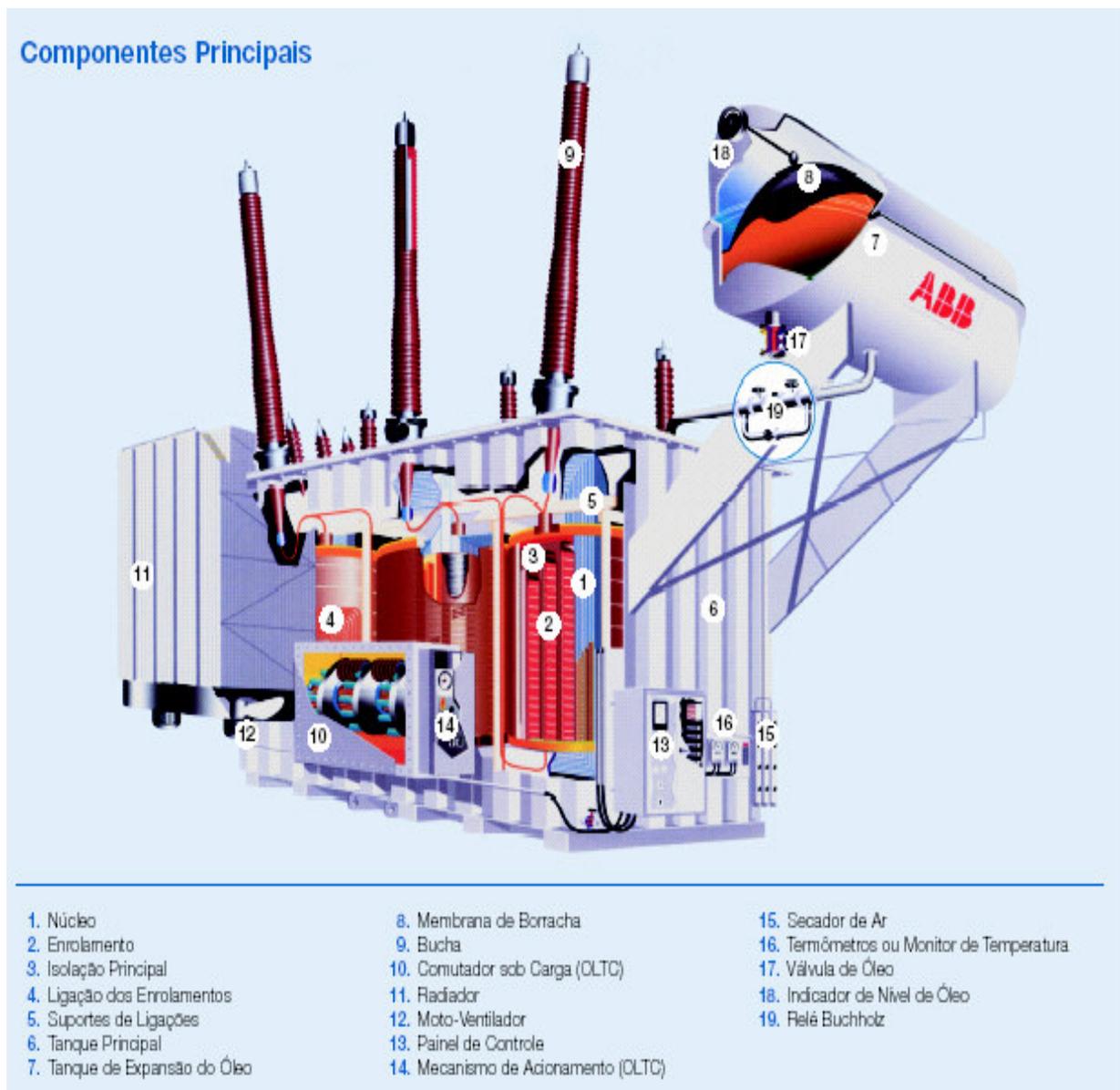
É difícil imaginar uma atividade que não tenha alguma dependência, se não direta, indireta com algum sistema eletrônico. Como dependência indireta entende-se a produção de utensílios usados na atividade, a análise de resultados da atividade, o transporte e/ou comercialização de bens e muitos outros exemplos. Como consequência, a eletrônica está se tornando o maior mercado mundial (maior que a automobilística, a química, etc.), com um valor total anual acima de um trilhão de dólares.

Todas estas maravilhas eletrônicas, no entanto são baseadas em materiais, sendo o semicondutor de silício o mais importante destes. Mesmo assim, os outros materiais usados em engenharia eletrônica e elétrica são também fundamentais e imprescindíveis e devem receber atenção no estudo de materiais elétricos. O principal objetivo deste material é oferecer o conhecimento básico e/ou os fundamentos sobre os diversos materiais usados na engenharia elétrica. Aqui, são destacadas as aplicações de materiais metálicos nas diversas formas de geração de energia elétrica, entre outras a eólica, solar, termoelétricas, hidroelétricas.

## 1.2 Materiais nas usinas hidrelétricas

Na etapa de geração destaca-se o uso do aço para a construção das pás e eixo das turbinas (resistência mecânica); nos geradores (estator, rotor, coletores, barras estatóricas, etc.) o uso do cobre eletrolítico (propriedades elétricas), destacando-se especialmente a característica das barras estatóricas que são refrigeradas pelo uso de água pura deionizada.

Na etapa de transformação (elevação da tensão) na construção dos transformadores (Figura 1.1) destaca-se o uso de matérias isolantes sólidos (papel termicamente estabilizado, madeira, resinas, etc.) líquido (óleo mineral isolante), gasoso (SF<sub>6</sub>, ar sintético superseco, nitrogênio e CO<sub>2</sub> como médio de extinção). Materiais ferromagnéticos são utilizados para fabricação do núcleo, destacando-se as chapas de aço silício laminado a frio, o cobre é usado para os enrolamentos de transformadores e máquinas elétricas.



**Figura 1.1** - Esquema de um transformador (ABB).

O papel dos dielétricos é realizar o isolamento entre os condutores, entre estes e a massa ou a terra, ou, ainda, entre eles e qualquer outra massa metálica existente na sua vizinhança. O processo principal, característico para qualquer dielétrico, que se produz quando sobre ele atua uma tensão elétrica, é a polarização. Nas subestações os meios isolantes mais utilizados são o ar natural ou comprimido e o SF<sub>6</sub> (Figura 1.2) assim como porcelana, vidro e polímeros.



(a)



(b)

**Figura 1.2** - (a) GIS – Usina Hidrelétrica de Itaipu e (b) isoladores de vidro para linhas de transmissão.

Nas linhas de transmissão e distribuição além do uso do vidro, porcelana e polímero na isolação é usado o aço galvanizado para a construção das estruturas, entretanto, as linhas são construídas de ligas de alumínio, aço e cobre, devido a características como resistência mecânica e condutividade (ver Figura 1.3).



(a)



(b)

**Figura 1.3** - (a) Linha de transmissão e (b) os cabos condutores.

### 1.3 Dispositivos semicondutores

As propriedades únicas dos materiais semicondutores permitiram o seu uso em dispositivos para desempenhar funções eletrônicas específicas. Diodos e transistores, que substituíram as antigas válvulas (em tubos a vácuo), são dois exemplos típicos de dispositivos baseados em materiais semicondutores. A invenção dos dispositivos semicondutores foi a responsável pelo advento e o rápido crescimento de novas e inúmeras indústrias da área eletro-eletrônica nas últimas décadas. Suas principais vantagens incluem o tamanho reduzido (miniaturização de circuitos) baixo consumo de potência e a não necessidade de tempo prévio de aquecimento e podem servir vantajosamente como pontes ou filtros em circuitos elétricos.

Materiais como o carboneto de silício (SiC) e o óxido de zinco (ZnO) são tradicionalmente usados em pára-raios de média e alta tensão, pois a magnitude de suas descontinuidades de energia fazem deles condutores pobres, exceto quando atingidos por uma sobre tensão momentânea (tal qual uma descarga atmosférica por exemplo). Assim, a uma alta voltagem ocorre a condução de corrente ao solo, reduzindo a tensão residual que se propaga aos demais equipamentos da rede. Cessada a sobretensão, ele volta a condição de isolante, ou seja, funciona como uma “válvula de segurança elétrica”.

### 1.4 Ciência de materiais

Os materiais são substâncias cujas propriedades as tornam utilizáveis em estruturas, máquinas, dispositivos ou produtos. Desta forma, necessitamos conhecer as propriedades dos materiais. Como exemplos de materiais com propriedades distintas temos: metais, cerâmicos, semicondutores, supercondutores, polímeros (plásticos), vidros, dielétricos, fibras, madeira, areia, pedra, vários conjugados, dentre outros.

Todos os produtos manufaturados, de qualquer tipo, dependem das características e qualidades dos materiais empregados. Assim, a qualidade de um produto está diretamente relacionada com as qualidades e propriedades dos materiais. Um produto pode ser fabricado de acordo com um projeto excelente e por um processo de confecção também perfeito e mesmo assim apresentar defeito. Este defeito pode estar associado a defeito do material usado ou mesmo ao emprego de material não adequado. Um material pode também apresentar defeito produzido pelo meio ao qual estará exposto. Um exemplo observado recentemente, foi a aplicação de uma capa de revestimento de plástico aos fios da rede elétrica. Em aproximadamente um ano, o plástico estava todo despedaçado e no chão. Ou seja, a escolha do tipo de plástico neste caso não foi adequada para suportar a exposição aos raios solares. Esta má escolha foi um grande prejuízo para a companhia e poderá ter custado o emprego do engenheiro que fez isto.

De forma geral, especialistas em engenharia e ciência de materiais tratam da geração e da aplicação do conhecimento que relaciona composição, estrutura e processamento de materiais com suas propriedades e usos. Porém, a pesquisa, a produção e o uso de materiais não são domínio exclusivo dos profissionais de ciência e engenharia de materiais. O engenheiro, de qualquer especialidade, em parte do seu trabalho, lida com materiais incluindo especificação, projeto, aquisição, qualificação, inspeção de aceitação em fábrica e o acompanhamento do

desempenho dos produtos em serviço. Mesmo que o engenheiro não trabalhe diretamente na produção do material ou na fabricação do produto, ele estará interagindo com estes profissionais e deverá ter a formação e o conhecimentos mínimo necessário que lhe permita acompanhar todos os processos. Portanto é fundamental que todo engenheiro conheça os materiais usados na sua especialidade.

Num determinado projeto, na escolha de um material para uma dada aplicação o engenheiro deve considerar os seguintes aspectos: as propriedades do material - térmicas, mecânicas, elétricas, magnéticas, ópticas e deteriorativas e os aspectos econômicos.

O engenheiro pode fazer um bom trabalho técnico ao escolher um material com propriedades excelentes e que suporte por longo período o ambiente e condições onde será usado, porém a fabricação do produto com este material pode ser inviável economicamente e o engenheiro provavelmente perderá seu emprego apesar da sua boa solução técnica. Como exemplo pode ser citada a proposta de utilização do semicondutor de arsenato de gálio (GaAs) ao invés de silício Si para a produção de circuitos integrados, embora o GaAs apresentasse algumas propriedades superiores, mas até o momento, a escolha não se sustentou para a maioria das aplicações devido a fatores econômicos e tecnológicos.

O estudo de materiais envolve, então, a investigação da relação que existe entre a estrutura, as propriedades, o processamento e as aplicações dos materiais. A estrutura de um material está geralmente relacionada ao arranjo de seus componentes internos. A estrutura subatômica envolve elétrons no interior dos átomos individuais e as interações com seus núcleos. No nível atômico, a estrutura engloba a organização dos átomos ou moléculas em relação uns aos outros. O próximo universo estrutural de maior dimensão, que contém grandes grupos de átomos normalmente conglomerados, é chamado de "microscópio", significando aquele que está sujeito a observação direta usando algum tipo de microscópio. Finalmente, os elementos estruturais que podem ser vistos a olho nu são chamados de "macroscópico".

A noção de "propriedade" merece elaboração. Enquanto em uso, todos os materiais estão expostos a estímulos externos que provocam algum tipo de resposta. Por exemplo, uma amostra sujeita a forças irá experimentar uma deformação; ou uma superfície metálica polida irá refletir a luz. Propriedade é uma peculiaridade do material em termos do tipo e da intensidade da resposta a um estímulo específico que lhe é imposto. Geralmente, as definições das propriedades são feitas de maneira independente da forma e do tamanho do material.

Virtualmente, todas as propriedades importantes dos materiais sólidos podem ser agrupadas em seis categorias diferentes: mecânica, elétrica, térmica, magnética, óptica e deteriorativa. Para cada uma existe um tipo característico de estímulo capaz de provocar diferentes respostas. As propriedades mecânicas relacionam deformação com uma carga ou força aplicada; são exemplos o módulo de elasticidade e a resistência. Para as propriedades elétricas, como a condutividade elétrica e a constante dielétrica, o estímulo é um campo elétrico. O comportamento térmico de sólidos pode ser representado em termos da capacidade calorífica e da condutividade térmica. As propriedades magnéticas demonstram a resposta de um material à aplicação de um campo magnético. Para as propriedades ópticas, o estímulo é a radiação eletromagnética ou a luminosa; o índice de refração e a refletividade são propriedades ópticas representativas. Finalmente, as características

deteriorativas indicam a reatividade química dos materiais à agressividade do meio onde será utilizado o produto.

A estrutura interna dos materiais envolve não apenas o tipo de átomos da sua constituição (composição), mas também como eles se associam entre si (formando cristais, moléculas ou microestruturas). A estrutura de um material irá depender da maneira como ele é processado. Como exemplo, tem-se que:

- a molécula básica  $C_2H_4$  (etileno) constitui um gás à temperatura ambiente;
- a polimerização em cadeia de 13 das mesmas moléculas básicas forma uma cera (sólido mole que se funde a  $55\text{ }^\circ\text{C}$ );
- a polimerização de milhares das mesmas moléculas básicas resulta em um plástico chamado polietileno (sólido flexível).

Qualquer ação que cause uma modificação da estrutura interna do material afetará suas propriedades. O processamento, são as ações podem ocorrer tanto durante o processamento, como parte deste, bem como durante o uso do produto (material), por esforços e/ou condições ambientais. Como exemplos; temos:

- um fio elétrico é fortalecido por processo de trefilamento (afinamento por estiramento);
- processamentos térmicos dos materiais (recozimentos, resfriamentos bruscos)
- borracha e plásticos expostos a luz e ao ar por longo tempo sofre um endurecimento (ver exemplo dado acima);
- metal rompe por fadiga sob esforço mecânico cíclico;
- um ímã perde sua polaridade magnética sob ação prolongada de um campo elétrico tipo r.f. (rádio requência);
- um semiconductor sofre danos (rompimentos de ligações químicas) quando exposto a radiação tipo nuclear ou espacial;
- uma trilha de interconexão elétrica pode sofrer um rompimento sob a ação prolongada de uma corrente elétrica de alta densidade (processo chamado de eletromigração).

## 1.5 Classificação dos materiais

Os materiais sólidos têm sido convenientemente agrupados em três classificações básicas: metais, cerâmicos e polímeros. Esse esquema está baseado principalmente na composição química e na estrutura atômica, e a maioria dos materiais se encaixa em um ou outro grupamento distinto, embora existam alguns materiais intermediários. Adicionalmente, existem três outros grupos de materiais importantes na engenharia – compósito, semicondutores e biomateriais. Os compósitos consistem em combinações de dois ou mais materiais diferentes, enquanto os semicondutores são utilizados devido às suas características elétricas peculiares; os biomateriais são implantados no interior do corpo humano. Uma explicação sucinta dos tipos de materiais e suas características representativas é apresentada a seguir.

### 1.5.1 Metais

Materiais metálicos são normalmente combinações de elementos químicos metálicos. Eles possuem um número grande de elétrons não-localizados, isto é,

estes elétrons não estão ligados a qualquer átomo em particular. Muitas propriedades dos metais são atribuídas diretamente a estes elétrons. Os metais são extremamente bons condutores de eletricidade e calor (pela boa mobilidade dos seus elétrons), são opacos à luz visível (os elétrons absorvem a energia dos fótons de luz) e uma superfície metálica polida possui uma aparência lustrosa. Além disso, os metais são muito resistentes e ainda assim deformáveis, o que é responsável pelo seu extenso uso em aplicações estruturais.

### 1.5.2 Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são compostos por elementos químicos metálicos e não-metálicos, como por exemplo, óxidos, nitretos e carbetos. A grande variedade de materiais que se enquadra nesta classificação inclui cerâmicos que são compostos por minerais argilosos, cimento e vidro. Estes materiais são tipicamente isolantes à passagem de eletricidade e calor (não possuem elétrons livres para condução), apresentam boa resistência a altas temperaturas e a ambientes adversos (alta estabilidade química) e abrasivos – são mais resistentes do que os metais e polímeros. Com relação ao comportamento mecânico, os cerâmicos são duros, porém muito quebradiços.

### 1.5.3 Polímeros

Muitos polímeros são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, no hidrogênio e outros elementos não-metálicos. Possuem estruturas moleculares muito grandes. Estes materiais possuem tipicamente baixas densidades e podem ser extremamente flexíveis. Os polímeros compreendem os materiais comuns de plástico, borracha, teflon, etc. A Tabela 1.1 mostra o consumo de plásticos em diversas localidades.

<b>Região</b>	<b>Total (milhões de toneladas)</b>	<b>Por habitante (kg)</b>
Europa Ocidental	22	63
Estados Unidos	21	89
Canadá	2	80
Japão	7	58
Índia	1	1,3
América do Sul	1	2
África do Sul	,7	21
Ex-URSS	7	17,5

**Tabela 1.1** - Consumo de plásticos em diversos países e regiões.

### 1.5.4 Semicondutores

Os semicondutores possuem propriedades elétricas que são intermediárias entre aquelas apresentadas pelos condutores elétricos e pelos isolantes. São compostos por materiais específicos e similares aos de cerâmicas. Além disso, as características elétricas destes materiais são extremamente sensíveis à presença de minúsculas concentrações de átomos de impurezas, concentrações que podem ser controladas ao longo de regiões espaciais muito pequenas. Os semicondutores tomaram possível o advento dos dispositivos e circuitos integrados eletrônicos, que



biomateriais. Como exemplos clássicos, temos a obturação e próteses dentárias. Muitos outros exemplos existem e novos vem sendo desenvolvidos para a medicina, veterinária e mesmo para biologia de forma geral.

## 1.6 Materiais avançados

Os materiais utilizados em aplicações de alta tecnologia (ou high-tech) são algumas vezes chamados de materiais avançados. Por alta tecnologia queremos dizer um dispositivo ou produto que opera ou funciona utilizando princípios relativamente intrincados e sofisticados. São exemplos os equipamentos eletrônicos (videocassetes, aparelhos de CD, etc.), computadores, sistemas de fibra ótica, espaçonaves, aeronaves e foguetes militares. Estes materiais avançados são tipicamente materiais tradicionais cujas propriedades foram aprimoradas, ou então, materiais de alto desempenho recentemente desenvolvidos. Além disso, eles podem ser de todos os tipos de materiais (por exemplo, metais, cerâmicos, polímeros), e em geral são relativamente caros. Dentre os inúmeros exemplos de materiais avançados e suas aplicações podemos citar os materiais usados em lasers, circuitos integrados, armazenamento magnético de informações, mostradores de cristal líquido (LCDS), fibras óticas, e o sistema de proteção térmica do ônibus espacial (Space Shuttle Orbiter).

Apesar de todo progresso atingido, sobretudo durante o século 20, nos conhecimentos da ciência básica dos materiais e no desenvolvimento de materiais, continua havendo demanda e desafios para obtenção de novos materiais. Como exemplos de demanda, temos:

- novos materiais para gerar e armazenar energia (solar, nuclear, etc.). O uso de fontes renováveis, que não produzam poluição ambiental e sejam de baixo custo, são os requisitos. A energia solar é uma excelente alternativa quanto aos dois primeiros quesitos, porém a redução do custo ainda necessita avançar mais;
- materiais que utilizem fontes renováveis e/ou gerem menos poluição ambiental (plásticos biodegradáveis, etc.);
- materiais mais eficientes para transporte, sendo mais leves e resistentes e motores que suportem temperaturas mais altas para aumentar a eficiência energética da queima do combustível;
- materiais inteligentes, ou seja, materiais que mudem suas propriedades de acordo com a condição de uso. Por exemplo, um vidro que reduza sua transparência, conforme a intensidade da luz incidente;
- materiais para fabricação de circuitos integrados mais potentes, com mais funções, mais rápidos, de menor consumo de potência e mais baratos;
- materiais para comporem os novos meios de comunicação de dados, as chamadas infovias;
- por fim, não podemos deixar de mencionar os fulerenos e nanotubos de carbono. Os quais são arranjos constituídos por anéis de carbono. As propriedades destas macromoléculas podem ser alteradas e controladas, oferecendo espaço para o desenvolvimento de novos dispositivos e funções, inclusive eletrônicas.

## 1.7 Necessidades dos materiais modernos

Apesar do tremendo progresso que tem sido feito ao longo dos últimos anos na disciplina da Ciência e Engenharia dos Materiais ainda existem desafios tecnológicos, incluindo o desenvolvimento de materiais ainda mais sofisticados e especializados, bem como considerações em relação ao impacto ambiental da produção dos materiais. É apropriado algum comentário em relação a estas questões de forma a tomar mais clara esta perspectiva.

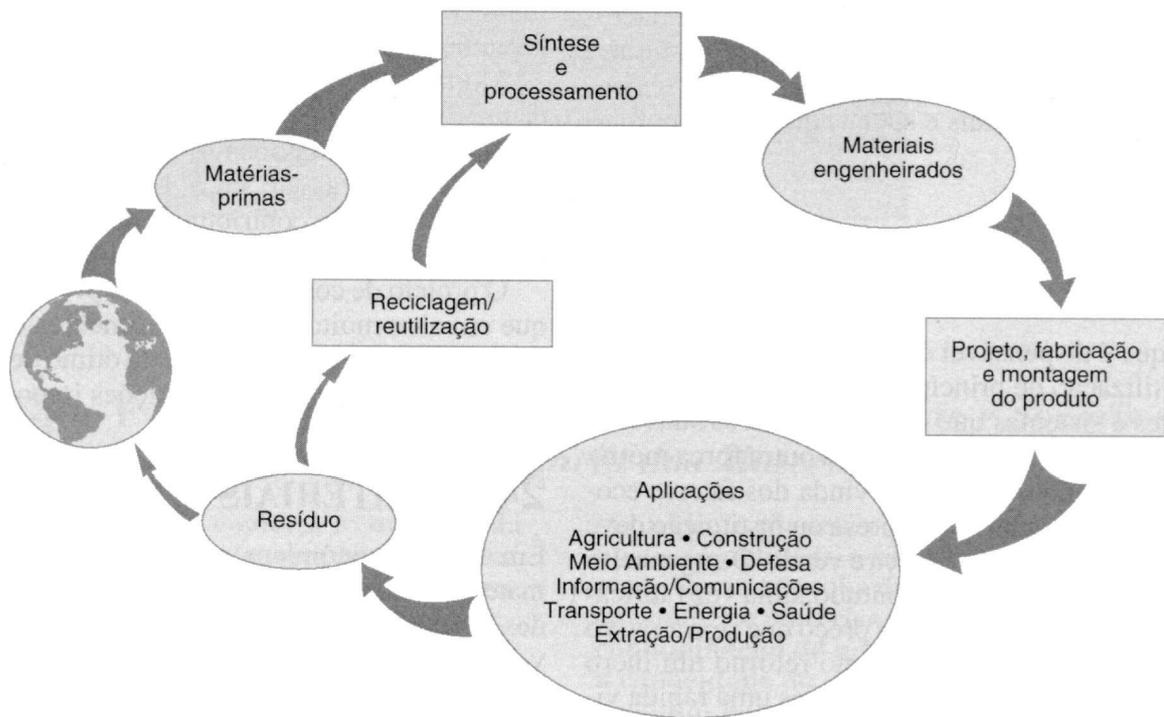
A energia nuclear guarda alguma promessa, porém as soluções de muitos problemas que ainda persistem irão necessariamente envolver materiais, dos combustíveis às estruturas de contenção, até as instalações para disposição dos rejeitos radioativos.

Quantidades significativas de energia estão envolvidas na área de transportes. A redução no peso dos veículos de transporte (automóveis, aeronaves, trens etc.), bem como o aumento das temperaturas de operação dos motores, irá melhorar a eficiência dos combustíveis. Novos materiais estruturais de alta resistência e baixa densidade ainda precisam ser desenvolvidos, assim como materiais com recursos para trabalhar em temperaturas mais elevadas, para uso em componentes de motores.

Além disso, existe uma necessidade reconhecida de encontrar fontes de energia novas e econômicas, além de usar as fontes de energia atuais de maneira mais eficiente. Os materiais irão, sem dúvida alguma, desempenhar papel significativo nestes desenvolvimentos. Por exemplo, a conversão direta de energia solar em energia elétrica foi demonstrada. As células solares empregam alguns materiais de certa forma complexos e caros. Para assegurar uma tecnologia que seja viável, devem ser desenvolvidos materiais que sejam altamente eficientes nestes processos de conversão, porém mais baratos.

Ademais, a qualidade do meio ambiente depende da nossa habilidade de controlar a poluição do ar e da água. As técnicas de controle da poluição empregam vários materiais. Adicionalmente, o processamento de materiais e os métodos de refinamento precisam ser aprimorados para que produzam menor degradação do meio ambiente, isto é, menos poluição e menor destruição da paisagem devido à mineração de matérias-primas. Também, em alguns processos de fabricação de materiais, são produzidas substâncias tóxicas, e o impacto ecológico da eliminação dessas substâncias deve ser considerado.

Muitos materiais que usamos são derivados de recursos não-renováveis, isto é, recursos impossíveis de serem regenerados. Nestes incluem-se os polímeros, para os quais a matéria-prima principal é o petróleo e alguns metais. Estes recursos não-renováveis estão se tornando gradualmente escassos, o que exige: 1) a descoberta de reservas adicionais, 2) o desenvolvimento de novos materiais que possuam propriedades comparáveis, porém apresentem impacto ambiental menos adverso, e/ou 3) maiores esforços de reciclagem e o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem. Como consequência dos aspectos econômicos não somente da produção, mas também do impacto ambiental e de fatores ecológicos, está se tornando cada vez mais importante considerar o ciclo de vida "desde o berço até o túmulo" dos materiais em relação ao processo global de fabricação.



**Figura 1.5** - Representação esquemática do ciclo total dos materiais.

### 1.8 Referências bibliográficas do capítulo

CALLISTER JR., W. D. **Materials science and engineering**: an introduction. 4. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1997.

Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/ead.html>>.

SCHACKELFORD, J. F. **Ciencia de materiales para ingenieros**. PPH, 1995.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. São Paulo: E. Blücher, 1998.

### Exercícios

1. Historicamente, tem-se associado a habilidade de manipulação de materiais dos povos primitivos com sua idade ou evolução. Se pudessemos fazer o mesmo para a sociedade atual, poderíamos chamá-la de idade do Si? Justifique.
2. Defina materiais.
3. Por que o engenheiro electricista deve conhecer materiais?
4. O que significa a estrutura interna do material e por que devemos conhecê-la?
5. Classifique os materiais.

6. Cite exemplos de novos materiais necessários nos dias atuais.
7. Defina a área de conhecimento de um engenheiro de materiais.
8. De quantas ordens de grandeza pode variar a condutividade de materiais, sem considerar os materiais supercondutores.

## PHYSICAL CONSTANTS, CONVERSIONS, AND USEFUL COMBINATIONS

### *Physical Constants*

Avogadro constant	$N_A = 6.022 \times 10^{23}$ particles/mole
Boltzmann constant	$k = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/K = $1.38 \times 10^{-23}$ J/K
Elementary charge	$e = 1.602 \times 10^{-19}$ coulomb
Planck constant	$h = 4.136 \times 10^{-15}$ eV · s = $6.626 \times 10^{-34}$ joule · s
Speed of light	$c = 2.998 \times 10^{10}$ cm/s
Permittivity (free space)	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ farad/cm
Electron mass	$m = 9.1095 \times 10^{-31}$ kg
Coulomb constant	$k_c = 8.988 \times 10^9$ newton-m <sup>2</sup> /(coulomb) <sup>2</sup>
Atomic mass unit	$u = 1.6606 \times 10^{-27}$ kg

### *Useful Combinations*

Thermal energy (300 K)	$kT = 0.0258$ eV $\approx 1$ eV/40
Photon energy	$E = 1.24$ eV at $\lambda = \mu\text{m}$
Coulomb constant	$k_c e^2 = 1.44$ eV · nm
Permittivity (Si)	$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = 1.05 \times 10^{-12}$ farad/cm
Permittivity (free space)	$\epsilon_0 = 55.3$ eV/V · $\mu\text{m}$

### *Prefixes*

k = kilo =  $10^3$ ; M = mega =  $10^6$ ; G = giga =  $10^9$ ; T = tera =  $10^{12}$   
 m = milli =  $10^{-3}$ ;  $\mu$  = micro =  $10^{-6}$ ; n = nano =  $10^{-9}$ ; p = pica =  $10^{-12}$

### *Symbols for Units*

Ampere (A), Coulomb (C), Farad (F), Gram (g), Joule (J), Kelvin (K)  
 Meter (m), Newton (N), Ohm ( $\Omega$ ), Second (s), Siemen (S), Tesla (T)  
 Volt (V), Watt (W), Weber (Wb)

### *Conversions*

1 nm =  $10^{-9}$  m =  $10 \text{ \AA}$  =  $10^{-7}$  cm; 1 eV =  $1.602 \times 10^{-19}$  Joule =  $1.602 \times 10^{-12}$  erg;  
 1 eV/particle = 23.06 kcal/mol; 1 newton = 0.102 kg<sub>force</sub>;  
 $10^6$  newton/m<sup>2</sup> = 146 psi =  $10^7$  dyn/cm<sup>2</sup>; 1  $\mu\text{m}$  =  $10^{-4}$  cm 0.001 inch = 1 mil = 25.4  $\mu\text{m}$ ;  
 1 bar =  $10^6$  dyn/cm<sup>2</sup> =  $10^5$  N/m<sup>2</sup>; 1 weber/m<sup>2</sup> =  $10^4$  gauss = 1 tesla;  
 1 pascal = 1 N/m<sup>2</sup> =  $7.5 \times 10^{-3}$  torr; 1 erg =  $10^{-7}$  joule = 1 dyn-cm

---