

LAWRENCE H.
VAN VLACK

**PRINCÍPIOS DE
CIÊNCIA DOS MATERIAIS**



Blucher

LAWRENCE H.
VAN VLACK

**PRINCÍPIOS DE
CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

Blucher

LAWRENCE H.
VAN VLACK

PRINCÍPIOS DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS

LAWRENCE H. VAN VLACK

Departamento de Engenharia Química e Metalúrgica
Universidade de Michigan

traduzido pelo

ENG. LUIZ PAULO CAMARGO FERRAO

Departamento de Engenharia Química
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Elements of Materials Science

Copyright ©1964, by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

A edição em língua inglesa foi publicada pela ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC.

Princípios de ciência dos materiais

© 1970, Editora Edgard Blücher Ltda.

20ª reimpressão – 2014

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-012 – São Paulo – SP – Brasil

Tel 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Van Vlack, Lawrence Hall

C378p Princípios de ciência dos materiais / Lawrence Hall Van Vlack; traduzido pelo Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão – São Paulo: Blucher, 1970.

Bibliografia.

ISBN 978-85-212-0121-2

1. Materiais I. Título.

73-505

CDD-620.112
- 620.1

Índices para catálogo sistemático:

1. Ciência dos materiais: Engenharia 620.112

Prefácio

Antes de ter sido publicada a primeira edição deste texto, a matéria ensinada nos cursos de Materiais de Construção sofreu profundas alterações. As apresentações empíricas e as descrições dos materiais e de suas propriedades deram lugar à apresentação e análises mais sistemáticas. Uma ciência dos materiais, baseada na física e química das estruturas internas, estava se desenvolvendo. A primeira edição deste livro de texto tentou apresentar aos estudantes de engenharia os princípios básicos desta nova ciência, de uma forma introdutória. Embora se possa dizer que este objetivo tenha sido completamente atingido, seu uso nas salas de aula mostrou algumas modificações, adições e supressões desejáveis. Além disso, recentes avanços na ciência dos materiais não podem passar despercebidos. Os fatores acima levaram a uma revisão que constitui este "*Elements of Materials Science*".

Antes de tentar uma revisão, o autor discutiu, com muitos outros engenheiros e professores de engenharia, a melhor forma de ensinar a Ciência dos Materiais. Deveria haver um curso geral para todos os engenheiros ou um curso especial para cada currículo de engenharia? Estas discussões, reforçadas pela experiência do autor no ensino, levaram à conclusão de que um curso geral sobre materiais é vantajoso em muitas escolas e departamentos. Como o curso é analítico, os mesmos argumentos usados a favor de cursos gerais para introdução de física e química podem ser usados a favor de um curso de introdução sobre materiais. Ninguém sugere que engenheiros mecânicos eletricitistas ou de outros tipos necessitam de cursos separados e distintos de química e física. A mesma conclusão, aplicada a um curso geral sobre materiais, tem uma exceção lógica: se um certo currículo necessita de outras ciências básicas como físico-química ou física moderna, pode ser desejável ter-se um curso de materiais especialmente adequado, a fim de aproveitar esta base maior.

A segunda edição deste texto, tal como a primeira, está dirigida especificamente aos alunos de cursos de engenharia que tiveram química geral e que estejam tendo, concomitantemente, física geral. Embora não apresenta o rigor encontrado nos cursos de física do estado sólido, este texto tenta ser sistemático.

O Cap. 1, aqui tal como na edição anterior, é uma introdução destinada a orientar o leitor no estudo dessa ciência de engenharia e a familiarizá-lo com a terminologia aplicável às propriedades dos materiais. Os capítulos que se seguem são concernentes à estrutura interna dos materiais e à dependência de suas propriedades com as várias estruturas. A seqüência dada vai das estruturas atômicas para as estruturas grosseiras, do simples para o mais complexo. Esta seqüência — de átomos para cristais, para fases, para microestruturas e finalmente para macroestruturas — é lógica tanto cientificamente como pedagógicamente, pois as estruturas e propriedades mais grosseiras dependem das características estruturais mais finas.

Tem-se material nôvo na área anteriormente negligenciada das imperfeições estruturais e movimentos atômicos e dois importantes rearranjos no texto: (a) O comportamento elétrico é introduzido mais cedo nesta edição que na primeira, o que permite a consideração de propriedades elétricas simultaneamente com as mecânicas nos Caps. 6, 7, 8, nos quais são discutidos os metais, polímeros e materiais cerâmicos, respectivamente. (b) O comportamento em serviço, que ocupava os últimos cinco capítulos da primeira edição, foi consolidado com parte do material coberto em um capítulo sôbre a estabilidade dos materiais em serviço. A parte restante da discussão sôbre o comportamento em serviço foi incluída nas seções precedentes sôbre propriedades dos materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos. Estas modificações permitem uma apresentação mais lógica e eficiente.

Os problemas que servem como exemplos e aquêles colocados no fim dos capítulos foram revistos e os menos pertinentes foram abandonados em favor de novos.

Todas estas alterações se originaram no resultado do desenvolvimento nas salas de aula pelo autor e seus associados.

Tendo em mente que um livro de texto como êste deve satisfazer às necessidades de escolas variadas, o autor tentou superar um problema majoritário com que freqüentemente se defronta o professor: uma limitação de tempo que torna necessário o abandono de certos tópicos. O autor indicou aquêles tópicos, exemplos e problemas que podem ou não ser considerados, a critério do instrutor. Os alunos que não estudarem o material opcional não terão dificuldades nas seções que se seguem. *Aquelas seções e subseções assinaladas por um ponto (.) contêm material que não é pré-requisito para as seções posteriores não assinaladas.* (Entretanto, êste material pode ser necessário para outras seções opcionais). Portanto, os instrutores têm elementos para ajustar o tempo de acôrdo com as necessidades. As seções assinaladas contêm (a) ilustrações de interêsse em engenharia (como as junções $p - n$), (b) certos tópicos novos ou mais avançados que não eram encontrados na primeira edição (por exemplo, a relação entre os coeficientes de difusão e a temperatura) e (c) tópicos incluídos na primeira edição, mas dispensáveis em um curso com tempo limitado (por exemplo, processos de grafitação).

Um livro como êste não pode ser projeto de um único homem. Embora seja impossível agradecer, individualmente, a ajuda dos colegas de Universidade e dos grande número de estudantes que contribuíram, a seu modo, para êste livro, o autor deseja agora expressar sua gratidão a todos êles, assim como àqueles colegas de outras instituições, os quais ofereceram seus comentários, sugestões e correções à primeira edição. Na revisão dêste texto, cada uma destas sugestões foi considerada. Devem ser dirigidos agradecimentos específicos ao Professor W. C. Bigelow (Universidade de Michigan) e ao Professor Morris Cohen (“Massachusetts Institute of Technology”) que trabalharam em estreita colaboração com o autor. A ajuda de Miss Dolores Gillies em Ann Arbor e do pessoal da Addison-Wesley em Reading foi também inestimável.

Prefácio da Edição Brasileira

“O campo de ciência dos materiais vem se desenvolvendo rapidamente devido ao reconhecimento de que princípios científicos idênticos se aplicam às propriedades dos metais, dos materiais inorgânicos não-metálicos e dos materiais orgânicos. No passado, tecnologias individuais foram desenvolvidas para materiais diferentes, porque êsses princípios amplos e sua aplicabilidade geral não havia sido reconhecida. Recentemente, desenvolvimentos em metalurgia, cerâmica, física e química tornaram possível estabelecer uma tentativa para os fundamentos gerais da ciência dos materiais, transcendendo os detalhes da tecnologia corrente nesses campos. Em particular, o notável sucesso que a metalurgia tem tido, correlacionando as propriedades dos metais e ligas com as respectivas propriedades estruturais, levou à adoção dessa metodologia para materiais cerâmicos, semicondutores, materiais plásticos e outros tipos de materiais polimerizados”. (*Publicação do Departamento de Metalurgia e Ciência dos Materiais do “Massachusetts Institute of Technology”, 1961*).

Dada a natureza interdisciplinar do assunto e a origem norte-americana do livro, foram usadas, como base para a tradução para nossa língua, além da consulta a especialistas, as seguintes obras:

James L. Taylor – “English-Portuguese Metallurgical Dictionary”, Institute of Hispanic American and Luso-Brazilian Studies, Stanford University, Califórnia, 1963.

Werner Gustav Krauledat – “Notação e Nomenclatura de Química Inorgânica”, Campanha de Aperfeiçoamento e Difusão do Ensino Secundário, Ministério de Educação e Cultura, 1960.

Instituto Nacional de Pesos e Medidas – Quadro de Unidades Legais no Brasil – Decreto n.º 52.423 de 30 de agosto de 1963, Rio de Janeiro, 1964.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. – Terminologia de Material Refratário – TB-4. Glossário de Termos da Indústria de Refratários – TB-13.

É nossa intenção, ao apresentar a edição brasileira da obra de Van Vlack sobre Ciência dos Materiais, já conhecida e utilizada entre nós há vários anos, tornar clara a necessidade

da existência de livros, em língua portuguesa, que forneçam aos estudantes das Universidades Brasileiras o conhecimento moderno para os estudos fundamentais de materiais. Visamos, assim, uma posterior aplicação na utilização prática de materiais de construção em engenharia civil, mecânica, metalúrgica, química, naval, aeronáutica, de minas, de eletricidade, eletrônica e outras a qual é fundamental ao desenvolvimento tecnológico brasileiro.

Persio de Souza Santos

*Professor Titular, Dept.º de Eng. Química
da EPUSP e Chefe da Seção de Cerâmica
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo*

Índice

1 – <i>Características exigidas nos materiais usados em engenharia</i>	
1-1 Introdução	1
1-2 Propriedades mecânicas	2
1-3 Propriedades térmicas	7
1-4 Propriedades elétricas	9
1-5 Propriedades químicas	11
1-6 Propriedades ópticas	11
1-7 Custo	11
1-8 Medida das propriedades de interesse em engenharia	11
2 – <i>Ligação química</i>	
A ESTRUTURA DOS ÁTOMOS	
2-1 Introdução	18
2-2 Nêutrons, prótons e elétrons	18
2-3 Massa atômica e número atômico	20
2-4 ^o Números quânticos	20
2-5 ^o Notação eletrônica	22
ATRAÇÕES INTERATÔMICAS	
2-6 Introdução	25
2-7 Ligação iônica	25
2-8 Ligação covalente	26
2- ^o Ligação metálica	30
0 Combinação dos vários tipos de ligação	31
11 Forças de Van der Waals	32

^o Tópicos opcionais.

COORDENAÇÃO ATÔMICA

2-12 Introdução	34
2-13 Distâncias interatômicas	34
2-14 Raio atômico e iônico	36
2-15 Número de coordenação	37

SUMÁRIO

2-16 Generalizações relativas às propriedades	41
2-17 Tipos de materiais	42

3 - Arranjos atômicos

ESTRUTURAS MOLECULARES

3-1 Introdução	45
3-2 Número de ligações	46
3-3 Comprimentos e energias de ligação	48
3-4 Ângulos entre ligações	48
3-5 Isômeros	48
3-6 Hidrocarbonetos saturados	49
3-7 Hidrocarbonetos insaturados	50
3-8 Moléculas poliméricas	50

ESTRUTURA CRISTALINA

3-9 Cristalinidade	51
3-10 Sistemas cristalinos	53
3-11 Cristais cúbicos	54
3-12 Cristais hexagonais	58
3-13 Outros retículos cristalinos	59
3-14 Direções no cristal	61
3-15 Planos cristalinos	62
3-16 ° Análises por raios X	66
3-17 Seqüências de empilhamento	69
3-18 Polimorfismo (Alotropia)	69
3-19 Cristais moleculares	71

ESTRUTURAS NÃO CRISTALINAS (AMORFAS)

3-20 Introdução	71
3-21 Gases	72
3-22 Líquidos	72
3-23 Vidros	73

FASES

3-24 Fases cristalinas e amorfas	74
--	----

4 - Imperfeições estruturais e movimentos atômicos

4-1 Introdução	79
----------------------	----

FASES IMPURAS

4-2	Soluções	79
4-3	Soluções sólidas em metais	80
4-4	Soluções sólidas em compostos iônicos	84
4-5	Co-polimerização	85

IMPERFEIÇÕES CRISTALINAS

4-6	Introdução	85
4-7	Defeitos pontuais	86
4-8	Defeitos de linha (Discordâncias)	88
4-9	Fronteiras	90

MOVIMENTOS ATÔMICOS

4-10	Introdução	92
4-11	Mecanismos de movimentos atômicos	94
4-12	° Distribuição de energia térmica	95
4-13	Difusão atômica	97
4-14	Coefficientes de difusão	98

5 – Estruturas e processos eletrônicos

5-1	Introdução	105
-----	------------------	-----

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

5-2	Definições	105
5-3	Condutividade iônica	106
5-4	Condutividade eletrônica	107
5-5	Isolantes	109
5-6	Semicondutores	109
5-7	Resistividade eletrônica “Versus” temperatura	113

ENERGIAS ELETRÔNICAS

5-8	Introdução	113
5-9	Bandas de energia	114

COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

5-10	Introdução	118
5-11	Ferromagnetismo	119
5-12	Campos magnéticos alternados	121
5-13	° Supercondutividade	123

COMPORTAMENTO ÓPTICO

5-14	Opacidade e transparência	124
5-15	° Luminescência	125

6 – Fases metálicas e suas propriedades

6-1	Introdução	130
-----	------------------	-----

METAIS MONOFÁSICOS

6-2	Ligas monofásicas	130
6-3	Microestruturas	131

DEFORMAÇÃO DOS METAIS

6-4	Deformação elástica dos metais.....	135
6-5	Deformação plástica de cristais metálicos	138
6-6	Deformação plástica nos metais policristalinos	145
6-7	Propriedades dos metais deformados plásticamente	146
6-8	Recristalização	147

RUPTURA DOS METAIS

6-9	Introdução	152
6-10	Fluência (“creep”)	153
6-11	Fratura	155
6-12	Fadiga	157

7 – Materiais orgânicos e suas propriedades

7-1	Introdução	164
7-2	Massas moleculares	164

MECANISMOS DE POLIMERIZAÇÃO

7-3	Introdução	167
7-4	Polimerização por adição	168
7-5	Polimerização por condensação	172
7-6	Degradação ou despolimerização	174

ESTRUTURA DOS POLÍMEROS

7-7	Introdução	175
7-8	Forma das moléculas poliméricas	175
7-9	Estéreo-isomeria	177
7-10	Cristalização	179
7-11	Ligações cruzadas	179
7-12	Ramificação	181

DEFORMAÇÃO DOS POLÍMEROS

7-13	Deformação elástica de polímeros.....	182
7-14	Deformação plástica de polímeros.....	185

COMPORTAMENTO DOS POLÍMEROS

7-15	Comportamento térmico	185
7-16	Comportamento mecânico	186
7-17	Propriedades elétricas dos materiais orgânicos	189
7-18	Reações químicas de materiais orgânicos.....	191

8 – Fases cerâmicas e suas propriedades

8-1	Introdução	199
-----	------------------	-----

FASES CERÂMICAS

8-2	Exemplos de materiais cerâmicos	199
8-3	Comparação entre as fases cerâmicas e não-cerâmicas.....	200

ESTRUTURA CRISTALINA DAS FASES CERÂMICAS

8-4	Introdução	201
8-5	Compostos de empacotamento fechado	201
8-6	◦ Estrutura dos silicatos	206

EFEITO DA ESTRUTURA NO COMPORTAMENTO DAS FASES CERÂMICAS

8-7	Introdução	215
8-8	Materiais cerâmicos dielétricos	216
8-9	◦ Semicondutores cerâmicos	219
8-10	Materiais cerâmicos magnéticos	220
8-11	Comportamento mecânico dos materiais cerâmicos	221

9 – Materiais polifásicos relações de equilíbrio

9-1	Introdução	229
-----	------------------	-----

RELAÇÕES QUALITATIVAS DE FASE

9-2	Soluções <i>versus</i> misturas heterogêneas	229
9-3	Solubilidade.....	230
9-4	Diagrama de fases	232
9-5	Faixas de solidificação	234
9-6	Equilíbrio.....	234

RELAÇÕES QUANTITATIVAS DE FASES

9-7	Composições de fase.....	235
9-8	Quantidades relativas de fases	237
9-9	Equilíbrio	239

LIGAS FERRO-CARBONO

9-10	Introdução	241
9-11	O diagrama de fases Fe-C	242
9-12	Perlita	245
9-13	Nomenclatura dos aços	250

DIAGRAMA DE FASES PARA SISTEMAS COM MAIS DE DOIS COMPONENTES

9-14	◦ Diagramas ternários	251
9-15	◦ Regra das fases	252

10 – Reações no estado sólido

10-1	Introdução	269
------	------------------	-----

REAÇÕES NO ESTADO SÓLIDO

10-2	Transformações polimórficas	269
10-3	Reações eutetóides	270
10-4	Solubilização e precipitação em sólidos	271

VELOCIDADE DE REAÇÃO

10-5	Introdução	272
10-6	Efeito da temperatura na velocidade de reação	272
10-7	Transformação isoférmica	279
10-8	Contrôle das velocidades de reação	281

FASES METASTAVEIS

10-9	Introdução	282
10-10	Martensita. Uma fase de transição	282
10-11	Martensita revenida	286

11 – Modificações de propriedades através de alterações na microestrutura

11-1	Introdução	291
11-2	Microestruturas polifásicas	291

PROPRIEDADES “VERSUS” MICROESTRUTURAS

11-3	Propriedades aditivas	293
11-4	Propriedades interativas	296

CONTRÔLE DE MICROESTRUTURAS

11-5	Introdução	300
11-6	Tratamentos de recozimento	301
11-7	Tratamentos de precipitação (ou envelhecimento)	301
11-8	Processos de transformação isotérmica	307
11-9	Tratamento de têmpera e revenido	309
11-10	Endurecibilidade	311
11-11	◦ Processos de grafitação	317

12 – Estabilidade dos materiais nas condições de serviço

12-1	Estabilidade em serviço	325
------	-------------------------------	-----

CORROSÃO

12-2	Introdução	325
12-3	Corrosão por dissolução	325
12-4	Oxidação eletroquímica	326
12-5	Potencial de eletrodo	327
12-6	Células galvânicas	329
12-7	Tipos de células galvânicas	333
12-8	Sumário do mecanismo de corrosão galvânica	338
12-9	Prevenção da corrosão	339
12-10	Camadas protetoras	339
12-11	Meios de evitar a formação de pares galvânicos	342
12-12	Proteção galvânica	345

OXIDAÇÃO

12-13	Introdução	345
12-14	Envelhecimento da borracha	345
12-15	Oxidação de metais	346

ESTABILIDADE TÉRMICA

12-16	Introdução	348
12-17	Dilatação térmica e tensões internas	348
12-18	° Ruptura térmica	351

ALTERAÇÕES PELAS RADIAÇÕES (“RADIATION DAMAGE”)

12-19	Introdução	353
12-20	Alteração estrutural	353
12-21	Alterações de propriedades	358

13 – *Materiais compostos*

13-1	Macroestruturas	364
------	-----------------------	-----

MATERIAIS AGLOMERADOS

13-2	Introdução	364
13-3	Tamanho de partícula	367
13-4	Propriedades relacionadas com volume aparente	368
13-5	Concreto	370
13-6	Produtos sinterizados	372

MODIFICAÇÕES DA SUPERFÍCIE

13-7	Endurecimento superficial	376
13-8	Superfícies compressivas	378
13-9	° Revestimentos de proteção	378
13-10	Superfícies para fins elétricos	378

MATERIAIS REFORÇADOS

13-11 Materiais reforçados por dispersão	379
13-12 Reforçamento por fibras	380
13-13 Conclusão	380
Apêndice A. Constantes selecionados	384
Apêndice B. Glossário de termos aplicados a materiais	385
Apêndice C. Comparação entre as escalas de dureza	397
Apêndice D. Tabela de elementos	398
Apêndice E. Propriedades de alguns materiais usados em engenharia	404
Apêndice F. Estruturas orgânicas de interesse em engenharia	407
Apêndice G. Lista de plásticos de interesse em engenharia	413

CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS NOS MATERIAIS USADOS EM ENGENHARIA

1-1 INTRODUÇÃO. Todo engenheiro-mecânico, civil, eletricitista ou de outra especialidade — está vitalmente interessado nos materiais que lhe são disponíveis. Quer seu produto seja uma ponte, um computador, um veículo espacial ou um automóvel, deve ter um profundo conhecimento das propriedades características e do comportamento dos materiais que vai usar. Considere-se, por exemplo, a variedade de materiais usados na manufatura de um automóvel: ferro, aço, vidro, plásticos, borracha, apenas para citar alguns. E, somente para o aço, há cerca de 2000 tipos ou modificações. Com que critério é feita a escolha do material adequado para uma determinada peça?

Ao fazer a sua escolha, o engenheiro deve levar em conta propriedades tais como resistência mecânica, condutividade elétrica e/ou térmica, densidade e outras. Além disso, deve considerar o comportamento do material durante o processamento e o uso, onde plasticidade, usinabilidade, estabilidade elétrica, durabilidade química, comportamento irradiante são importantes, assim como, custo e disponibilidade. Por exemplo (Fig. 1-1), o aço para um pinhão motor deve ser facilmente usinado durante o processamento, mas, quando pronto, o pinhão deve ser suficientemente tenaz para resistir a severas condições de uso. Paralamas devem ser feitos com um metal que seja facilmente moldável, mas que deverá resistir à deformação por impacto. Condutores elétricos devem suportar temperaturas extremas e a característica “corrente/tensão” de um semiconductor deve permanecer constante por um longo período de tempo.

Muitos projetos avançados em engenharia dependem do desenvolvimento de materiais completamente novos. Por exemplo, o transistor nunca poderia ter sido construído com os materiais disponíveis há dez anos atrás; o desenvolvimento da bateria solar requereu um novo tipo de semiconductor; e, embora os projetos de turbinas a gás estejam muito avançados, ainda se necessita de um material barato e que resista a altas temperaturas, para as pás da turbina.

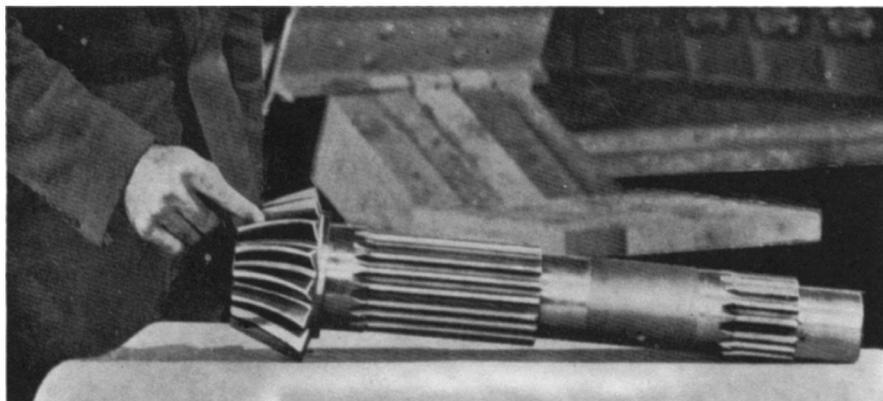


Fig. 1-1. Pinhão motor terminado. Esta engrenagem deve ser usinada durante a produção e antes de ser usada, suas propriedades devem ser alteradas a fim de torná-la tenaz. (Cortesia de Climax Molybdenum Co.).

Desde que, obviamente, é impossível para o engenheiro ter um conhecimento detalhado dos muitos milhares de materiais agora disponíveis, assim como manter-se a par dos novos desenvolvimentos, ele deve ter um conhecimento adequado dos princípios gerais que governam as propriedades de *todos* os materiais. Começaremos nos familiarizando com alguns termos e medidas usados em engenharia e, em seguida, consideraremos (1) a estrutura dos materiais e, (2) como as propriedades dos materiais são afetadas quando em uso.

Nosso estudo da estrutura vai incluir desde as características possíveis de uma observação direta até aquelas submicroscópicas; desde as peças componentes até os grãos e cristais que compõem as mesmas e, até mesmo, as partículas subatômicas que determinam as propriedades do material. Nosso estudo das condições em serviço incluirá os efeitos da solicitação mecânica, temperatura, campos elétricos e magnéticos, características químicas do meio circundante e exposição a radiações.

1-2 PROPRIEDADES MECÂNICAS. Provavelmente a primeira propriedade de um material que nos vem à mente, particularmente quando em conexão com estruturas tão grandes como pontes ou edifícios, é a *resistência mecânica*. Outras propriedades mecânicas são *elasticidade*, *ductilidade*, *fluência*, *dureza* e *tenacidade*. Cada uma delas está associada à habilidade do material resistir a forças mecânicas. Mas, o engenheiro nem sempre deseja que seus materiais resistam a todas as deformações; uma mola, por exemplo, deve alongar-se quando solicitada por um esforço, embora não deva persistir nenhuma deformação permanente após a retirada da carga. Por outro lado, o material usado para o paralamas de um automóvel deve ficar permanentemente deformado durante a operação de moldagem.

A fim de se ter uma base comum para fazer comparações entre as propriedades estruturais e os efeitos das condições em serviço nas mesmas, vamos primeiramente definir alguns dos termos mais comuns em engenharia.

Tensão é definida como a força por unidade de área e é expressa em libras por polegadas quadrada (psi)¹ ou em quilogramas força por centímetro quadrado (kgf/cm²) ou por milímetro quadrado (kgf/mm²). A tensão é calculada simplesmente dividindo-se a força pela área na qual atua.

Exemplo 1-1

Qual a peça solicitada por maior tensão: (a) uma barra de alumínio, de seção reta 0,97

¹N. do T. psi = "pounds per square inch".

mm × 1,21 mm solicitada por uma carga de 16,75 kgf ou (b) uma barra de aço de seção circular de diâmetro 0,505 mm sob uma carga de 10,8 kgf?

Resposta: Unidades: $\frac{\text{kgf}}{(\text{mm})(\text{mm})} = \text{kgf/mm}^2$

Cálculos (a) $\frac{16.750}{(0,97)(1,21)} = 14,3 \text{ kgf/mm}^2$

(b) $\frac{10.800}{(\pi/4)(0,505)^2} = 54 \text{ kgf/mm}^2$

Como efeito da tensão, tem-se a *deformação*. O engenheiro comumente expressa deformação em uma de duas maneiras: (1) o número de centímetros de deformação por centímetro do comprimento, ou (2) o comprimento deformado como uma porcentagem do comprimento original. A deformação pode ser *elástica* ou *plástica*.

Exemplo 1-2

Em uma haste de cobre são marcados dois traços que distam entre si 50 mm. A haste é tensionada de forma que a distância entre os traços passa a ser de 56,7 mm. Calcular a deformação.

Resposta: Unidade: $\frac{(\text{mm} - \text{mm})}{\text{mm}} = \frac{\text{mm}}{\text{mm}} = \frac{\text{porcentagem}}{100} = \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$

Cálculo $\frac{56,7 - 50,0}{50,0} = 0,135 \text{ cm/cm} = 13,5 \%$

A deformação elástica é reversível; desaparece quando a tensão é removida. A deformação elástica é praticamente proporcional à tensão aplicada (Fig. 1-2).

O *módulo de elasticidade* (módulo de Young) é o quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante. Ele está relacionado com a *rigidez* do material. O módulo de elasticidade resultante de tração ou compressão é expresso em psi ou em kgf/mm². O valor deste módulo é primordialmente determinado pela composição do material (Apêndice E) e é apenas indiretamente relacionado com as demais propriedades mecânicas.



Fig. 1-2. Relação elástica tensão-deformação. A deformação elástica é diretamente proporcional à tensão.



Fig. 1-3. Relação plástica tensão-deformação. A deformação plástica que se segue à deformação elástica inicial não é reversível. A deformação elástica continua a aumentar durante a deformação plástica, mas é reversível. (Compare com a Fig. 1-2).

Exemplo 1-3

Se o módulo médio de elasticidade de um aço é 21.000 kgf/mm^2 , quanto se alongará um fio de $0,25 \text{ cm}$ de diâmetro e de 3 m de comprimento, quando solicitado por uma carga de 500 kgf ?

$$\text{Resposta: Módulo de elasticidade} = \frac{\text{tensão}}{\text{deformação}} \quad (1-1)$$

$$\text{Unidades: } \text{kgf/mm}^2 = \frac{\text{kg/mm}^2}{\text{cm/cm}}$$

$$\text{Cálculo: } 21.000 = \frac{500/((\pi/4)(0,25)^2)}{\text{deformação}}$$

$$\text{deformação} = 0,0043 \text{ cm/cm}$$

$$\text{unidades: } (\text{cm/cm})(\text{cm}) = \text{cm}$$

$$\text{Deformação total} = 0,0043 \times 300 = 1,29 \text{ cm}$$

Deformação plástica é a deformação permanente provocada por tensões que ultrapassam o limite de elasticidade (Fig. 1-3). A deformação plástica é o resultado de um deslocamento permanente dos átomos que constituem o material e, portanto, difere da deformação elástica onde os átomos mantêm suas posições relativas.

Ductilidade é a deformação plástica total até o ponto de ruptura. Assim sendo, o seu valor pode ser expresso como *alongamento* e nas mesmas unidades de deformação. Um comprimento comum (embora não universal) para a medida da elongação é 50 mm . Como mostrado na Fig. 1-4, o comprimento considerado é importante pois a deformação plástica normalmente é localizada.

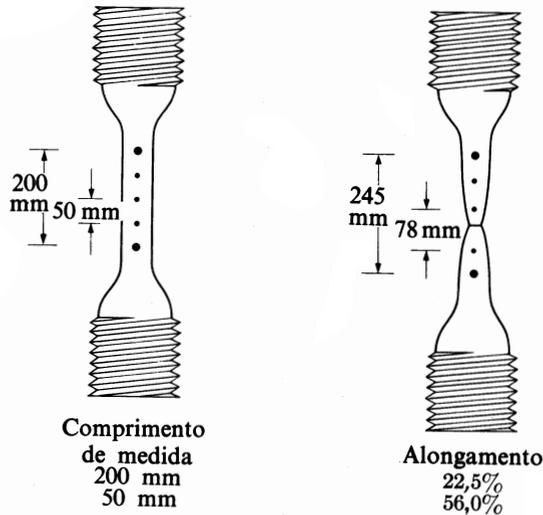


Fig. 1-4. Elongação *versus* comprimento de medida. Como a deformação final é localizada, o valor da elongação não tem significado, a menos que se indique o comprimento de medida.

Uma segunda medida da ductilidade é a *estricção* que é a redução na área da seção reta do corpo, imediatamente antes da ruptura. Os materiais altamente dúcteis sofrem grande redução na área da seção reta antes da ruptura. Este índice é sempre expresso em porcentagem e é calculado como se segue:

$$\text{Estricção} = \frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}} \tag{1-2}$$

Relações tensão-deformação. Agora é possível ser mais específico sobre o efeito da tensão na deformação. A Fig. 1-5 mostra, graficamente, esta relação para diferentes tipos de materiais, sendo que, para todos, tem-se um intervalo de deformação elástica.

O material correspondente à Fig. 5-1a não deforma plásticamente antes da ruptura; é um material de comportamento *frágil*. Um material dúctil tem um *limite elástico* (ou *limite de proporcionalidade*) além do qual ocorre deformação permanente. A capacidade do material resistir à deformação plástica é medida pela *tensão de escoamento* que é determinada pela relação entre a força que inicia a deformação permanente e a área da seção reta. Em materiais tais como os aços doces, o limite de escoamento é bem definido pois, para uma dada tensão, o material escoou, isto é, ocorre deformação plástica sem praticamente aumento na tensão (Fig. 1-5b). Em outros materiais, não ocorre um escoamento propriamente dito; neste caso, define-se um *limite convencional de escoamento* que corresponde à tensão necessária para provocar uma deformação permanente de 0,2% (ou um outro valor especificado) (Fig. 1-5c).

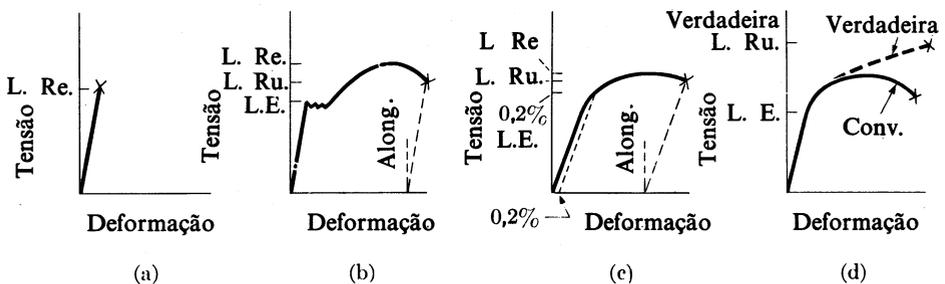


Fig. 1-5. Diagramas tensão-deformação. (a) Material não dúctil sem deformação plástica (exemplo: Ferro fundido). (b) Material dúctil com limite de escoamento (exemplo: aço de baixo carbono). (c) Material dúctil sem limite de escoamento nítido (exemplo: alumínio). (d) Curva verdadeira tensão-deformação versus curva convencional L. Ru. = Limite de ruptura, L. Re. = Limite de resistência, L. E. = Limite de escoamento, Elong. = Elongação, X = ruptura.

O *limite de resistência à tração* de um material é calculado dividindo-se a carga máxima suportada pelo mesmo pela área da seção reta inicial. Esse limite, tal como os demais, é expresso em unidades de tensão. Deve-se notar que o limite de resistência é calculado em relação à área inicial. Essa é uma observação importante, particularmente para os materiais dúcteis, pois os mesmos sofrem uma redução de área quando solicitados pela carga máxima. Embora a *tensão verdadeira* que solicita o material seja calculada considerando-se a área real (Fig. 1-5d), a tensão tal como definida anteriormente é mais importante para o engenheiro, pois os projetos devem ser feitos com base nas dimensões iniciais.

Em virtude da área da seção reta de um material dúctil poder se reduzir antes da ruptura, o *limite de ruptura* pode ser inferior ao *limite de resistência*. Por definição, ambos são calculados considerando-se a área inicial (Fig. 1-5c).

⊙ Exemplo 1-4

Um fio de cobre tem uma tensão de ruptura de 30 kgf/mm² e apresenta uma estricção de 77%. Calcular (a) a tensão verdadeira de ruptura e (b) a deformação verdadeira ϵ_v na ruptura (a deformação instantânea $d\epsilon$ é igual a dl/l).

Resposta: (a) $\frac{F}{A_0} = 30 \text{ kgf/mm}^2$, $F = 30 A_0$

$$\frac{F}{A_{verd}} = \frac{F}{(1 - 0,77)A_0} = \frac{30}{0,23} = 131 \text{ kgf/mm}^2$$

(b) $d\epsilon = \frac{dl}{l}$, $\epsilon_{verd} = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_0}$.

Mas: $A_0 l_0 = A_f l_f$

$$\epsilon_{verd} = \ln \frac{A_0}{A_f} = \ln \frac{A_0}{0,23 A_0} = 1,47 \text{ ou } 147\%$$

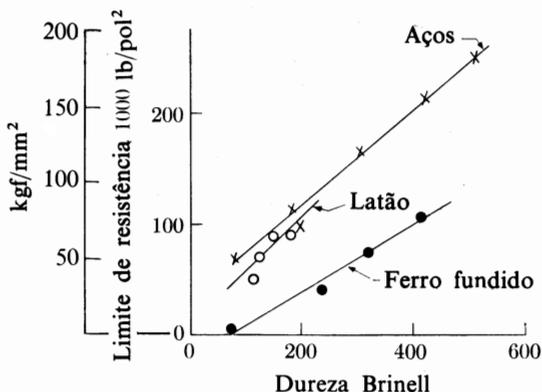


Fig. 1-6. Limite de resistência versus dureza Brinell. Exemplos: aços, latões e ferros fundidos.

A *dureza* é definida pela resistência da superfície do material à penetração. Como se pode esperar, a dureza e a resistência à tração estão intimamente relacionadas (Fig. 1-6). A *escala Brinell de dureza* (BNH)² é um índice de medida da dureza, calculado a partir da área de penetração de uma bilha no material. A penetração desta bilha, que é uma esfera de aço duro ou de carbeto de tungstênio, é feita mediante uma força padronizada. A *escala Rockwell de dureza*, outra das mais comuns escalas de dureza usadas em engenharia, está relacionada ao BNH (Apêndice C), mas é medida pela profundidade de penetração de uma pequena bilha padronizada. Muitas escalas Rockwell foram estabelecidas para materiais com diferentes faixas de dureza; estas escalas diferem entre si nas dimensões da bilha e na carga de penetração.

⊙ Exemplos, precedidos por um ponto, podem ser designados como trabalho aos alunos a critério do professor (ver prefácio).

²N. do T. BNH = "Brinell hardness number".

Tenacidade é a medida da *energia* necessária para romper o material. Difere pois da *resistência à tração*, que é a medida da *tensão* necessária para romper o material. Energia, o produto de uma força multiplicada por um deslocamento, é medida em lb.pé ou em kgf.cm; essa energia está intimamente relacionada à área sob a curva tensão *versus* deformação. Um material dúctil com a mesma resistência de um material frágil irá requerer maior energia para ser rompido e portanto é mais tenaz (Fig. 1-7). Ensaios padronizados *Charpy* ou *Izod* são usados para medir tenacidade. Êsses métodos diferem entre si apenas na forma do corpo de prova e no método de aplicação da energia.

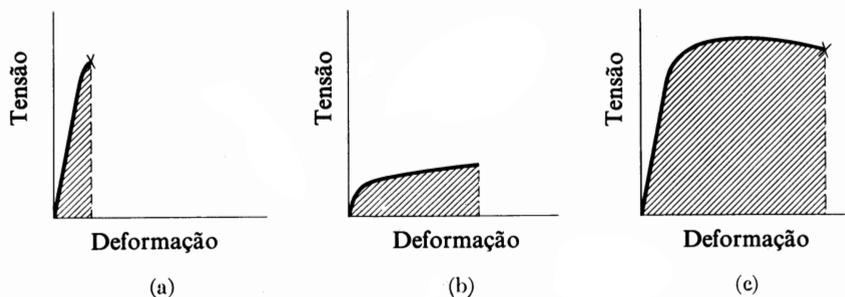


Fig. 1-7. Tenacidade é a medida da energia necessária para romper o material. Portanto, ela pode ser representada pela área sob a curva tensão-deformação. A parte (c) representa o comportamento mais tenaz dos três exemplos.

1-3 PROPRIEDADES TÉRMICAS. É extremamente importante a distinção entre calor e temperatura. Temperatura é um nível de atividade térmica enquanto que calor é a energia térmica.

Em engenharia, são comumente utilizadas duas escalas para medir temperatura: *escala Fahrenheit* e a *Celsius (centígrada)*. Cálculos são mais fáceis com a escala Celsius e um número crescente de processos industriais estão passando a utilizá-la. Uma conversão direta pode ser feita de uma escala para outra, através das seguintes relações:

$$^{\circ}\text{F} = 1,8 (^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1-3)$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} [(^{\circ}\text{F}) - 32] \quad (1-4)$$

Para qualquer componente químico de um material, o *ponto de fusão* e o *ponto de ebulição* são temperaturas importantes pois correspondem à transição entre diferentes arranjos estruturais dos átomos no material.

Calor é expresso em "Btu"³, na escala inglesa e em calorias no sistema métrico. Um Btu é a energia requerida para aumentar de 1°F a temperatura de uma libra de água, na temperatura de maior densidade da água (39°F). Portanto, as unidades para *capacidade térmica* são Btu/lb.°F no sistema inglês ou cal/g.°C no sistema métrico. O *calor específico* de um material é definido como sendo o quociente entre a capacidade térmica do material e a da água.

Vários calores de transformação são importantes no estudo de materiais. Os mais conhecidos dêles são o *calor latente de fusão* e o *calor latente de vaporização*, que são os calores requeridos, respectivamente, para a fusão e vaporização. Cada um dêstes processos envolve uma

³N. do T. Btu = "British thermal unit".

mudança interna no material que passa de um arranjo atômico para outro. Veremos, mais tarde, que há várias outras mudanças estruturais possíveis para os sólidos e que estas mudanças também requerem uma alteração no conteúdo térmico do material.

A *dilatação térmica* é comumente expressa em $\text{pol}/\text{pol}\cdot^{\circ}\text{F}$ ou em $\text{cm}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$. Em geral, admitimos que o coeficiente de dilatação térmica é independente da temperatura. Por razões que serão apresentadas mais tarde, deve ser observado que o coeficiente de dilatação térmica depende da temperatura e, em geral, aumentando-se a temperatura o coeficiente também aumenta (Fig. 1-8). Descontinuidades na variação do volume com a temperatura ocorrem

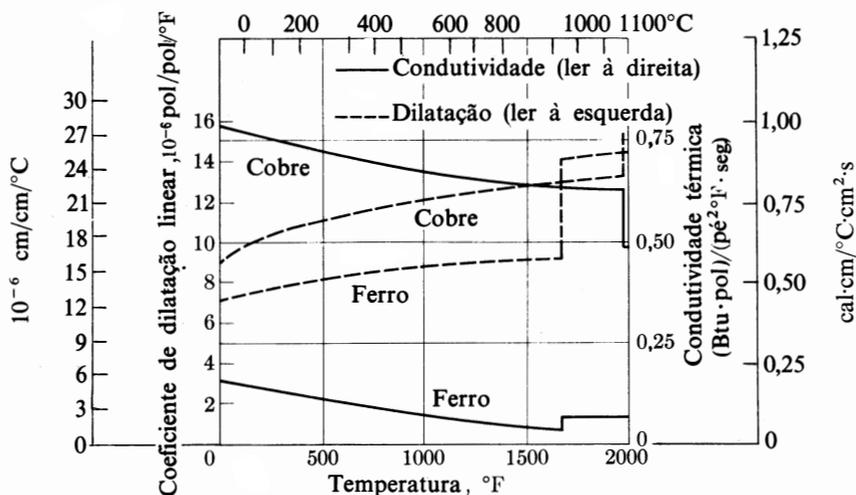


Fig. 1-8. Propriedades térmicas *versus* temperatura. A descontinuidade para o cobre a 1085°C (1985°F) é resultado da fusão. O ferro possui uma descontinuidade em virtude de um rearranjo dos átomos a 910°C (167°F). Ver Cap. 3.

com mudanças de estado, porque há uma alteração no arranjo dos átomos e moléculas do material. Aqui, como no caso da deformação mecânica, temos dois tipos de mudanças estruturais: um tipo, onde as mudanças são aquelas em que os átomos vizinhos de um determinado átomo permanecem sendo os mesmos e outro, em que os átomos ou moléculas são rearranjados. Esse contraste persistirá ao longo das discussões futuras.

A transferência de calor entre sólidos ocorre comumente por *condutividade térmica* que é medida em $(\text{Btu}\cdot\text{pol})/(\text{F}\cdot\text{h}\cdot\text{ft}^2)$ ou $(\text{cal}\cdot\text{cm})/(\text{C}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^2)$. A condutividade térmica de um material também depende da temperatura. Entretanto, ao contrário do coeficiente de dilatação térmica, a condutividade diminui com o aumento da temperatura. (As razões para esse comportamento serão discutidas mais tarde). As mudanças no empacotamento atômico que acompanham a fusão e outros rearranjos atômicos decorrentes de variações na temperatura produzem descontinuidades na curva condutividade térmica *versus* temperatura.

O engenheiro está comumente interessado em transferências térmicas quer em regime permanente quer em regime não permanente. No regime não permanente, a transferência térmica produz uma variação na temperatura e, portanto, diminui o gradiente térmico. Nestas condições, a *difusibilidade térmica* h é importante:

$$h = k/c_p\rho, \quad (1-5)$$

onde k é a condutividade térmica, c_p é a capacidade térmica e ρ é a densidade. Um material com calor específico por volume $c_p\rho$ tem uma difusibilidade baixa, simplesmente porque mais calorías devem ser cedidas ou removidas, a fim de alterar a temperatura do material. As unidades aplicáveis à difusibilidade térmica, indicadas abaixo, servirão de base para considerações posteriores da difusibilidade atômica.

$$\begin{aligned} \text{Difusibilidade térmica} &= \frac{\text{Condutividade}}{(\text{capacidade térmica})(\text{densidade})} \\ &= \frac{(\text{cal}\cdot\text{cm})/(\text{°C}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^2)}{(\text{cal}/\text{g}\cdot\text{°C})(\text{g}/\text{cm}^3)} \\ &= \text{cm}^2/\text{s} \end{aligned} \tag{1-6}$$

1-4 PROPRIEDADES ELÉTRICAS. A mais conhecida propriedade elétrica de um material é a *resistividade*. É expressa em ohm·cm (ou ohm·pol) e está relacionada com as unidades comuns de resistência, como se segue:

$$\begin{aligned} \text{Resistência} &= (\text{resistividade}) \left(\frac{\text{comprimento}}{\text{área}} \right) \\ &= (\text{ohm}\cdot\text{cm}) \left(\frac{\text{cm}}{\text{cm}^2} \right) \\ &= (\text{ohm}\cdot\text{pol}) \left(\frac{\text{pol}}{\text{pol}^2} \right) \end{aligned} \tag{1-7}$$

Exemplo 1-5

O cobre tem uma resistividade de $1,7 \times 10^{-6}$ ohm·cm. Qual é a resistência de um fio com 0,1 cm de diâmetro e 30 m de comprimento?

Resposta: Cálculo: Resistência = $1,7 \times 10^{-6} \frac{3000}{(0,1)^2} = 0,65$ ohm

A condutividade elétrica é o inverso da resistividade. É expressa em mho/cm (mho = = ohm⁻¹). A relação entre a condutividade e o número de transportadores de carga elétrica, a carga por transportador e a mobilidade será discutida em maior detalhe no Cap. 5, assim como a relação entre a condutividade elétrica e (1) a temperatura e (2) a deformação.

Em contraste com os condutores elétricos que transferem cargas elétricas, muitos materiais de importância em engenharia são usados como *dielétricos* ou não condutores. Se

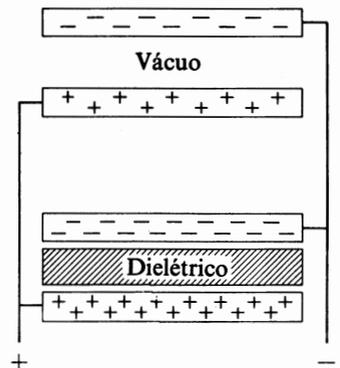


Fig. 1-9. A constante dielétrica relativa pode ser discutida em termos da quantidade de eletricidade que pode ser armazenada em um condensador. A constante dielétrica relativa é igual à quantidade de eletricidade armazenada usando um material isolante dividida pela quantidade armazenada usando vácuo.

um material dielétrico é usado somente como isolante elétrico, é necessário considerar-se a sua *rigidez dielétrica*. Esta propriedade é, geralmente, expressa em volts por *mil* (1000 mil = = 1 pol) ou em volts por cm; entretanto, deve-se notar que a capacidade isolante de um material nem sempre aumenta proporcionalmente à espessura. Muitos outros fatores, tais como área específica, porosidade e defeitos, influem nas características de isolamento do material.

Uma outra propriedade dielétrica importante é a *constante dielétrica* que é melhor explicada em termos de um condensador, que é um dispositivo para armazenar carga elétrica. Um condensador é composto de um eletrodo negativo e outro positivo, entre os quais é feito o vácuo ou é colocado um material isolante. O eletrodo negativo armazena carga e há a remoção de carga do eletrodo positivo (Fig. 1-9). A quantidade de carga que é armazenada depende, entre outras coisas, do material colocado entre as placas. Esses dielétricos não transportam carga elétrica, mas não são isolantes inertes porque a aplicação de um campo elétrico externo pode deslocar cargas eletrônicas e iônicas de suas posições normais na estrutura interna do material. Esse comportamento pode ser comparado à deformação mecânica elástica, visto que as cargas retornam à sua posição normal quando o campo elétrico é removido. (Ver Cap. 5 para maiores detalhes).

A carga Q (expressa em coulombs ou amp's), que é contida no condensador, é proporcional à diferença de potencial V aplicada, sendo a constante de proporcionalidade C a capacidade do condensador que é expressa em farads (F):

$$Q = CV \quad (1-8)$$

A capacidade é, além disso, dependente da constante dielétrica relativa K' e da geometria do condensador. Para um capacitor de placas paralelas:

$$C = \frac{K'A}{(11,32)(10^6)d} \quad (1-9)$$

onde C está em microfarads, A é a área em cm^2 e d é a distância entre as placas. O fator de conversão, 11,32, é escolhido de forma que a constante dielétrica K' seja adimensional e igual a 1,0 quando é feito o vácuo entre as placas. A constante K' para os vários materiais que podem ser usados como dielétrico depende do deslocamento de carga que ocorre como resultado do campo elétrico aplicado. Uma combinação das Eqs. (1-8) e (1-9) mostra que a quantidade de carga armazenada em um capacitor é diretamente proporcional à constante dielétrica relativa (Fig. 1-9).

Exemplo 1-6

Um condensador projetado para usar papel encerado (constante dielétrica $K' = 1,75$) como dielétrico entre eletrodos de folha de alumínio, tem uma capacidade de 0,013 farad. Está se cogitando na substituição do papel por um filme plástico ($K' = 2,10$) de mesmas dimensões. Com todos os demais fatores permanecendo constantes, qual seria a nova capacidade do condensador?

$$\begin{aligned} \text{Resposta: } \frac{A}{(11,32)(10^6)d} &= \left(\frac{C}{K'}\right)_{\text{papel}} = \left(\frac{C}{K'}\right)_{\text{plast.}} \\ C_{\text{plast.}} &= \frac{(0,013)(2,10)}{(1,75)} = 0,0156 \text{ farad} \end{aligned}$$

Como a constante dielétrica é consequência de um deslocamento de carga no interior do material, seu valor depende tanto da temperatura como da frequência e da estrutura do material. Estes fatores receberão atenção nos capítulos subseqüentes.

1-5 PROPRIEDADES QUÍMICAS. Quase todos os materiais usados pelos engenheiros são suscetíveis de corrosão por ataque químico. Para alguns materiais, a *solubilização* é importante. Em outros casos, o efeito da *oxidação* direta de um metal ou de um material orgânico como a borracha é o mais importante. Além disso, a resistência do material à *corrosão* química, devido ao meio ambiente, é da maior importância. A atenção que damos aos nossos automóveis é um exemplo óbvio da nossa preocupação com a corrosão. Desde que freqüentemente, o ataque pela corrosão é irregular, é muito difícil medi-la. A unidade mais comum para a corrosão é polegadas de superfície perdida por ano.

1-6 PROPRIEDADES ÓPTICAS. Embora entre as propriedades ópticas importantes para a engenharia se incluam o índice de refração, a absorção e a emissividade, apenas a primeira delas será discutida aqui, porque as outras duas já são mais especializadas. O índice de refração n é a razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da luz no material, V_m :

$$n = \frac{c}{V_m} \tag{1-10}$$

O índice também pode ser expresso em termos do ângulo de incidência i e do ângulo de refração r :

$$n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} \tag{1-11}$$

1-7 CUSTO. Embora certamente o custo não seja uma *propriedade* intrínseca ao material, freqüentemente, é o fator determinante na seleção de um certo material para uma dada aplicação. O custo é usualmente expresso em valor por quilograma ou por peça, mas um índice mais significativo é o custo por unidade de vida útil. É, muitas vezes, vantajoso pagar-se mais por quilograma ou por peça, se isto implicar em um aumento da vida e uma diminuição dos custos de manutenção e substituição.

1-8 MEDIDA DAS PROPRIEDADES DE INTERÊSSE EM ENGENHARIA. *Informação qualitativa.* Diagramas esquemáticos, mostrando o efeito de uma variável sobre uma certa propriedade, são ferramentas indispensáveis no entendimento de complicadas relações empíricas em termos qualitativos. A Fig. 1-10, por exemplo, ilustra a variação da resistência do concreto em função do teor de água adicionado. O concreto, certamente, é mais resistente quanto menor for a quantidade de água utilizada, embora deva existir água suficiente a fim de tornar o concreto trabalhável.

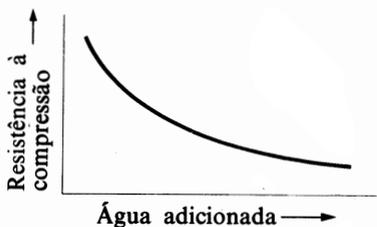


Fig. 1-10. Representação esquemática de duas variáveis. Resistência do concreto *versus* teor de água. O teor de água é a variável independente.

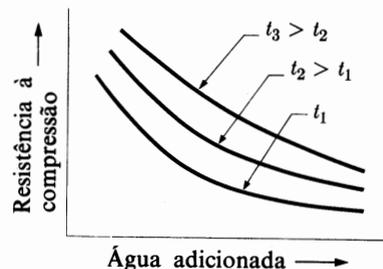


Fig. 1-11. Representação esquemática de três variáveis. A resistência do concreto está relacionada com o tempo t e o teor de água.

Outras variáveis podem ser mostradas esquematicamente através do uso de parâmetros adicionais. A Fig. 1-11 adiciona o parâmetro tempo à relação previamente mostrada na Fig. 1-10. A Fig. 1-11 nos diz que (1) para uma dada quantidade de água adicionada, a resistência aumenta com o tempo; (2) para um dado período de tempo, a resistência é menor quanto maior for o excesso de água adicionado; e (3) uma dada resistência pode ser atingida em um tempo menor, se menos água for usada.

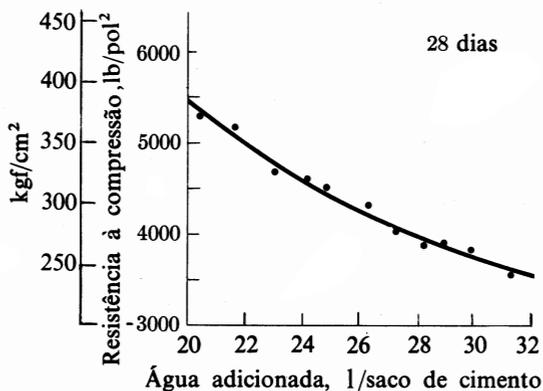


Fig. 1-12. Valores quantitativos. Resistência do concreto *versus* teor de água. (ASTM Testing Standards N.º C 39-49).

Representações esquemáticas ajudam o engenheiro a determinar, previamente, quais as variáveis que devem ser controladas, a fim de obter um determinado resultado. Com esta informação, pode-se antecipar as possíveis modificações dos materiais durante a produção ou em serviço.

Dados quantitativos. É, muitas vezes, importante dispor-se de dados quantitativos concernentes às propriedades dos materiais. Assim, da Fig. 1-12, o engenheiro de projetos observa que o concreto pode ter uma resistência à compressão de $3,1 \text{ kgf/mm}^2$, se 24 litros de água são usados para cada saco de cimento. Entretanto, a fim de se ter a informação completa, o parâmetro tempo assim como dados relativos à granulometria e à temperatura devem ser incluídos, pois que cada um destes fatores influencia as relações quantitativas.

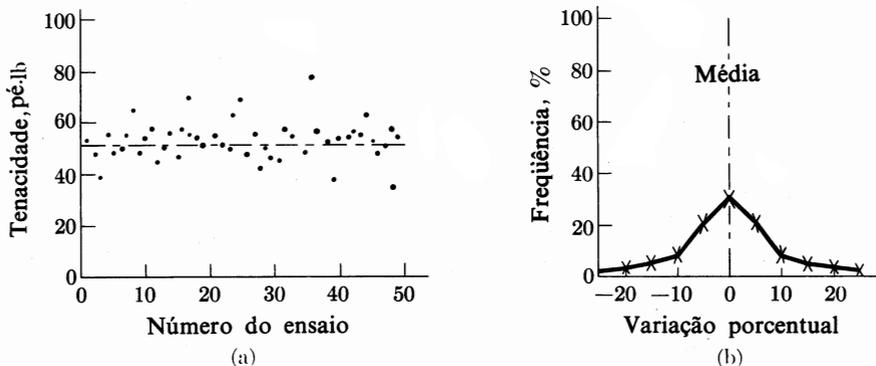


Fig. 1-13. Grande variação. Variações encontradas no ensaio de impacto Charpy para o aço SAE 1040 (20°C). Todos os ensaios foram idênticos. (a) Distribuição dos resultados. (b) Distribuição de frequências.

Um outro fator, igualmente importante na apresentação de muitos dados quantitativos, é a *variança** que pode ser encontrada no ensaio. Fig. 1-13 mostra a faixa de valores obtidos no ensaio de impacto de cinquenta amostras de aço a 20°C. Há uma variação muito grande nos dados, embora as amostras sejam as mesmas e o método de ensaio seja constante, dentro do possível. A variação nos valores obtidos pode ser originária de muitas fontes: (1) diferenças não detectáveis no aço dos corpos de prova, (2) diferenças na preparação das amostras, (3) diferenças durante a execução do ensaio. A grande variação aqui observada torna necessários outros testes para estabelecer a resistência média ao impacto.

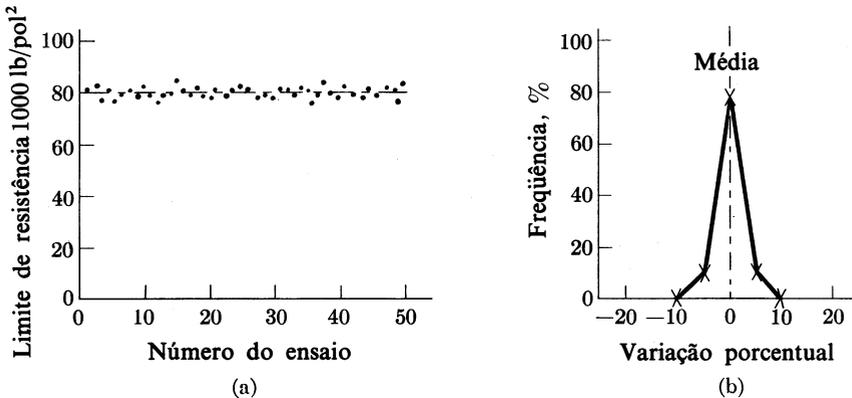


Fig. 1-14. Pequena variança. Variações encontradas no ensaio de tração de um aço SAE 1040 (20°C). Todos os ensaios foram idênticos. (a) Distribuição dos resultados. (b) Distribuição de freqüências.

Embora a variança nem sempre seja tão acentuada como no exemplo da Fig. 1-13 (ver Fig. 1-14), o engenheiro deve prever a espécie das variações a serem esperadas, pois, freqüentemente, êle não pode testar diretamente os materiais que vai usar. Ainda mais, deve-se utilizar uma margem de segurança adequada a fim de levar em conta fontes adicionais de variação encontradas em serviço. Um dos exemplos mais significativos foi o efeito do tempo de serviço nos primeiros Comet⁴ ingleses, onde nenhuma margem de segurança foi deixada, a fim de levar em conta o efeito da pressurização e despressurização na fadiga do metal das cabines dêstes aviões em altitudes elevadas.

REFERÊNCIAS PARA LEITURA ADICIONAL

Propriedades dos materiais

1-1. Apêndice E. *Propriedades de Materiais Selecionados*.

1-2. Brady, G. S., *Materials Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1951. Êste livro apresenta um ou dois parágrafos descrevendo, cada um, cêrca de mil tipos de material.

1-3. *Ceramic Data Book*. Chicago: Industrial Publications, Inc., publicado anualmente. Contém dados sôbre as propriedades dos materiais cerâmicos mais comuns, incluindo dados específicos nas seguintes divisões: refratários, cerâmica estrutural, esmaltes, vidro, cerâmica branca e produtos cerâmicos para utilizações elétricas.

* Variança é uma medida estatística da variação provável e é igual ao quadrado do desvio padrão.

⁴N. do T. — Avião inglês comercial a jato-propulsão.

- 1-4. *Corrosion in Action*. New York: International Nickel Co., 1955. Uma introdução à corrosão; excelentemente ilustrado.
- 1-5. Kinney, G. F., *Engineering Properties and Applications of Plastics*. New York: John Wiley & Sons, 1957. O primeiro capítulo considera as principais categorias de plásticos. Subseqüentemente, suas propriedades mecânicas, térmicas, ópticas e elétricas são consideradas.
- 1-6. Marin, J., *Mechanical Behavior of Engineering Materials*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1962. Dá um tratamento geral das propriedades mecânicas.
- 1-7. *Metals Handbook*, Volume I, Cleveland: American Society for Metals, 1961. Esta referência básica para todos os metalurgistas é essencialmente uma enciclopédia de metais.
- 1-8. "Plastics Encyclopedia Issue", *Modern Plastics*. O número de setembro de cada ano. Material técnico e de referência são incluídos, proporcionando um rápido acesso a uma variedade de informações sobre resinas e plásticos.
- 1-9. *Reactor Handbook, Volume 3, Section 1: General Properties of Materials* Washington, D. C.: Atomic Energy Commission, 1955. Um compêndio de dados sobre propriedades de materiais de interesse em tecnologia nuclear. Como êste manual cobre muitas variedades de materiais, serve como referência, também para outros propósitos.
- 1-10. Richards, C. W., *Engineering Materials Science*. San Francisco: Wadsworth, 1961. Uma discussão completa das propriedades mecânicas.
- 1-11. Smithells, C. J. *Metal Reference Book*, 3.^a edição. New York: Interscience Publishers, Inc., 1961. Um livro de referência em dois volumes composto quase que inteiramente de dados tabulados; adequado ao engenheiro que conhece o significado das diferenças no comportamento de um metal.
- 1-12. Woldman, N. F., *Engineering Alloys*. Cleveland: American Society for Metals, 1954. Cerca de 19.000 ligas diferentes são citadas com suas propriedades, composições e aplicações típicas.

Ensaio de materiais

- 1-13. *ASTM Standards*. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1961 (com freqüentes revisões). É um conjunto de vários volumes contendo ensaios padronizados aceitos por uma larga porção da indústria americana. Os ensaios são esquematizados em detalhe⁵.
- 1-14. Bornemann, A., e R. S. Williams, *Metals Technology*. Cleveland: American Society for Metals, 1954. Inclui experiências de laboratório ao lado da descrição dos aparelhos de ensaio mais comuns.

Aplicação (geral) dos materiais

- 1-15. *Materials in Design Engineering*. New York: Reinhold; publicado mensalmente. Uma revista técnica, com artigos sobre tôdas as espécies de materiais de importância em engenharia, escrito em um nível técnico de um engenheiro competente.
- 1-16. *Ceramic Industry*. Uma das muitas revistas técnicas especializadas em materiais cerâmicos.⁶
- 1-17. *Metal Progress*. Uma das muitas revistas técnicas especializadas em materiais metálicos.⁷
- 1-18. *Modern Plastics*. Uma das muitas revistas técnicas especializadas em materiais metálicos.

⁵N. do T. Ver também ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

⁶N. do T. Consultar também a revista "Cerâmica", da Associação Brasileira de Cerâmica.

⁷N. do T. Consultar também a revista "Metalurgia", da Associação Brasileira de Metais.

PROBLEMAS

1-1. (a) Uma barra, com diâmetro igual a 1,25 cm, suporta uma carga de 6.500 kgf. Qual a tensão que solicita a barra? (b) Se o material da barra da parte (a) possui um módulo de elasticidade de 21.000 kgf/mm², qual a deformação que a barra sofre ao ser solicitada pela carga de 6500 kgf?

Resposta: (a) 54 kgf/mm² (b) 0,25 %.

1-2. A barra de Probl. 1-1 suporta uma carga máxima de 11.800 kgf, sem deformação permanente. Qual o seu limite de ———?

1-3. A barra do Probl. 1-1 rompe com uma carga de 11.400 kg. O seu diâmetro final é 0,80 cm. (a) Qual a tensão verdadeira de ruptura? (b) Qual a tensão convencional de ruptura? (c) Qual a deformação verdadeira na fratura?

Resposta: (a) 231 kgf/mm² (b) 89 kgf/mm² (c) 96 %

1-4. Uma barra de alumínio com 1,25 cm de diâmetro possui duas marcas que distam entre si de 50 mm. Os seguintes dados são obtidos:

Carga, kg	Distância entre as marcas, mm
900	50,05
1800	50,09
2700	50,15
3600	54,8

(a) Construa a curva tensão-deformação. (b) Qual o módulo de elasticidade da barra?

1-5. Uma liga de cobre possui um módulo de elasticidade de 11.000 kgf/mm², um limite de escoamento de 33,6 kgf/mm² e um limite de resistência de 35,7 kgf/mm². (a) Qual a tensão necessária para aumentar de 0,15 cm o comprimento de uma de 3 m desta liga? (b) Que diâmetro deve ter uma barra desta liga para que a mesma barra suporte uma carga de 2300 kgf sem deformação permanente?

Resposta: (a) 5,6 kgf/mm² (b) 0,91 cm de diâmetro.

1-6. Uma barra de aço de seção retangular 0,6 × 1,25 cm e com 300 m de comprimento suporta uma carga longitudinal máxima de 7600 kgf, sem deformação permanente. (a) Qual o limite de elasticidade da barra? (b) Determine o comprimento da barra solicitada por esta carga, sabendo-se que o módulo de elasticidade do aço é 21.000 kgf/mm².

1-7. Uma liga de alumínio (6151) possui um módulo de elasticidade de 7000 kgf/mm² e um limite de escoamento de 28 kgf/mm². (a) Qual a carga máxima que pode ser suportada por um fio de 0,275 cm de diâmetro sem deformação permanente? (b) Admitindo-se que um fio dêste diâmetro de 30 m de comprimento esteja sendo solicitado por uma carga de 44 kgf, qual o aumento total no comprimento do mesmo?

Resposta: (a) 167 kgf (b) 3,2 cm

1-8. O metal monel (70 Ni-30 Cu) possui um módulo de elasticidade de 18.000 kgf/mm² e um limite de escoamento de 45,5 kgf/mm². (a) Qual a carga máxima que pode ser suportada por uma barra com 1,8 cm de diâmetro sem deformação permanente? (b) Admitindo-se como deformação total máxima permissível 0,25 cm para uma barra de 210 cm do diâmetro acima, qual a carga máxima que pode ser aplicada à barra?

1-9. Uma barra de aço 1020 com 0,6 cm de diâmetro e 1,80 m de comprimento suporta

um peso de 500 kg. Qual a diferença de deformação total se esta barra for substituída por outra igual de monel 70-30? (Ver Problema 1-8).

1-10. Os seguintes dados foram obtidos durante o ensaio de tração de uma barra metálica com 1,25 cm de diâmetro.

Carga, kgf	Deformação, cm/cm
1800	0,005
3580	0,010
4680	0,015
5260	0,02
5720	0,03
6000	0,04
5900	0,06
5000	0,08
4900	Rompe (diâmetro = 0,52 cm)

Calcule: (a) limite de resistência, (b) limite de escoamento convencional (0,2% de deformação permanente), (c) ductilidade (d) tensões de ruptura (verdadeira e convencional).

1-11. Uma carga de 450 kgf, quando aplicada a um fio de aço com 240 cm de comprimento e 0,16 cm² de área da seção transversal, provoca uma deformação elástica de 0,3 cm. Calcule (a) a tensão, (b) a deformação e (c) o valor do módulo de Young.

1-12. Uma regra empírica diz que o limite de resistência (em kgf/mm²) do aço é 0,35 da sua dureza Brinell. (a) Qual o erro (em porcentagem) que se comete ao se usar esta regra para os seis aços mostrados na Fig. 1-6? (b) e para os cinco ferros fundidos?

1-13. Qual é a condutividade térmica máxima que uma parede de 2,5 cm de espessura pode ter para que o fluxo de calor não supere, sendo a temperatura do lado frio 200°C e a do lado quente 520°C?

1-14. Uma parede com 12,5 cm de espessura possui uma condutividade térmica de 0,000495 cal·cm/cm²·s·°C. Qual é a perda de calor por hora, através desta parede, se a temperatura interna é de 53°C e a externa de 20°C?

1-15. O coeficiente médio de dilatação térmica de uma barra de aço é de $13,5 \times 10^{-6}$ cm/cm/°C. (a) Qual variação de temperatura é necessária para produzir a mesma variação linear que uma tensão de 63 kgf/mm²? (b) Qual a variação de volume que esta variação de temperatura produz?

Resposta: (a) 220°C (b) 0,9% em volume

1-16. A calcita (calcáreo) possui um coeficiente médio de dilatação linear de $11,5 \times 10^{-6}$ cm/cm/°C entre 20°C e 200°C e de $13,5 \times 10^{-6}$ cm/cm/°C entre 20°C e 530°C. (a) Qual é o coeficiente médio de expansão entre 200°C e 530°C? (b) O volume a 200°C é 1,000 cm³. Qual o volume a 20°C?

1-17. O calor específico C_p do ferro é $3,04 + 7,58 \times 10^{-3} T + 0,60 \times 10^{-5} T^{-2}$ cal/mol·K. (a) Qual é a difusividade térmica do ferro a 20°C? (b) a 500°C? [Nota: Use os dados da Fig. 1-8];

Resposta: (a) 0,23 cm²/s (b) 0,12 cm²/s

1-18. A resistividade de uma liga de alumínio é $2,8 \times 10^{-6}$ ohm·cm. Qual deve ser a resistência de um fio de alumínio com 1 m de comprimento e 0,01 cm² de área da seção transversal?

1-19. (a) Se se usar um fio de cobre puro (resistividade = $1,7 \times 10^{-6}$ ohm·cm) com

0,1 cm de diâmetro em um circuito elétrico transportando uma corrente de 10 A, quantos watts de calor são perdidos, por metro de fio? (b) Quantos watts mais serão perdidos, se o fio de cobre for substituído por um de latão de mesmo tamanho (resistividade = $3,2 \times 10^{-6}$ ohm·cm)?

Resposta: (a) 2,1 W (b) 1,9 W

1-20. Um fio de cobre possui um diâmetro de 0,027 cm. O cobre possui uma resistividade de $1,7 \times 10^{-6}$ ohm·cm. Quantos metros de fio são necessários para se obter uma resistência de 3,0 ohm?

1-21. A pesquisa no campo dos plásticos levou a um novo tipo de isolante. A rigidez dielétrica é de 38 V/ μ , na frequência de 60 ciclos por segundo. Que espessura deve ter uma camada deste plástico para isolar um fio na tensão de 18.500 V e com um fator de segurança de 15%?

1-22. A constante dielétrica de uma tira de vidro é 5,1. Um capacitor, usando esta tira de vidro com 0,01 cm de espessura, deveria ter maior ou menor capacidade que um outro semelhante usando um plástico com 0,005 cm de espessura e de constante dielétrica igual a 2,1?