

*Estado Sólido*



*Paulo Pureur*

*Estado Sólido*  
(Terceira edição)



Editora Livraria da Física  
São Paulo — 2023

Copyright © 2023 Editora Livraria da Física

3a. Edição

Editor: JOSÉ ROBERTO MARINHO

Projeto gráfico e diagramação: THIAGO AUGUSTO SILVA DOURADO

Capa: FABRÍCIO RIBEIRO

*Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do Acordo da Língua Portuguesa.*

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

---

Pureur, Paulo

Estado sólido / Paulo Pureur. – 3. ed. – São Paulo : Livraria da Física, 2023.

Bibliografia.

ISBN 978-65-5563-353-5

1. Cristais 2. Física do estado sólido - Estudo e ensino 3. Sólidos 4. Supercondutividade I. Título.

23-165633

CDD-

530.4107

---

Índices para catálogo sistemático:

1. Física do estado sólido : Estudo e ensino 530.4107

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Impresso no Brasil

*Printed in Brazil*



[www.lfeditorial.com.br](http://www.lfeditorial.com.br)

Visite nossa livraria no Instituto de Física da USP

[www.livrariadafisica.com.br](http://www.livrariadafisica.com.br)

Telefones:

(11) 39363413 - Editora

(11) 38158688 - Livraria

## Prefácio da Terceira Edição

---

Este texto resultou da organização sistemática de notas de aula elaboradas durante as várias oportunidades em que ministrei a disciplina semestral de Estado Sólido aos estudantes do Bacharelado em Física e da Engenharia Física, ambas formações oferecidas pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IF-UFRGS). Uma primeira edição artesanal, com tiragem de poucos exemplares, foi realizada em 2001 pelo setor de reprografia do IF-UFRGS. Uma segunda edição, corrigida e ampliada, foi impressa novamente no IF-UFRGS em 2010, também com pequena tiragem. O texto, porém, alcançou um público significativo, além daquele para o qual foi inicialmente concebido. Ao longo dos anos, em muitas ocasiões, cursos de formação em Física de várias outras instituições universitárias do País o tem adotado como livro-texto, ou recomendado como bibliografia suplementar. Em consequência, a expressiva demanda por exemplares tornou insuficiente e inadequada a produção artesanal no IF-UFRGS e motivou a elaboração de uma nova edição, em formato de livro-texto e tratamento profissional.

A apresentação dos conteúdos segue o padrão proposto na primeira versão, ou seja, o curso é dividido em duas grandes áreas. Na primeira delas estuda-se as propriedades estruturais dos sólidos cristalinos, com ênfase nas simetrias e na dinâmica da estrutura cristalina. A segunda área trata das propriedades eletrônicas, a qual inicia com a descrição das propriedades de equilíbrio do gás de elétrons. A seguir, discute-se a dinâmica de elétrons e as propriedades de transporte. A área é finalizada por capítulos sobre semicondutores, magnetismo e supercondutividade.

Ao final do texto principal são acrescentados sete tópicos especiais sobre assuntos relevantes e de atualidade na física de sólidos, que opcionalmente podem ser incluídos como material complementar ao conteúdo básico do curso.

Nesta terceira edição foi feita uma revisão cuidadosa do texto e das figuras originais, com algumas modificações e acréscimos significativos. Assim, no capítulo sobre o gás de elétrons foi acrescentada uma seção sobre os efeitos resultantes da aplicação de um campo magnético. Um tópico especial sobre o tratamento quântico deste problema foi também incluído. No capítulo sobre propriedades de transporte eletrônico foi acrescentada uma seção sobre fenômenos termoelétricos. No tópico especial sobre sistemas de baixa dimensionalidade foi incluída uma seção sobre as propriedades do grafeno, que é o material bidimensional de maior interesse científico e tecnológico na atualidade. Foi ainda acrescentado um tópico especial sobre propriedades de materiais dielétricos e ferroelétricos.

Ao final de cada capítulo foram também introduzidas breves referências biográficas aos cientistas que deram contribuições relevantes ao desenvolvimento dos tópicos ali tratados ou mencionados. Novas fontes bibliográficas para complemento de informação, ou simples consulta, também foram incluídas. Por fim, no intuito de proporcionar aos leitores oportunidade de verificar o nível de conhecimento adquirido, ao final do texto é oferecida uma lista de exercícios, a qual é organizada segundo a divisão dos diferentes capítulos.

*Paulo Pureur*  
*Porto Alegre, outubro de 2022*

# SUMÁRIO

---

<b>PREFÁCIO DA TERCEIRA EDIÇÃO</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XIX</b>
<b>COMENTÁRIOS INICIAIS</b>	<b>1</b>
<b>PROPRIEDADES ESTRUTURAIS DOS SÓLIDOS CRISTALINOS</b>	<b>5</b>
<b>1 LIGAÇÕES CRISTALINAS</b>	<b>5</b>
Introdução . . . . .	5
1.1 Energia de Coesão . . . . .	6
1.2 Tipos de Ligação Cristalina . . . . .	8
1.2.1 Os Cristais de Gases Nobres . . . . .	8
1.2.2 Os Cristais Iônicos . . . . .	12
1.2.3 Os Cristais Covalentes . . . . .	14
1.2.4 Metais . . . . .	17
1.2.5 Os Cristais Mistos . . . . .	20
<b>2 GEOMETRIA CRISTALINA</b>	<b>27</b>
Introdução . . . . .	27
2.1 Redes Cristalinas de Bravais . . . . .	28
2.1.1 Redes Cristalinas Bidimensionais . . . . .	29

2.1.1.a	Simetrias do Ponto nas Redes Bidimensionais . . . . .	32
2.1.1.b	Sistemas Cristalinos Bidimensionais . . . . .	33
2.1.2	Redes Cristalinas Tridimensionais . . . . .	35
2.1.2.a	Sistemas Cristalinos Tridimensionais . . . . .	37
2.2	Planos Cristalinos, Direções Cristalinas e Índices de Miller . . . . .	42
2.3	Estrutura Cristalina . . . . .	44
<b>3</b>	<b>SIMETRIAS CRISTALINAS E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CRISTAIS</b>	<b>49</b>
	Introdução . . . . .	49
3.1	Operações de Simetria dos Grupos do Ponto . . . . .	50
3.2	O Tensor Resistividade Elétrica . . . . .	52
3.3	Elasticidade . . . . .	56
3.3.1	Tensão, Deformação e Constantes Elásticas . . . . .	56
3.3.2	Efeitos da Simetria Cristalina . . . . .	60
3.3.3	Módulos Elásticos . . . . .	65
<b>4</b>	<b>REDE RECÍPROCA</b>	<b>69</b>
	Introdução . . . . .	69
4.1	Rede Recíproca . . . . .	69
4.2	Propriedades da Rede Recíproca . . . . .	72
4.3	Exemplos de Redes Recíprocas . . . . .	75
4.4	Primeira Zona de Brillouin . . . . .	76
<b>5</b>	<b>DIFRAÇÃO PELOS CRISTAIS</b>	<b>79</b>
5.1	Tipos de Radiação . . . . .	79
5.2	A Lei de Braag . . . . .	81
5.3	A Formulação de Laue . . . . .	82
5.3.1	Equivalência entre as Formulações de Braag e de Laue . . . . .	84
5.4	Métodos Experimentais de Difração de Raios-X . . . . .	85
5.4.1	Construção Geométrica de Ewald . . . . .	85
5.4.2	O Método de Laue . . . . .	86
5.4.3	O Método do Cristal Rotativo . . . . .	88
5.4.4	Método do Pó ou de Debye-Scherrer . . . . .	88



5.5	Fator de Forma Atômico e Fator de Estrutura Geométrico .	89
5.5.1	Fator de Estrutura Geométrico . . . . .	89
5.5.2	Fator de Estrutura Geométrico . . . . .	90
<b>6</b>	<b>DINÂMICA DA ESTRUTURA CRISTALINA I</b>	<b>95</b>
	Introdução . . . . .	95
6.1	O Modelo Microscópico da Rede . . . . .	96
6.1.1	O Hamiltoniano . . . . .	96
6.1.2	O Modelo Dinâmico da Estrutura Cristalina . . . .	96
6.1.3	A Aproximação Harmônica . . . . .	98
6.2	Oscilações da Rede. Teoria Clássica . . . . .	101
6.2.1	Rede Unidimensional com um Átomo por Cela Unitária . . . . .	101
6.2.1.a	Equações de Movimento . . . . .	101
6.2.1.b	Condições de Contorno Cíclicas . . . .	103
6.2.1.c	Modos Normais de Oscilação . . . . .	104
6.2.1.d	Relação de Dispersão . . . . .	106
6.2.2	Rede Unidimensional com dois Átomos por Cela Unitária . . . . .	107
6.2.3	Redes Tridimensionais . . . . .	111
6.3	Oscilações da Rede. Teoria Quântica . . . . .	113
<b>7</b>	<b>DINÂMICA DA ESTRUTURA CRISTALINA II</b>	<b>119</b>
	Introdução . . . . .	119
7.1	Difração por um Cristal Ideal: A Teoria Quântica . . . .	119
7.2	Difração por um Cristal Real . . . . .	121
7.2.1	Fator de Estrutura da Rede Ideal . . . . .	122
7.2.2	Fator de Estrutura da Rede Dinâmica . . . . .	123
7.2.2.a	Processo de Espalhamento NORMAL . .	124
7.2.2.b	Processo de Espalhamento UMKLAPP .	125
7.2.2.c	Conservação da Energia . . . . .	126
7.2.3	O Momento Cristalino . . . . .	127
7.3	Calor Específico da Rede Cristalina . . . . .	127
7.3.1	Energia Térmica e Calor Específico . . . . .	127
7.3.2	A Contagem de Estados na Zona de Brillouin . . .	130
7.3.3	A Aproximação de Debye . . . . .	131

**PROPRIEDADES ELETRÔNICAS DOS SÓLIDOS** **139**

<b>8</b>	<b>PROPRIEDADES DE EQUILÍBRIO DE UM GÁS DE ELÉTRONS LIVRES</b>	<b>139</b>
	Aproximação Adiabática . . . . .	139
8.1	O Gás de Elétrons Livres . . . . .	140
8.1.1	O Modelo . . . . .	140
8.1.2	A Densidade de Estados e a Energia de Fermi . . . . .	142
8.1.3	Parâmetros Associados à Energia de Fermi . . . . .	146
8.1.4	A Distribuição de Fermi-Dirac . . . . .	147
	8.1.4.a O Limite de Forte Degenerescência . . . . .	148
	8.1.4.b O Limite Clássico . . . . .	149
8.2	O Calor Específico Eletrônico . . . . .	149
8.3	Oscilações de Plasma . . . . .	153
8.4	Elétrons Livres na Presença de Campo Magnético . . . . .	155
	8.4.1 Modelo Clássico . . . . .	155
	8.4.2 Quantização em Níveis de Landau . . . . .	156
8.5	Conclusão . . . . .	161
<b>9</b>	<b>ELÉTRONS NUMA REDE PERIÓDICA I</b>	<b>163</b>
9.1	Metais, Semicondutores e Isolantes . . . . .	163
9.2	O Teorema de Bloch . . . . .	165
9.3	O Modelo de Elétrons Quase Livres . . . . .	169
	9.3.1 Difração dos Elétrons de Condução . . . . .	169
	9.3.2 Origem das Bandas de Energia . . . . .	172
	9.3.3 Modelo Simplificado . . . . .	174
	9.3.4 Origem Física do Gape de Energia . . . . .	176
<b>10</b>	<b>ELÉTRONS NUMA REDE PERIÓDICA II</b>	<b>181</b>
10.1	Zonas de Brillouin . . . . .	181
	10.1.1 Esquemas de Representação . . . . .	181
	10.1.2 Metais e Isolantes . . . . .	183
10.2	Superfícies de Fermi . . . . .	184
10.3	Métodos de Cálculo De Bandas . . . . .	190
	10.3.1 Aproximação das Ligações Fortes . . . . .	190
	10.3.2 Ondas Planas Ortogonalizadas . . . . .	196

10.3.3	Ondas Planas Aumentadas . . . . .	198
10.3.4	Teoria do Funcional Densidade . . . . .	199
10.4	A Densidade de Estados . . . . .	202
10.5	Tipos de Sólidos Quanto à Estrutura Eletrônica . . . . .	204
10.5.1	Metais Alcalinos . . . . .	205
10.5.2	Metais Nobres . . . . .	205
10.5.3	Metais Trivalentes . . . . .	206
10.5.4	Elementos Pentavalentes . . . . .	206
10.5.5	Elementos Divalentes . . . . .	207
10.5.6	Elementos Tetraivalentes . . . . .	208
10.5.7	Os Metais de Transição . . . . .	208
10.5.8	Os Metais de Terras-Raras (ou Lantanídios) . . . . .	209
<b>11</b>	<b>DINÂMICA DO ELÉTRON</b>	<b>213</b>
11.1	Princípios Gerais . . . . .	213
11.2	Massa Efetiva . . . . .	215
11.3	Lacunas . . . . .	217
11.3.1	Superfície de Fermi de Lacunas . . . . .	220
<b>12</b>	<b>PROPRIEDADES DE TRANSPORTE ELETRÔNICO</b>	<b>223</b>
12.1	A Função Distribuição . . . . .	223
12.2	A Equação De Boltzmann . . . . .	224
12.3	A Condutividade Elétrica na Aproximação do Tempo de Relaxação . . . . .	226
12.3.1	A Equação de Boltzmann Linearizada . . . . .	226
12.3.2	A Aproximação do Tempo de Relaxação . . . . .	228
12.3.3	A Condutividade Elétrica . . . . .	228
12.3.4	Interpretação Cinética da Condutividade Elétrica . . . . .	232
12.3.5	Mecanismos de Espalhamento Eletrônico . . . . .	234
12.4	A Resistividade Elétrica Nos Metais . . . . .	235
12.5	Transporte na Presença de Campo Magnético . . . . .	238
12.5.1	Efeito Hall . . . . .	238
12.5.2	Magnetorresistência de Lorentz . . . . .	240
12.6	Transporte de Calor pelos Elétrons de Condução . . . . .	244
12.6.1	Efeitos do Gradiente Térmico . . . . .	244
12.6.2	A Contribuição Eletrônica à Condutividade Térmica . . . . .	246

12.6.3	A Lei de Wiedemann–Franz . . . . .	249
12.7	Efeitos Termoelétricos . . . . .	251
<b>13</b>	<b>SEMICONDUCTORES</b>	<b>257</b>
13.1	Caracterização . . . . .	257
13.2	Determinação do Intervalo de Energias Proibidas . . . . .	259
13.3	Número de Partículas Portadoras de Carga em Equilíbrio Térmico . . . . .	261
13.4	Concentração de Portadores num Semicondutor Intrínseco	264
13.5	Portadores de Carga em Semicondutores Extrínsecos . . .	265
13.5.1	Níveis de Impurezas Doadoras . . . . .	266
13.5.2	Níveis de Impurezas Receptoras . . . . .	267
13.5.3	Ionização Térmica dos Níveis de Impureza . . . . .	269
13.5.4	Compostos Semicondutores . . . . .	270
13.6	Éxcitons . . . . .	272
13.7	Mobilidade . . . . .	273
13.7.1	Mobilidade e Condutividade . . . . .	273
13.7.2	Condutividade Residual num Semicondutor Ex- trínseco . . . . .	275
13.8	Semicondutores Inomogêneos . . . . .	276
13.8.1	A Junção p–n . . . . .	276
13.8.2	Gerador Fotovoltaico . . . . .	278
13.8.3	Diodo de Junção p–n . . . . .	279
13.8.4	Diodo Túnel . . . . .	283
13.8.5	Diodo Emissor de Luz e Laser de Junção p–n . . .	283
13.8.6	Heterojunções . . . . .	286
<b>14</b>	<b>MAGNETISMO EM SÓLIDOS I</b>	<b>291</b>
14.1	Magnetização e Susceptibilidade . . . . .	291
14.2	Momentos Magnéticos Microscópicos . . . . .	293
14.2.1	Momento Magnético de um Elétron . . . . .	293
14.2.2	Momento Magnético Atômico . . . . .	294
14.3	Diamagnetismo . . . . .	296
14.4	A Teoria Clássica do Paramagnetismo . . . . .	298
14.5	A Teoria Quântica do Paramagnetismo . . . . .	302
14.6	A Susceptibilidade de um Gás de Elétrons . . . . .	305

14.6.1	O Paramagnetismo de Pauli . . . . .	305
14.7	A Suscetibilidade Total . . . . .	308
<b>15</b>	<b>MAGNETISMO EM SÓLIDOS II</b>	<b>313</b>
15.1	Ferromagnetismo — A Lei de Curie–Weiss . . . . .	313
15.2	O Modelo de Heisenberg . . . . .	317
15.2.1	A Interação de Troca . . . . .	317
15.2.2	O Hamiltoniano de Heisenberg . . . . .	319
15.2.3	A Aproximação de Campo Médio . . . . .	320
15.3	Ferromagnetismo de Bandas . . . . .	322
15.4	O Modelo de Interação Indireta . . . . .	325
15.5	Ondas de Spin . . . . .	327
15.6	Ordem Antiferromagnética . . . . .	329
15.7	Outras Estruturas Magneticamente Ordenadas . . . . .	333
15.8	Sistemas Interagentes Desordenados . . . . .	334
15.9	Nanoestruturas Magnéticas . . . . .	337
<b>16</b>	<b>SUPERCONDUTIVIDADE</b>	<b>347</b>
	Introdução . . . . .	347
16.1	A Condução Elétrica . . . . .	349
16.2	O Calor Específico . . . . .	352
16.3	O Efeito Meissner–Ochsenfeld . . . . .	354
16.3.1	Supercondutores do Tipo I . . . . .	356
16.3.2	Supercondutores do Tipo II . . . . .	357
16.4	A Eletrodinâmica de London . . . . .	358
16.5	A Teoria Microscópica da Supercondutividade . . . . .	360
16.5.1	Interação Atrativa entre Elétrons . . . . .	360
16.5.2	Pares de Cooper . . . . .	365
16.5.3	O Estado Fundamental Supercondutor . . . . .	366
16.5.4	Previsões da Teoria BCS . . . . .	367
16.6	Teoria de Ginzburg–Landau . . . . .	370
16.7	Quantização do Fluxo Magnético através de um Anel Supercondutor . . . . .	373
16.8	Supercondutores do Tipo II . . . . .	374
16.8.1	O Estado Misto . . . . .	374
16.8.2	Energia de Superfície . . . . .	375

16.8.3	Vórtices de Abrikosov . . . . .	376
16.8.4	Irreversibilidades num Supercondutor do Tipo II . . . . .	379
<b>TÓPICOS ESPECIAIS</b>		<b>385</b>
<b>A</b>	<b>DEFEITOS EM CRISTAIS</b>	<b>385</b>
	Introdução . . . . .	385
A.1	Defeitos Pontuais . . . . .	386
A.1.1	Impurezas . . . . .	386
A.1.2	Vacâncias . . . . .	386
A.1.3	Difusão . . . . .	389
A.2	Defeitos Estendidos . . . . .	389
A.2.1	Discordâncias . . . . .	389
A.2.2	Crescimento de cristais . . . . .	391
A.2.3	Fronteiras de grão . . . . .	392
A.2.4	Maclas . . . . .	393
A.2.5	Falhas de Empilhamento . . . . .	394
<b>B</b>	<b>EFEITOS ANARMÔNICOS NA DINÂMICA DA ESTRUTURA CRISTALINA</b>	<b>397</b>
	Introdução . . . . .	397
B.1	Expansão Térmica . . . . .	397
B.1.1	Dilatação num Cristal Unidimensional . . . . .	398
B.1.2	Teoria Fenomenológica da Expansão Térmica . . . . .	400
B.2	A Condução Térmica da Rede Cristalina . . . . .	402
<b>C</b>	<b>EFEITOS DE BAIXA DIMENSIONALIDADE NUM GÁS DE ELÉTRONS</b>	<b>405</b>
C.1	Sistemas Bidimensionais E Unidimensionais . . . . .	405
C.2	Grafeno . . . . .	408
<b>D</b>	<b>ESTADOS DE LANDAU: TEORIA QUÂNTICA</b>	<b>415</b>
<b>E</b>	<b>DIELÉTRICOS E FERROELÉTRICOS</b>	<b>419</b>
E.1	A Polarização . . . . .	419

---

E.2	Os Três Vetores Elétricos, O Efeito Despolarizante e a Constante Dielétrica . . . . .	420
E.3	Polarizabilidade e a Constante Dielétrica . . . . .	424
E.4	Polarização Orientacional . . . . .	425
E.5	Ferroelétricos . . . . .	426
E.6	Efeito Piezoelétrico . . . . .	430
<b>F</b>	<b>DOMÍNIOS EM FERROMAGNETOS</b>	<b>433</b>
	Introdução . . . . .	433
F.1	Paredes de Domínio . . . . .	434
F.2	Energia de Anisotropia . . . . .	436
F.3	Movimentos de Paredes de Domínio e Ciclos de Histerese	438
<b>G</b>	<b>SUPERCONDUTIVIDADE DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA</b>	<b>443</b>
G.1	A Descoberta . . . . .	443
G.2	O Supercondutor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . . . . .	445
G.3	Outros Cupratos Supercondutores . . . . .	448
G.4	Propriedades Eletrônicas . . . . .	449
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>455</b>
	<b>EXERCÍCIOS</b>	<b>457</b>
	<b>ÍNDICE REMISSIVO</b>	<b>477</b>





## LISTA DE TABELAS

---

1.a	Energia de coesão, potencial de ionização e temperatura de fusão para alguns sólidos. . . . .	8
2.a	Sistemas cristalinos e redes de Bravais em 3 dimensões. .	41
2.b	Estruturas cristalinas de alguns elementos na forma sólida. Também são listadas a massa atômica, a densidade e os parâmetros de rede. . . . .	47
3.a	Constantes elásticas para os diversos sistemas cristalinos. .	61
3.b	Constantes elásticas de alguns cristais cúbicos medidas em temperatura ambiente. Os valores são expressos em giga-pascals ( $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ N/m}^2$ ). . . . .	65
3.c	Módulo elástico volumétrico medido em temperatura ambiente para alguns sólidos selecionados. . . . .	67
7.a	Temperaturas de Debye para alguns cristais simples. . . .	134
8.a	Energias de Fermi, temperaturas de Fermi e velocidades de Fermi calculadas com o modelo de elétrons livres para alguns metais. . . . .	147
12.a	Resistividade elétrica ideal (descontado o valor residual) para os metais listados em diferentes temperaturas. . . .	237

---

12.b	Número de Lorenz determinado experimentalmente em 273 K para os metais selecionados. . . . .	250
13.a	Intervalos de energia proibidos de alguns semicondutores em temperatura ambiente. . . . .	261
13.b	Mobilidade de elétrons e lacunas de alguns semicondutores em temperatura ambiente. . . . .	275
14.a	Unidades e fatores de conversão para as propriedades magnéticas dos sólidos nos sistemas cgs-emu e SI (os sistemas Gaussiano e cgs-emu são idênticos no magnetismo). . . . .	294
14.b	Susceptibilidade magnética molar total de alguns sólidos isolantes e metálicos. . . . .	310
15.a	Magnetização de saturação em $T = 0$ , número efetivo de magnetons de Bohr dos átomos magnéticos e temperaturas críticas de alguns materiais ferromagnéticos. . . . .	325
15.b	Propriedades de alguns sistemas antiferromagnéticos. . . . .	333
16.a	Temperaturas críticas e campos magnéticos críticos para alguns sistemas supercondutores. . . . .	357

## Comentários Iniciais

---

A física do estado sólido, que nos tempos atuais tem sido classificada na área mais abrangente da física da matéria condensada, é um dos campos mais férteis da ciência moderna. O estreito vínculo com a tecnologia dos materiais é um dos fatores que motivam seu contínuo desenvolvimento. São muitos os exemplos de estudos em nível fundamental na área do estado sólido, e da matéria condensada em geral, que tem impacto na geração de produtos e processos indispensáveis no dia-a-dia das sociedades modernas. Basta lembrar do caso emblemático dos semicondutores, que geraram toda a tecnologia atual de comunicação e informação. De inestimável valor é também o conhecimento desenvolvido sobre os sistemas metálicos, que são absolutamente indispensáveis à humanidade desde a Antiguidade e que encontram aplicabilidade ilimitada. Muitos outros exemplos podem ser dados. Dentre estes estão os materiais magnéticos, usados em dispositivos com amplo uso nas mais variadas tecnologias, incluindo motores e geradores elétricos, ímãs permanentes e sensores de todo o tipo, a radiação LASER cuja geração envolve materiais cristalinos, os sistemas iônicos complexos usados no armazenamento de carga, essenciais no desenvolvimento das baterias modernas que tem e terão papel essencial na mitigação do problema do aquecimento global, os materiais termoelétricos usados em refrigeração, os supercondutores que tem grande potencial de aplicação no gerenciamento energético (geração, transporte e armazenamento) e formam a base física de sensores ultrasensíveis e de sistemas para geração de campos magnéticos intensos.

Uma lista extensa, variada e sempre crescente de materiais e propriedades de interesse para a tecnologia moderna pode ser acrescentada aos exemplos acima mencionados.

O estado sólido, e mais geralmente a matéria condensada que também inclui sistemas macios e líquidos, é um campo da física da matéria dominado por propriedades ditas “emergentes”, que são inerentes a sistemas formados por um grande número átomos. As propriedades atômicas são essencialmente preservadas no nível de organização da matéria condensada. Porém, os diversos fenômenos emergentes não podem ser previstos e descritos unicamente com base nas leis que governam os níveis mais fundamentais de organização da matéria, pois resultam principalmente da complexidade própria ao comportamento coletivo dos muitos átomos condensados numa região limitada do espaço.

Dentre as propriedades emergentes está o próprio fenômeno da cristalização ou — mais genericamente — da condensação, cujo entendimento extrapola aquele necessário para descrever um constituinte atômico isolado.

Outros fenômenos emergentes típicos do estado sólido são o magnetismo e a supercondutividade. Estes são exemplos emblemáticos, por se tratarem de propriedades cujo entendimento envolve comportamentos quânticos que se manifestam em escala macroscópica, ou seja, na própria medida de tamanho relevante à matéria no estado sólido. Muitas outras propriedades emergentes, com suas excitações elementares características povoam a física do estado sólido. Dentre estas estão a dinâmica da estrutura cristalina e os fônons, os elétrons de banda e os plasmons, os semicondutores e os éxcitons e polarons, o ordenamento magnético e os magnons, a supercondutividade e o pareamento eletrônico. Estas propriedades, além de muitas outras, são descritas e tratadas ao longo deste curso introdutório.