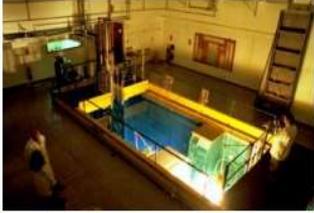




MATERIAIS DE APLICAÇÃO NA ENGENHARIA NUCLEAR



Materiais dos Reatores Nucleares



Profs. Arnaldo Andrade e Raquel Lobo



Ipen



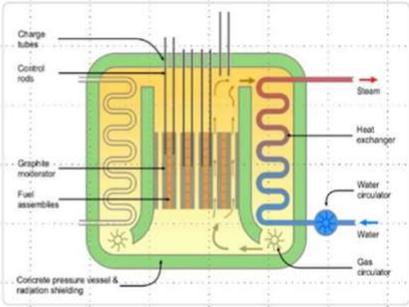
1

Generation II: advanced gas-cooled reactor (AGR)



Hinkley Point B

- Enriched uranium
- Carbon dioxide coolant
- Larger reactor core
- Good thermal efficiency
- Less efficient burn-up



Note that the heat exchanger is contained within the steel reinforced concrete combined pressure vessel and radiation shield

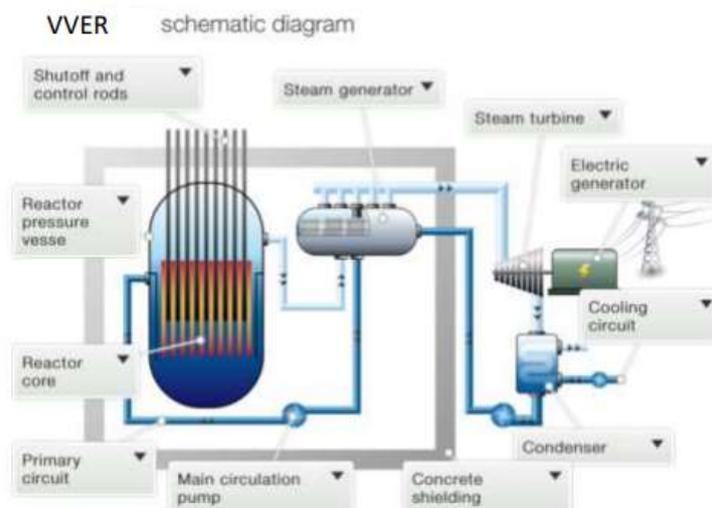
2

Os reatores da Geração III são uma classe de reatores nucleares projetados para suceder os reatores da Geração II, incorporando melhorias evolutivas no design.

Reatores de Quarta geração são um conjunto de projetos de reatores nucleares teóricos que estão atualmente sendo pesquisados. Em geral, não se espera que estes projetos tenham aplicação comercial antes de 2030.

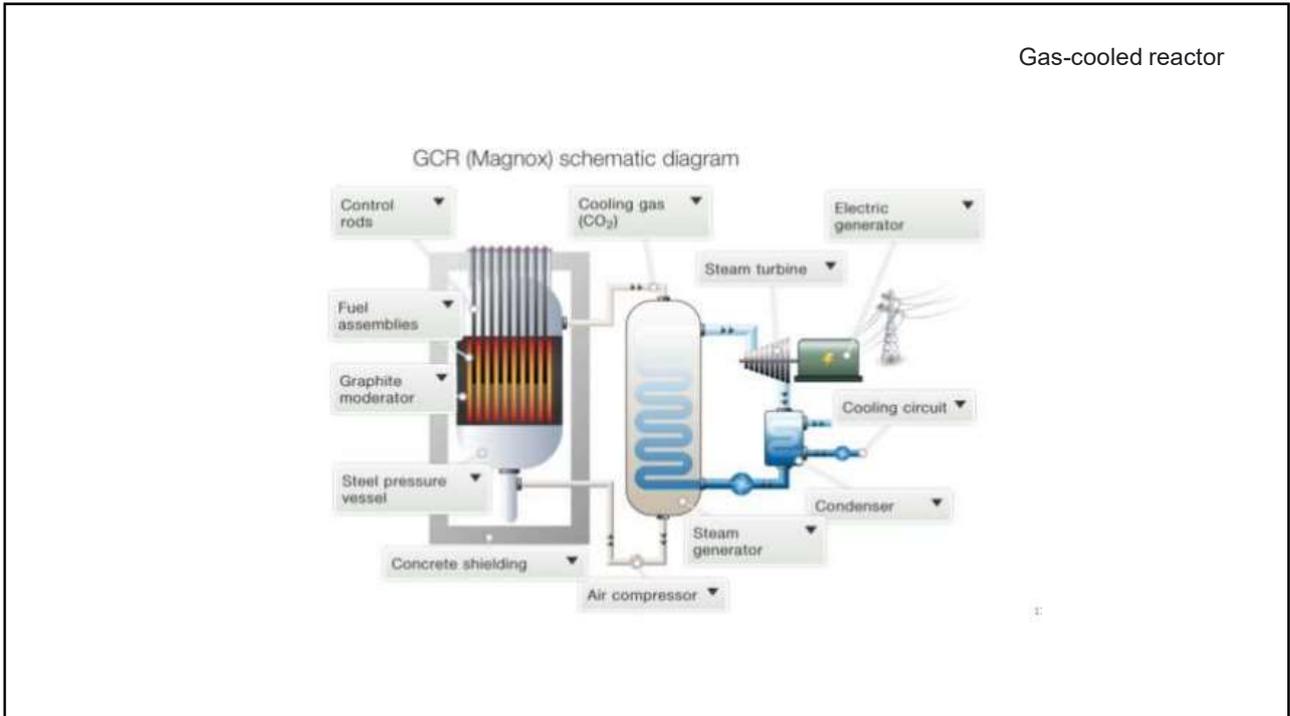
3

VVER ou WWER é um tipo de reator nuclear que começou a ser produzido na extinta União Soviética.



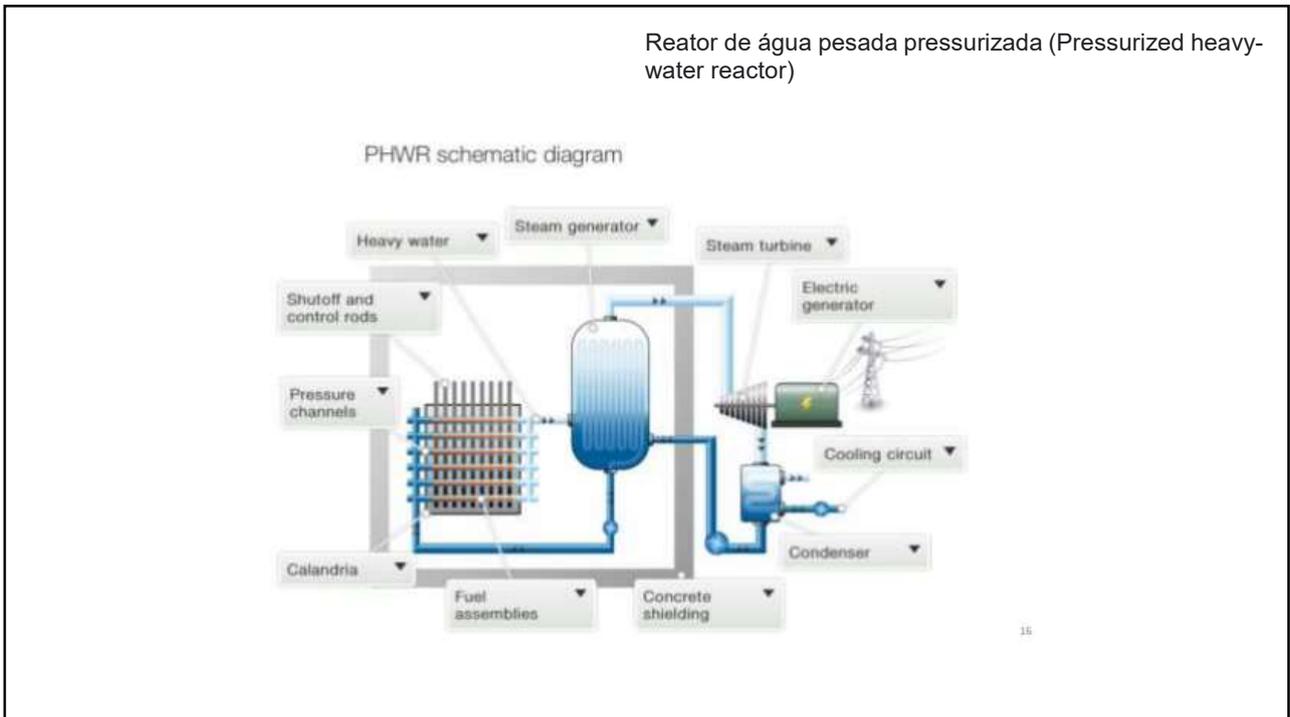
4

Gas-cooled reactor

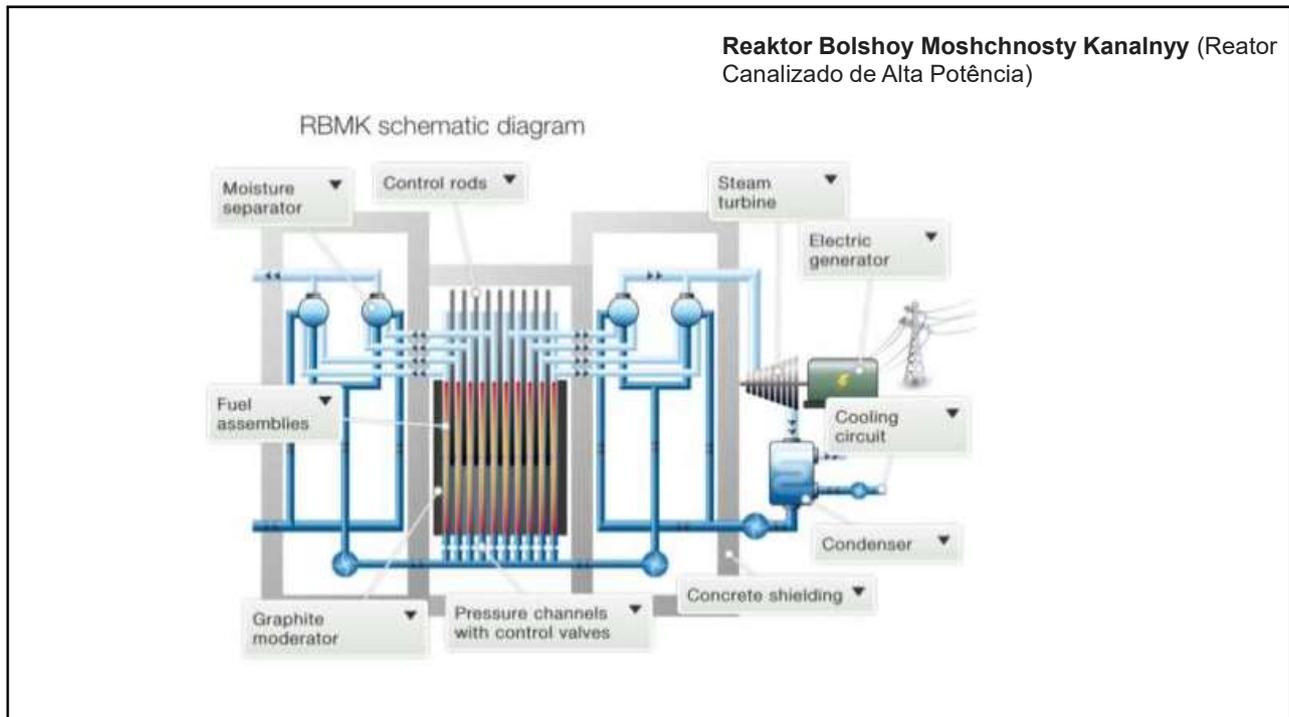


5

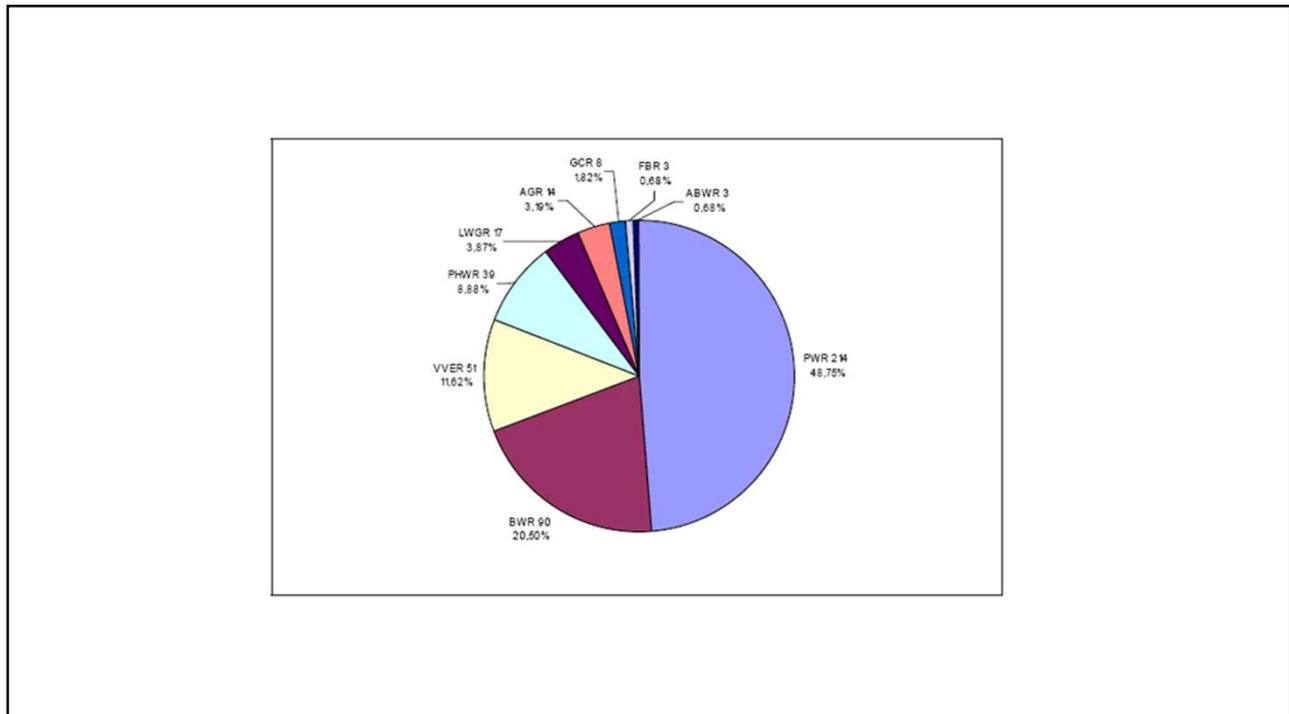
Reator de água pesada pressurizada (Pressurized heavy-water reactor)



6



7



8

THE LARGEST NUCLEAR POWER PLANTS
AROUND THE WORLD:

Power plant	Country	Power output
Kashiwazaki Kariwa	Japan	7.965 MWe
Bruce	Canada	6.152 MWe
Hanul	South Korea	5.881 MWe
Hanbit	South Korea	5.875 MWe
Zaporizhzhya Nuclear power station	Ukraine	5.700MWe

9



Japan
Kashiwazaki Kariwa

Canada
Bruce



10

South Korea

Nuclear Power Plants in South Korea

- Operating
- Planned

Seoul, Hanbit, Cheongju, Wolsong, Korea

Source: World Nuclear Association

Hanbit



Hanul



11



Ukraine
Zaporizhzhya Nuclear power station



Legend:
Type of reactors:
● VVER-1000
● VVER-440
Source: Energinet

12

Materiais para Reatores

13

Componentes e Materiais dos Reatores Nucleares

Componentes	Principais Materiais
Combustível Nuclear	urânio, plutônio e tório
Estruturais	Ligas de zircônio; aço inoxidável; ligas de alumínio; ligas de níquel; aço carbono
Moderador e refletor	Grafite, água leve e pesada, berílio
Elementos de controle	Carbeto de boro, cádmio, háfnio, ácido bórico, absorvedores queimáveis
Refrigerantes	Hélio, CO ₂ , H ₂ O, D ₂ O, metais líquidos
Blindagens	Elementos ou compostos de número atômico baixo, leve ou pesado
Sistemas de segurança	Sistemas de supressão de pressão, de resfriamento emergencial do núcleo; de monitoramento

14

Materiais Combustíveis

Função: Fonte de energia

Urânio (U): metálico e cerâmico

Plutônio (Pu): diluído no urânio na forma metálica ou cerâmica

Tório (Th): material fértil; ligas metálicas e compostos cerâmicos

15

Materiais Estruturais

Função: proporcionar confinamento físico do combustível, resistência mecânica e suporte estrutural aos componentes do reator

- Encamisante
- Vaso de Pressão
- Canais e tubos de refrigeração do combustível
- Placas de suporte do núcleo

16

Materiais Estruturais

Requisitos	Materiais
Baixa absorção (captura) de neutrons	Be, Mg, Zr, Al
Alta resistência mecânica e ductilidade	Aço carbono e aço inoxidável
Alta estabilidade sob irradiação	Mo, Ti, Ta, W
Boa resistência à corrosão em temperaturas elevadas	Grafite, concreto protendido
Boa condutividade térmica	Al, Mg
Baixa radioatividade induzida	BeO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂

17

Atributo do Encamisante (revestimento)*

- Tensão de escoamento adequado em T elevada e durante a irradiação
- Resistência à corrosão
- Estabilidade dimensional
- Propriedades mecânicas previsíveis
- Condutividade térmica elevada
- Boas propriedades neutrônicas
- Facilidade de fabricação e instalação
- Facilidade de reprocessamento
- Custo baixo
- Baixa demanda de recursos escassos



*o combustível deve ser protegido do refrigerante e vice-versa

18

Aproximadamente 90% dos Reatores a Fissão Atuais usam
Materiais do Revestimento a base de Zr



Revestimento/ Encamisante

19

Zircônio como Material Estrutural Nuclear

Vantagens	Desvantagens
Baixa seção de choque de absorção de nêutrons térmicos	Baixa condutividade térmica
Alto ponto de fusão	Baixa resistência à corrosão em temperaturas elevadas
Resistência mecânica alta em temperaturas elevadas	Custo relativamente alto
Boa resistência à corrosão (água e vapor)	Baixo coeficiente de expansão térmica
Conformabilidade e usinabilidade	
Disponibilidade razoável	

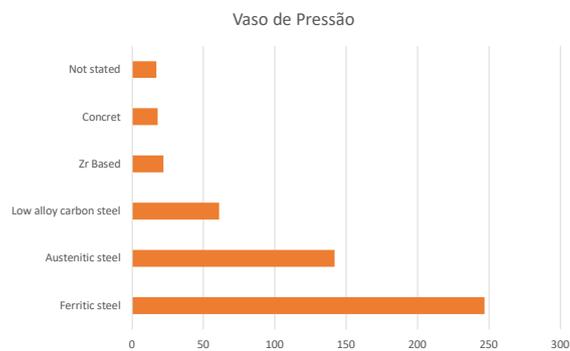
20

Alumínio como Material Estrutural Nuclear (Reator de Pesquisa)

Vantagens	Desvantagens
Absorção de nêutrons térmicos relativamente baixa	Baixo ponto de fusão
Condutividade térmica elevada	Resistência mecânica baixa em temperaturas elevadas
Alta estabilidade sob irradiação	
Boa resistência à corrosão (água e ar)	
Conformabilidade e soldabilidade	
Disponibilidade e baixo custo	

21

Aproximadamente 90% dos Reactores a Fissão Atuais usam Aço para o Vaso de Pressão



22

Atributos do material do moderador

- Seção de choque de espalhamento elevada
- Seção de choque de absorção baixa
- Perda de energia por colisão alta

23

Atributos dos Materiais das Barras de Controle

- Seção de choque de absorção elevada
- Resistência mecânica adequada para barras sólidas
- Baixa massa para permitir movimentação rápida
- Resistência à corrosão
- Estabilidades química e dimensional
- Baixo custo
- Boa capacidade de transferência de calor

24

Aproximadamente Metade dos Reatores à Fissão Atuais usa Barras de Controle a base de Boro



25

Atributos do refrigerante para reatores a fissão

- Condutividade Térmica elevada
- Calor Específico elevado
- Estabilidade (sob irradiação, à temperatura)
- Radioatividade Induzida baixa
- "Corrosividade" baixa

26

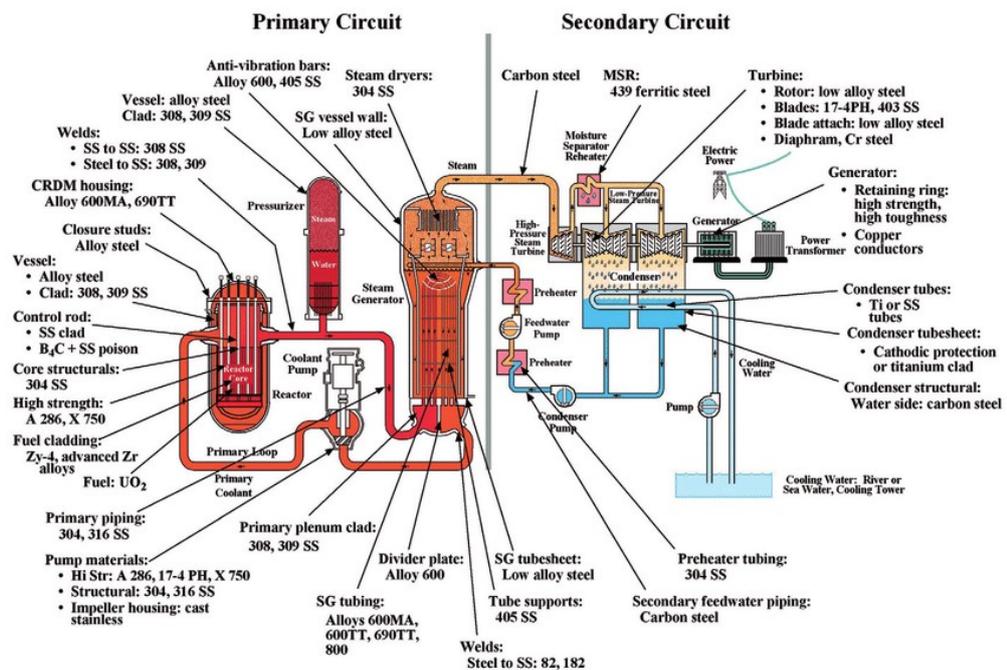
Atributos do Material de Blindagem

- Bom material de moderação
- Bom absorvedor de neutrons
- Densidade elevada para atenuar radiação gama

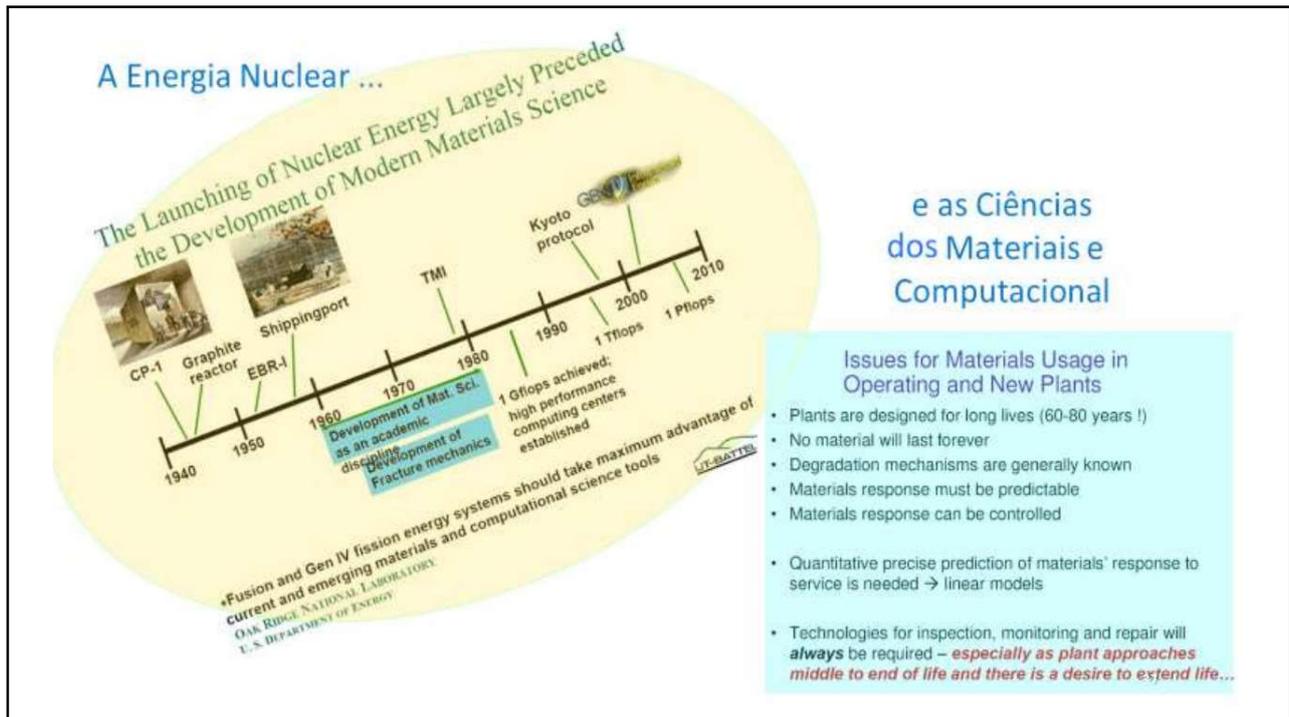
Possíveis Materiais: Cimentos e concretos; cerâmicas e cermets; vidros e sais fundidos; minerais; ligas metálicas e pós sinterizados; polímeros, etc

27

Materiais no PWR



28



29

Noções Básicas de Ciência e Engenharia de Materiais

- O Estado Sólido
- Classes de Materiais
- Estrutura Cristalina
- Imperfeições nos Sólidos
- O Fenômeno da Difusão
- Discordâncias e outros Defeitos
- Técnicas Experimentais para a Micro- e Nanoestrutura
- Testes Mecânicos (Tração, Fluência e Impacto)
- Degradação dos Materiais (Corrosão e Oxidação)

30

Sólidos – a grande imagem

Estrutura eletrônica

- Átomo de Bohr
- Bohr – Sommerfeld
- Números quânticos
- Princípio aufbau (construção)
- Átomos com multi-elétrons
- Padrões da Tabela Periódica
- Estabilidade dos octetos

Classificação dos sólidos:

- Tipo de Ligação
- Arranjo Atômico



Ligação

Primária:

- Iônica
- Covalente
- Metálica

Secundária:

- van der Waals
- dipolo-dipolo
- dispersão de London
- hidrogênio

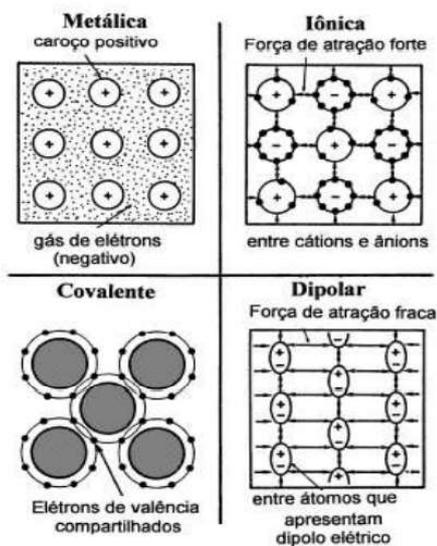


Estado de agregação

- Gás
- Líquido
- Sólido

31

LIGAÇÕES QUÍMICAS



32

1	1 H 1,01																	2 He 4,003													
2	3 Li 6,94	4 Be 9,01											5 B 10,81	6 C 12,01	7 N 14,01	8 O 16,00	9 F 19,00	10 Ne 20,18													
3	11 Na 23,00	12 Mg 24,31																	13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,97	16 S 32,06	17 Cl 35,45	18 Ar 39,95							
4	19 K 39,10	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,90	23 V 50,94	24 Cr 52,00	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,93	28 Ni 58,71	29 Cu 63,54	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,92	34 Se 78,96	35 Br 79,91	36 Kr 83,80													
5	37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,91	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,94	43 Tc (99)	44 Ru 101,1	45 Rh 102,9	46 Pd 106,4	47 Ag 107,9	48 Cd 112,4	49 In 114,8	50 Sn 118,7	51 Sb 121,8	52 Te 126,6	53 I 126,9	54 Xe 131,3													
6	55 Cs 132,9	56 Ba 137,3	57 La 138,9	72 Hf 178,5	73 Ta 180,9	74 W 183,8	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,1	79 Au 197,0	80 Hg 200,6	81 Tl 204,4	82 Pb 207,2	83 Bi 209,0	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)													
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)																												
6																		58 Ce 140,1	59 Pr 140,9+	60 Nd 144,2	61 Pm (147)	62 Sm 150,4	63 Eu 152,0	64 Gd 157,3	65 Tb 158,9	66 Dy 162,5	67 Ho 164,9	68 Er 167,3	69 Tm 168,9	70 Yb 173,0	71 Lu 175,0
7																		90 Th 223,0	91 Pa (231)	92 U 238,0	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm 247	97 Bk (249)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (245)	103 Lw (256)

33

Classes de Materiais

34

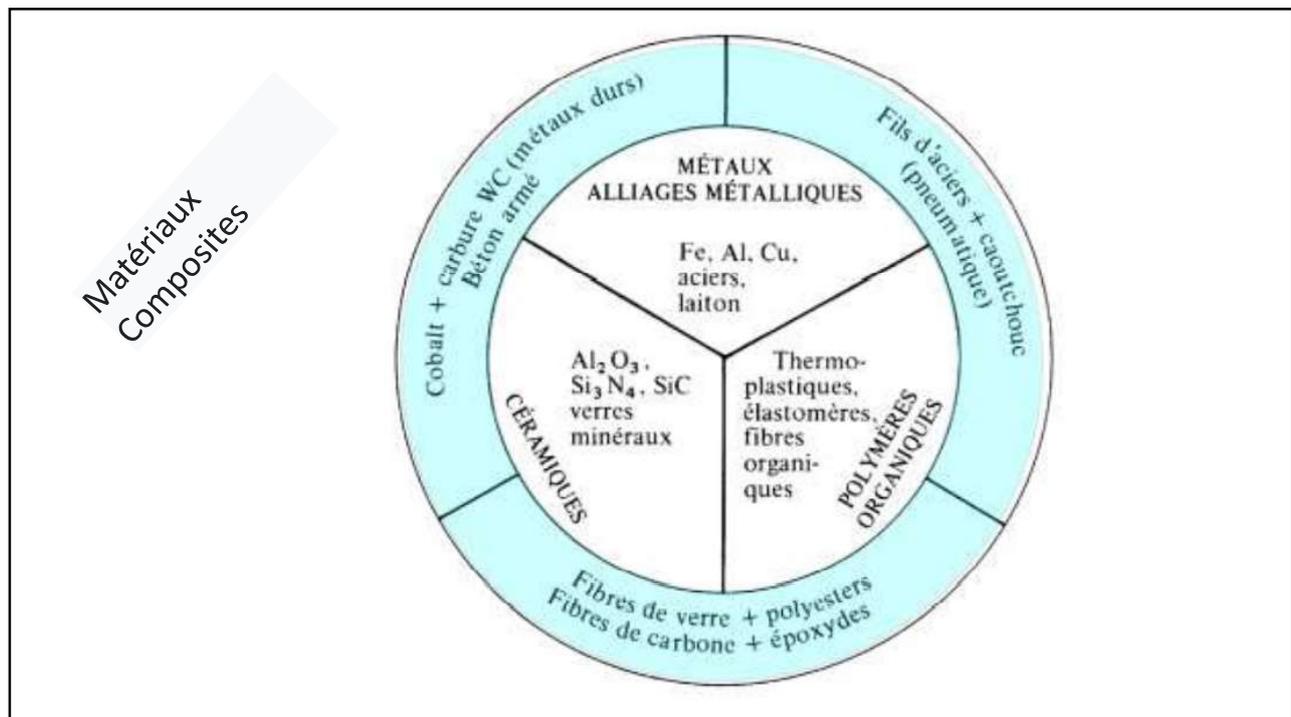
Os materiais e os tipos de ligação

Materiais Cerâmicos: apresentam caráter iônico predominante. Entretanto, mesmo nestes casos, eles apresentam um certo grau de covalência. Outros materiais cerâmicos, tais como carbeto de silício, nitreto de silício e nitreto de boro, apresentam caráter covalente predominante.

Materiais Poliméricos: ligação covalente entre átomos e ligações secundárias entre cadeias.

Materiais Metálicos: embora sempre apresentem caráter metálico predominante, exibem um certo caráter covalente. Quanto menor o número de elétrons de valência do átomo metálico, maior será a predominância da ligação metálica.

35



36

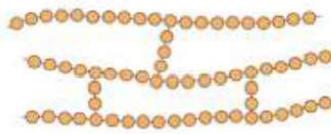
Estruturas Moleculares Poliméricas



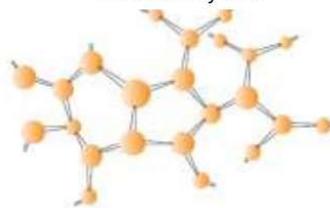
Cadeia Linear



Cadeia Ramificada



Cadeia Entrelaçada



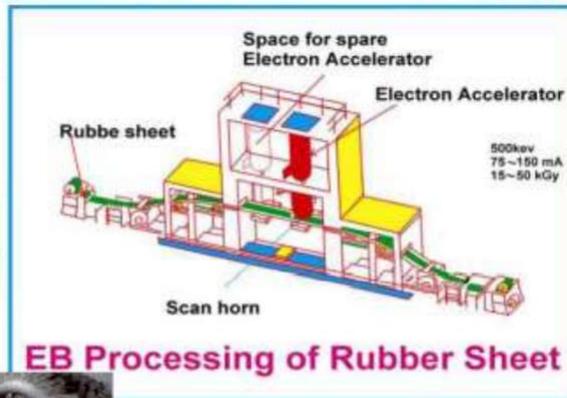
Cadeia em Rede

37

IRRADIATION OF TIRES COMPONENTES



Japan: Automobiles tires = 95%



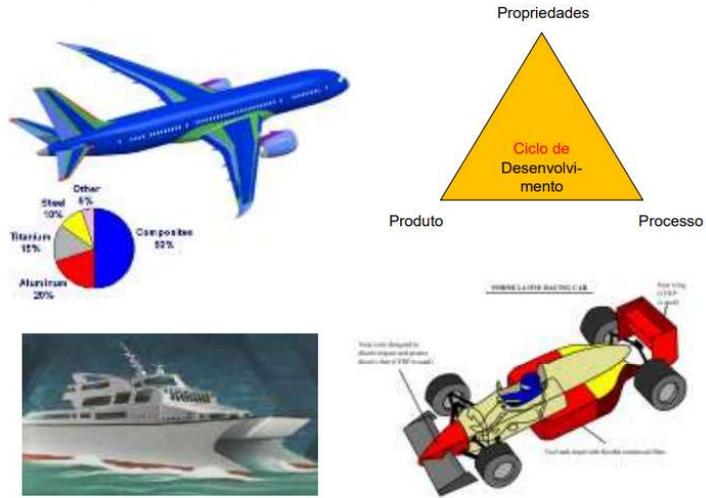
EB Processing of Rubber Sheet



BRAZIL: Bridgestone Fireston

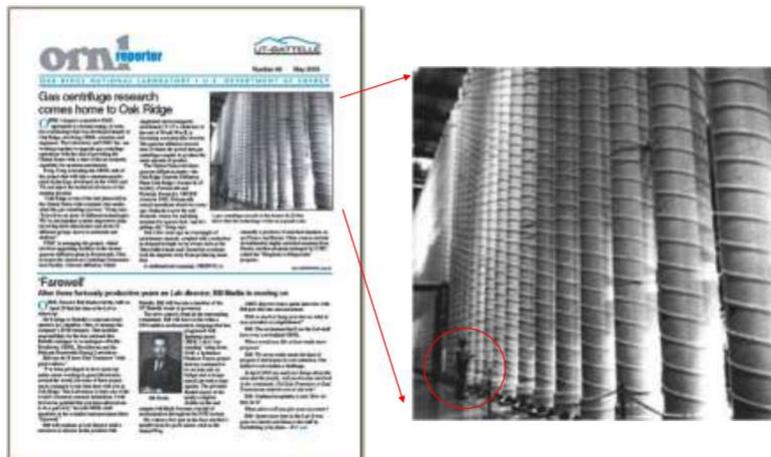
38

Os materiais compósitos

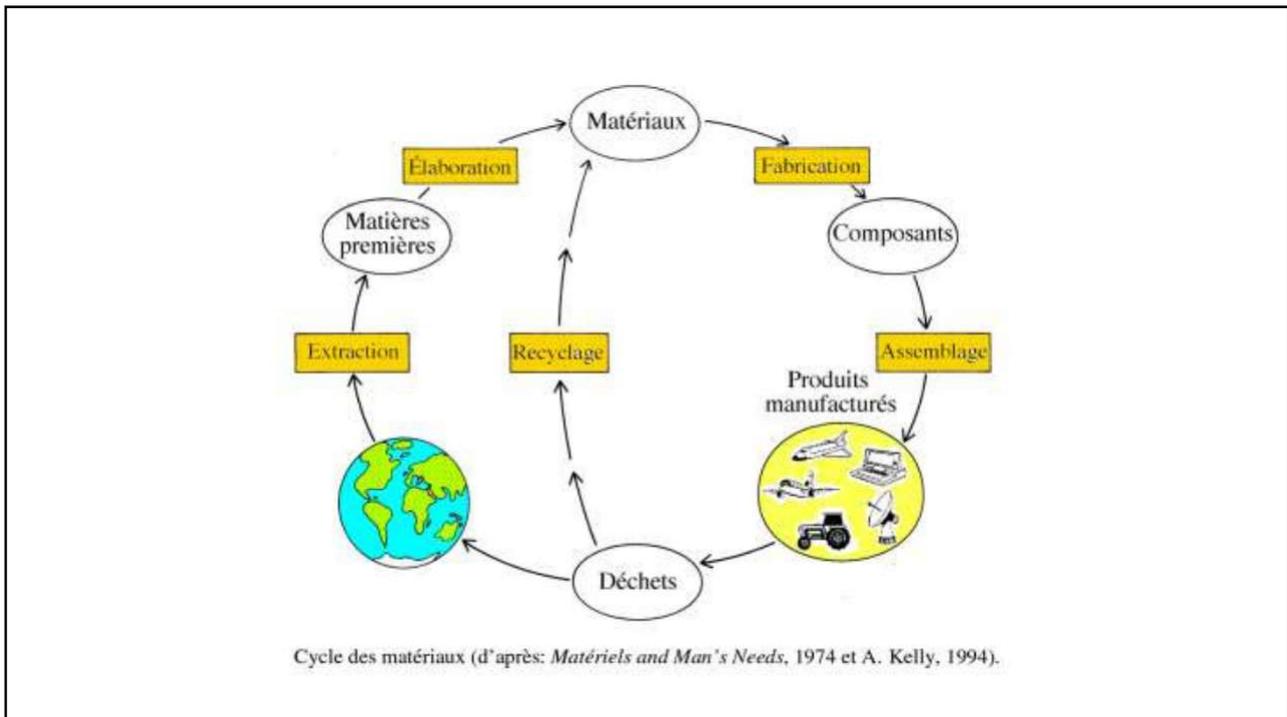


39

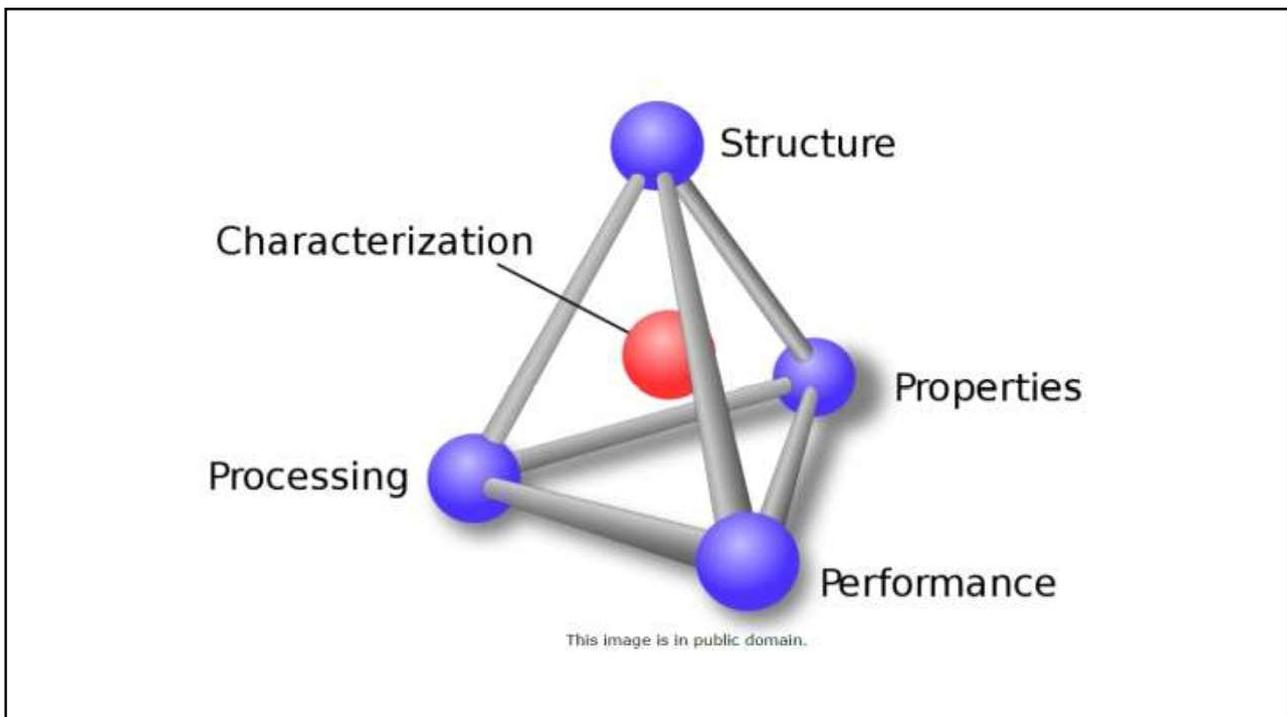
Os materiais compósitos



40



41

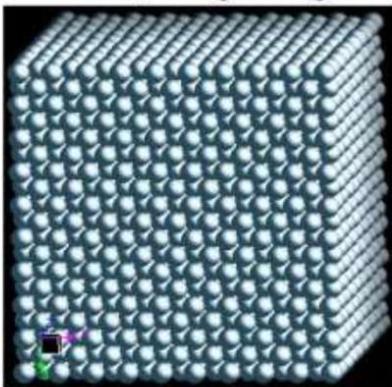


42

Estado Cristalino

43

- Periodic, long-range ordered structures



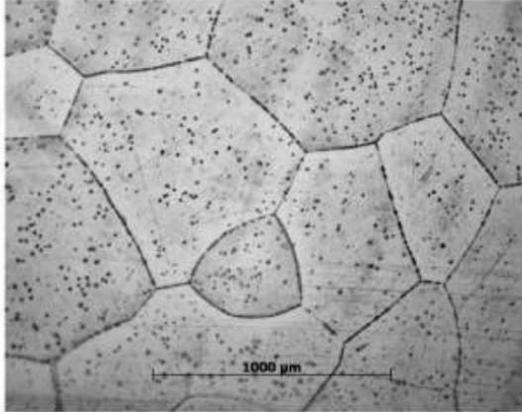
© John Wiley & Sons. All rights reserved. This content is excluded from our Creative Commons license. For more information, see <http://ocw.mit.edu/help/faq-fair-use/>.

Face centered cubic calcium
crystal structure



Single crystals of calcium metal
under kerosene

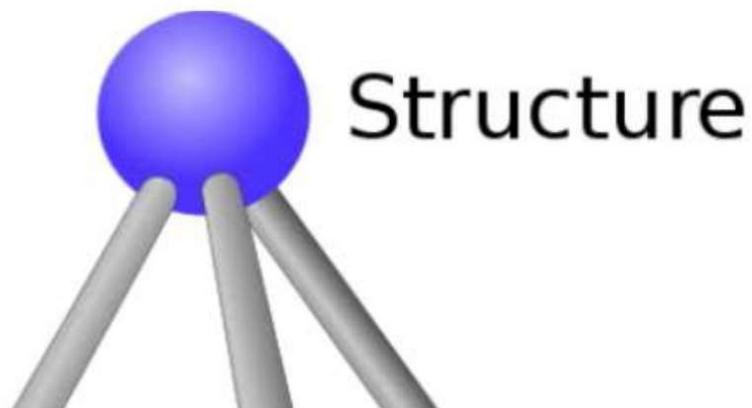
44



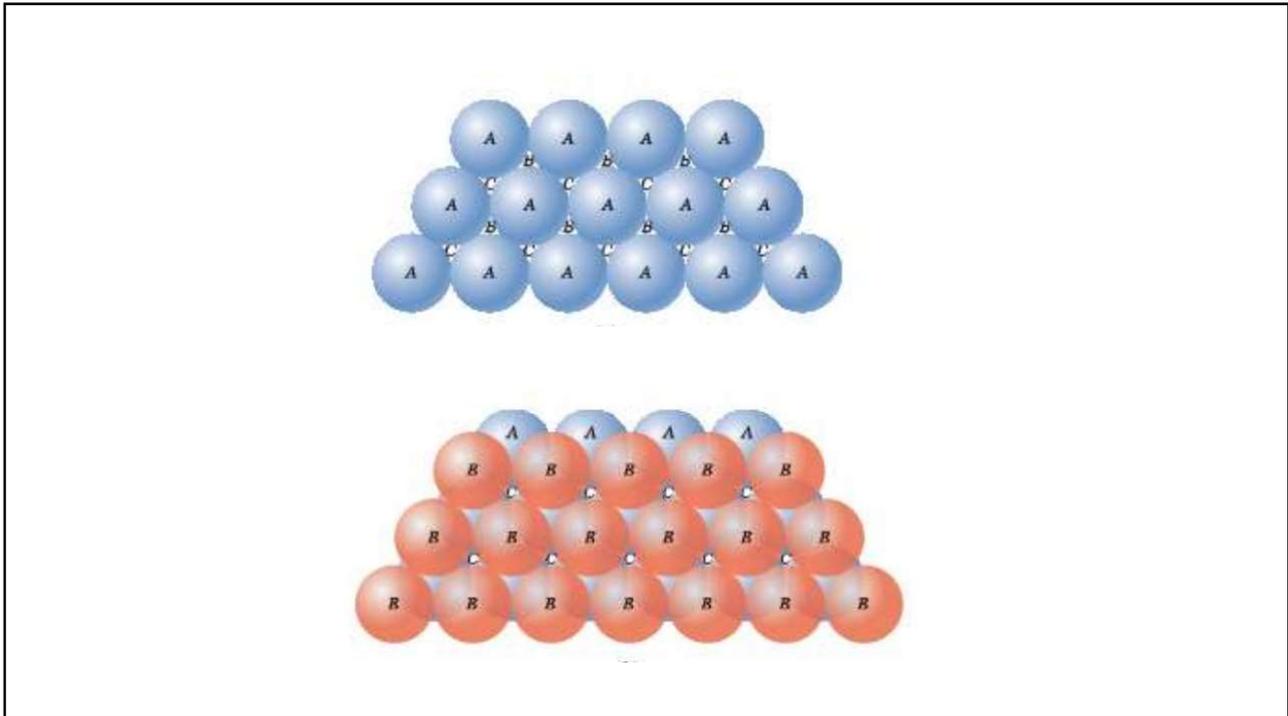
Fe-12Cr-2Si ferritic alloy grains, 50x, etched with Kalling's reagent

- Most metals are granular in nature
- **Grains** are single crystals
- **Grain boundaries** separate them

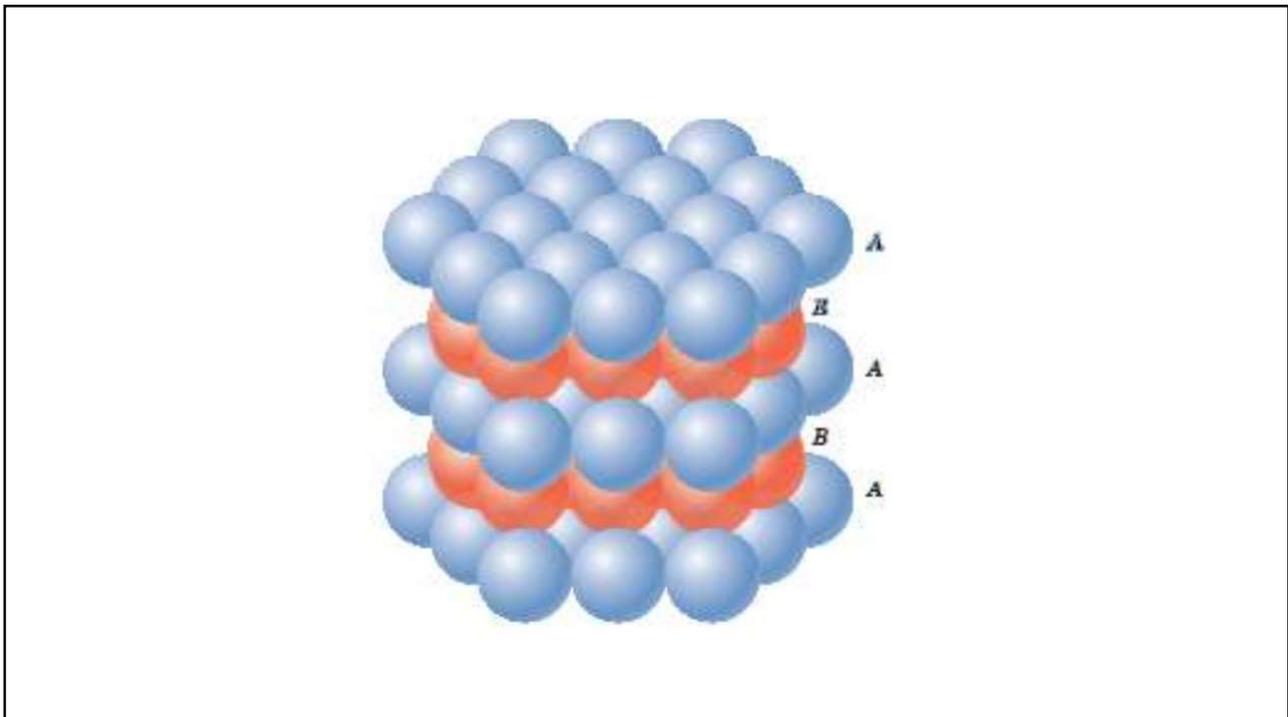
45



46

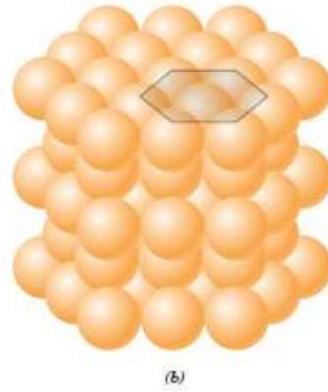
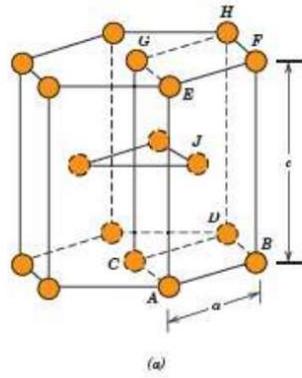


47



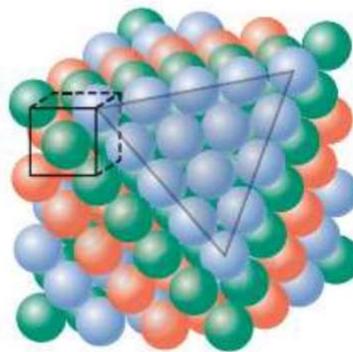
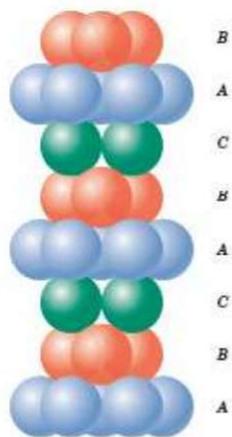
48

Hc



49

CFC



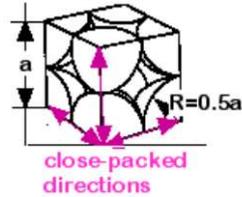
50

Fator de Empacotamento Atômico (FEA)

$$\text{APF} = \frac{\text{Volume of atoms in unit cell}^*}{\text{Volume of unit cell}}$$

*assume hard spheres

For simple cubic structure. . .



contains $8 \times 1/8 = 1$ atom/unit cell

APF = 0.52 for simple cubic

$$\text{APF} = \frac{1 \frac{4}{3} \pi (0.5a)^3}{a^3}$$

atom
unit cell

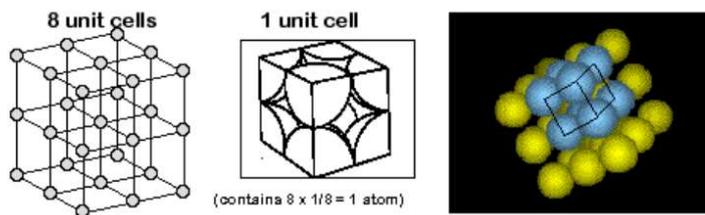
volume
atom

volume
unit cell

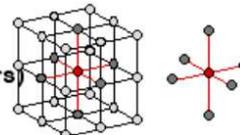
51

Estrutura Cúbica Simples (CS)

- Rare due to poor packing (only Po):

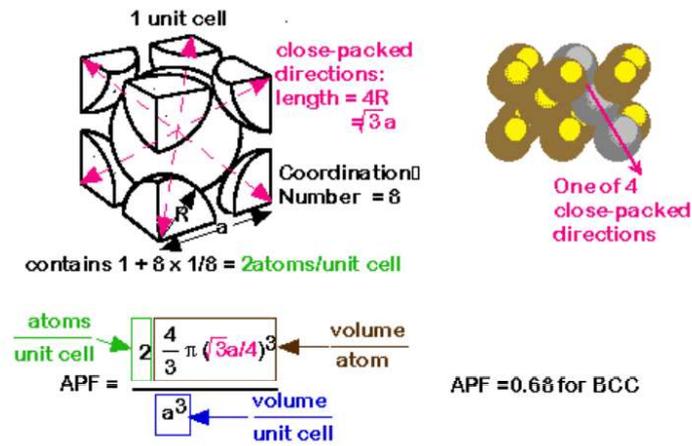


- Coordination Number = 6
(number of nearest neighbors)



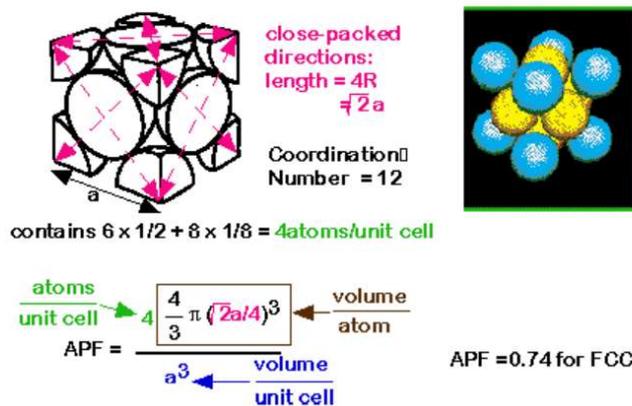
52

Estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC)



53

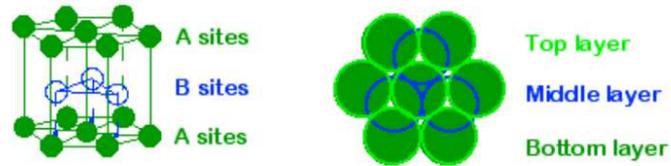
Estrutura Cúbica de Face Centrada (CFC)



54

Estrutura Hexagonal Compacta (HC)

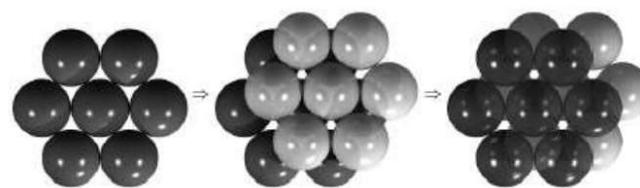
ABABAB...Stacking Sequence



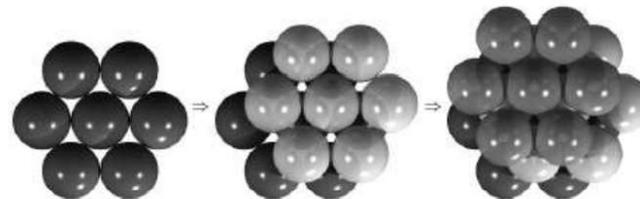
Coordination Number = 12

APF = 0.74 for HCP

55

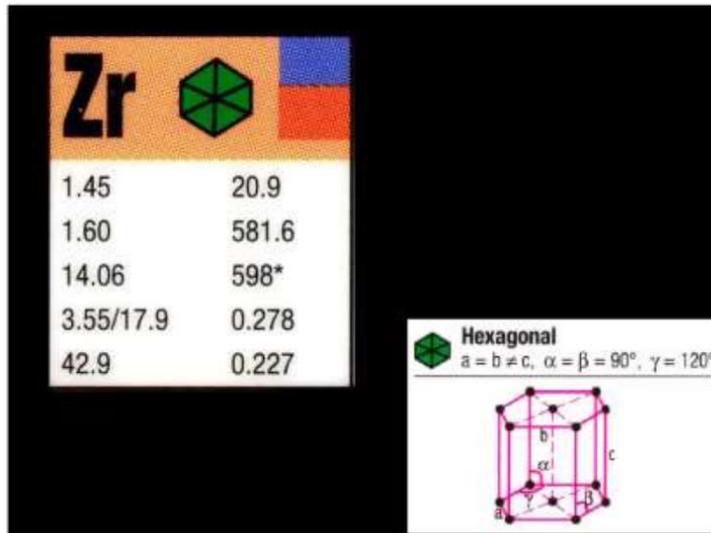


(a) Hexagonal close-packed lattice



(b) Face-centred cubic lattice

56



57

Table 3.1 Atomic Radii and Crystal Structures for 16 Metals

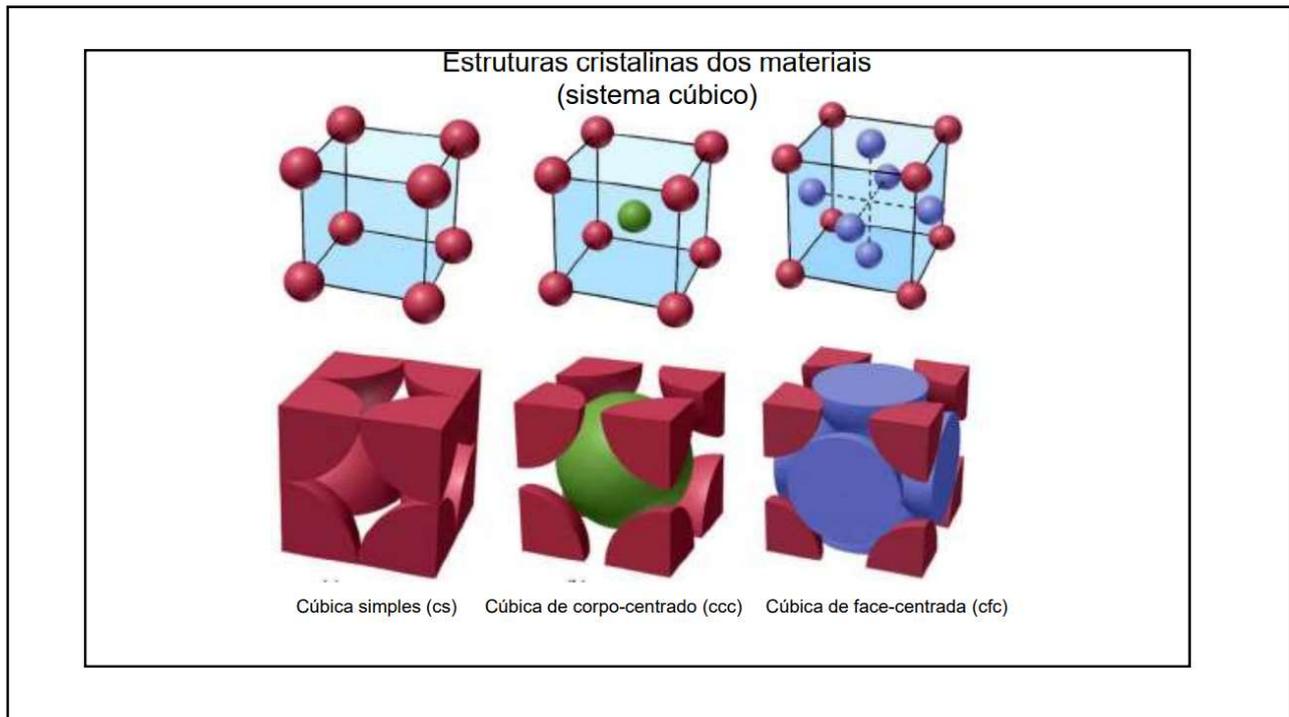
<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure^a</i>	<i>Atomic Radius^b (nm)</i>	<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure</i>	<i>Atomic Radius (nm)</i>
Aluminum	FCC	0.1431	Molybdenum	BCC	0.1363
Cadmium	HCP	0.1490	Nickel	FCC	0.1246
Chromium	BCC	0.1249	Platinum	FCC	0.1387
Cobalt	HCP	0.1253	Silver	FCC	0.1445
Copper	FCC	0.1278	Tantalum	BCC	0.1430
Gold	FCC	0.1442	Titanium (α)	HCP	0.1445
Iron (α)	BCC	0.1241	Tungsten	BCC	0.1371
Lead	FCC	0.1750	Zinc	HCP	0.1332

^aFCC = face-centered cubic; HCP = hexagonal close-packed; BCC = body-centered cubic.

Tradução:

CFC – Cúbica de Face Centrada
 CCC – Cúbica de Corpo Centrado
 HCP – HC – Hexagonal Compacta

58



59

**Porque as estruturas cristalinas são importantes
(para os materiais nucleares e outros)**

Célula Unitária:
Menor unidade translacional da "rede espacial" que reproduz um cristal macroscópico

Fenômenos nucleares:

- Inchamento (void swelling):** Os aços inoxidáveis (Fe, Cr, Ni) incham, Zircalloys e aços ferríticos (Fe, Cr) apresentam *inchamento limitado* – devido às suas estruturas cristalinas
- Crescimento sob irradiação:** Zr, grafite e U – devido à anisotropia da estrutura cristalina

BRASIL
1956 2000 2022

60

Estrutura Cristalina dos Elementos

Estrutura Cristalina dos Elementos																					
H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	V	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba			Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Fr	Ra			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo			
Lanthanides and Actinides																					
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr							