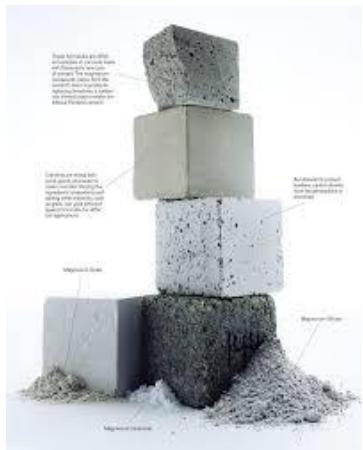


Materials and Sustainability



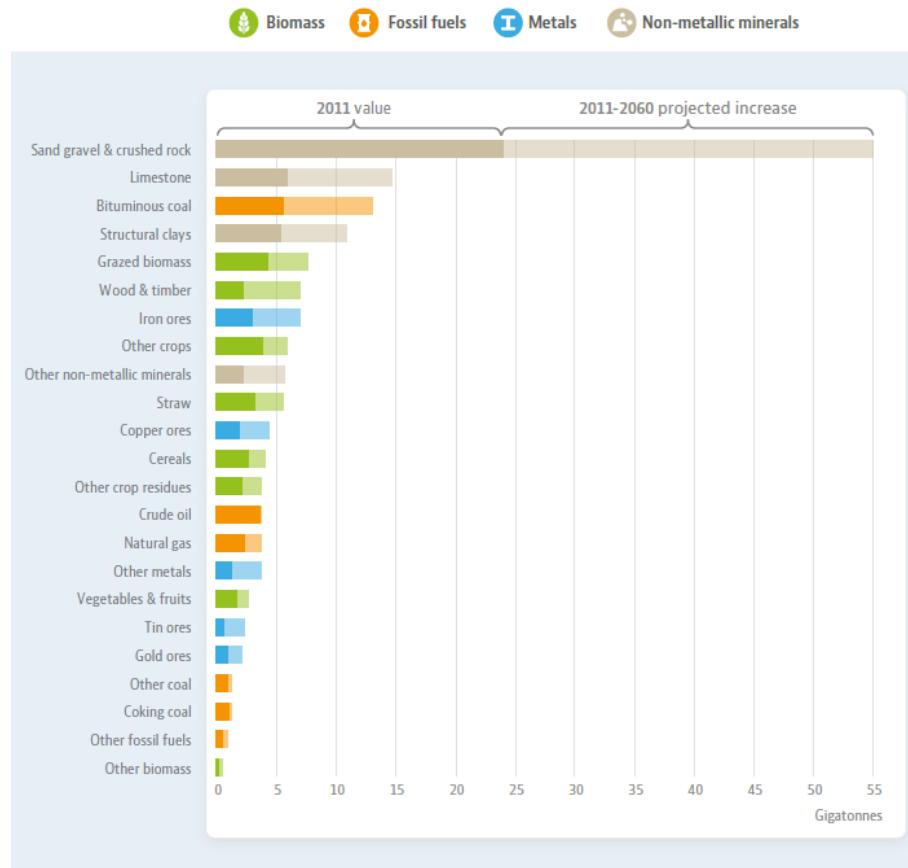
Materials and Sustainability



Materials and Sustainability

Consumo de matérias-primas

Estima-se que o consumo de materiais mais do que duplique até 2060, passando dos 79 Gt em 2011 para 167 Gt em 2060.

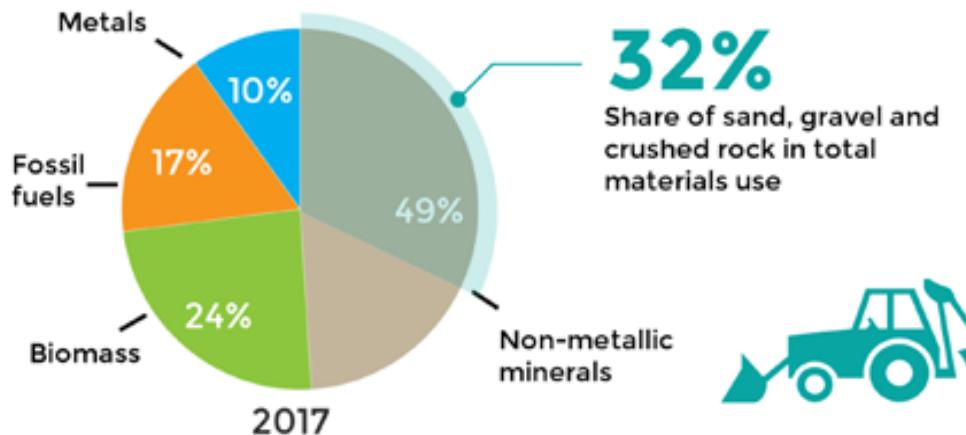
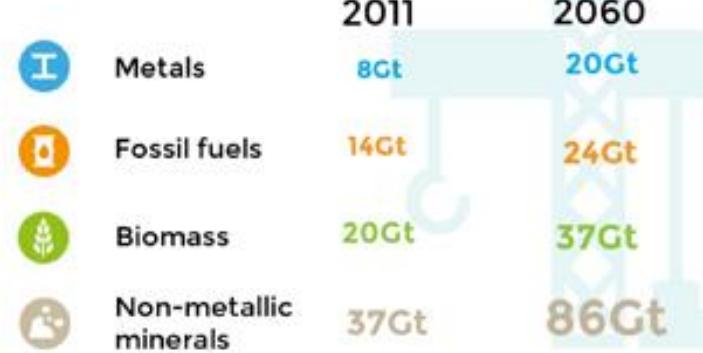


Fonte: "Global material resources outlook to 2060", OCDE (2018).

Materials and Sustainability

Consumo de matérias-primas

Materials use increase

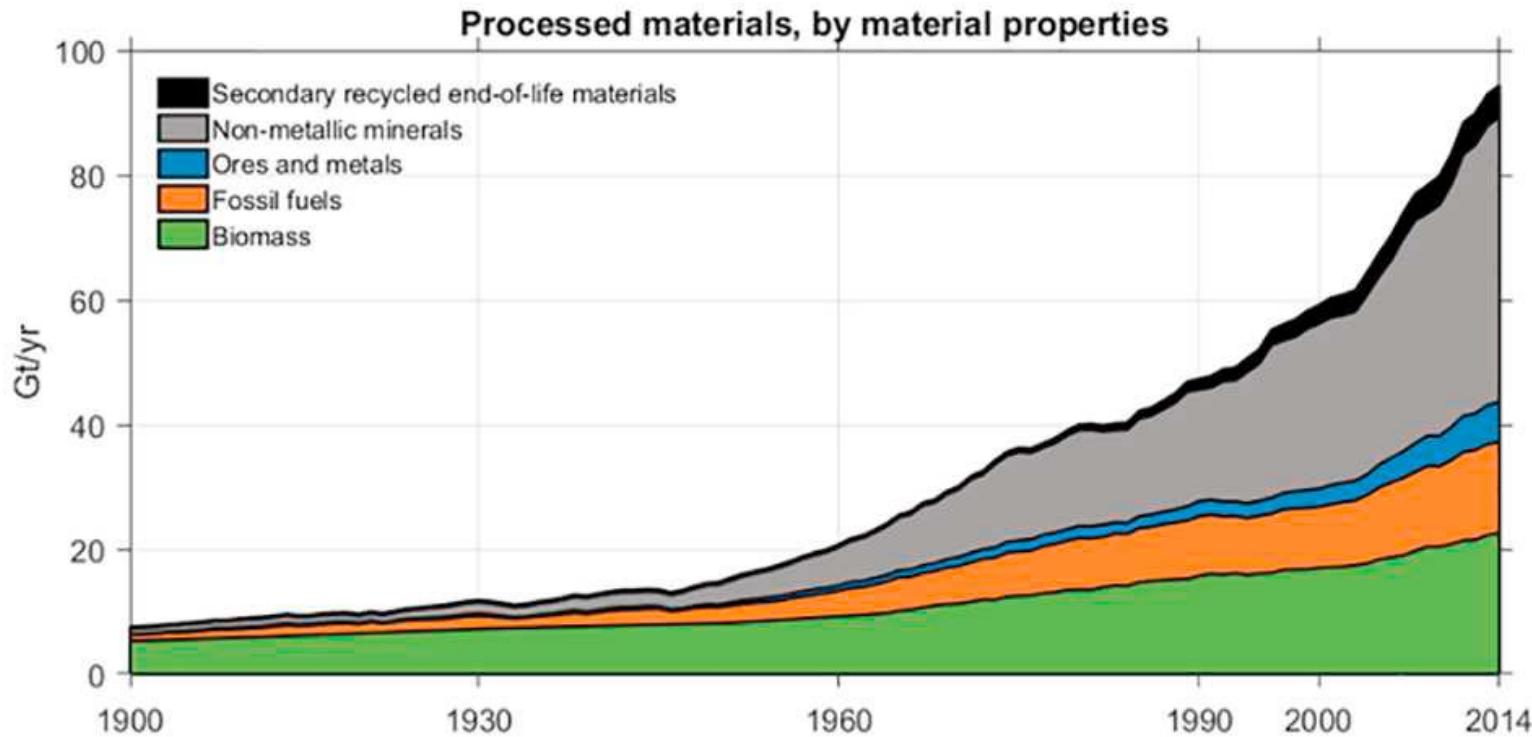


Construction materials use stabilises in China after 2025



Materials and Sustainability

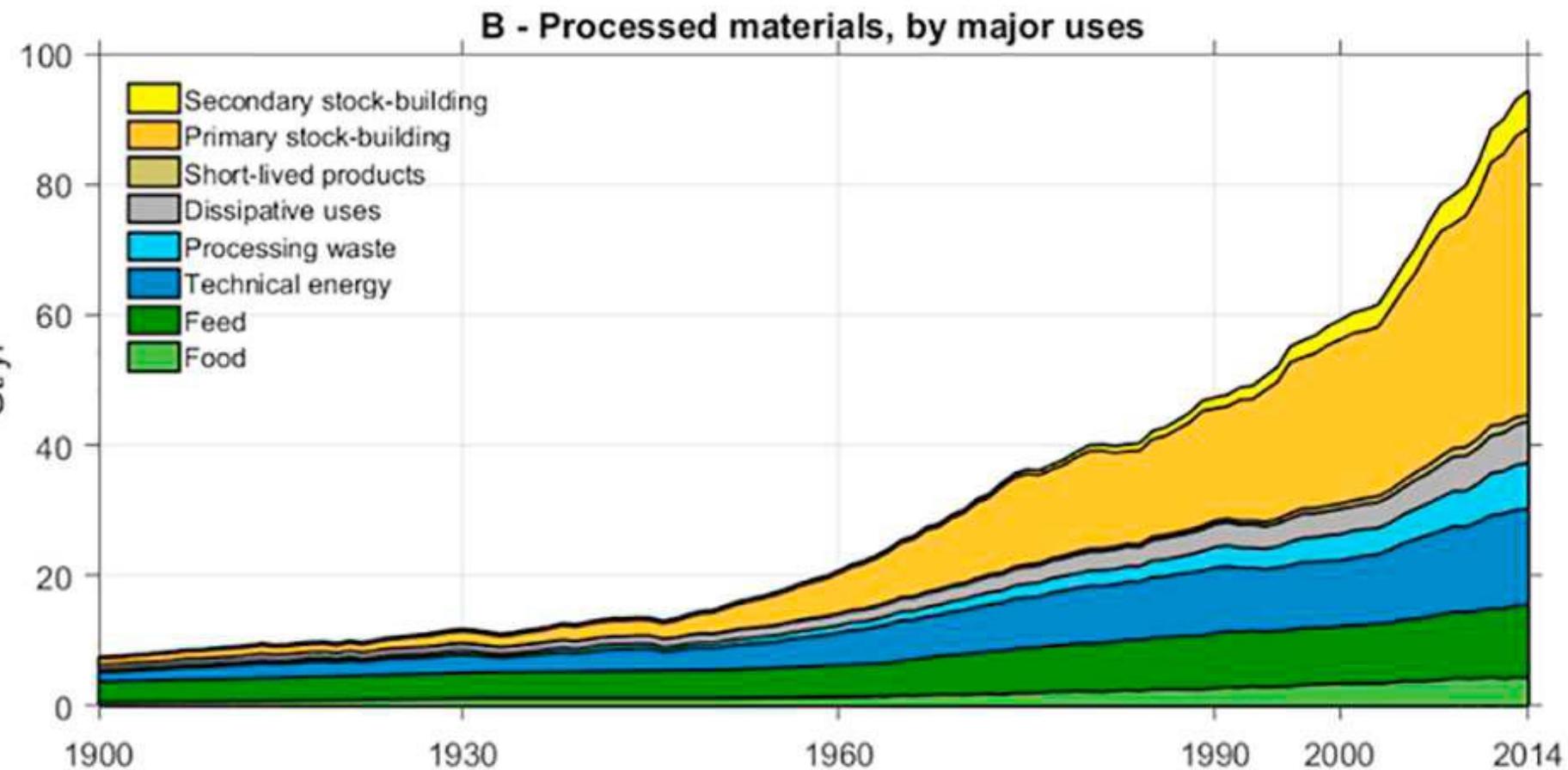
Materiais, por propriedades



“End-of-life recycled materials only make up 6% of all materials processing in 2014,
indicating a continuously low degree of material loop closing”

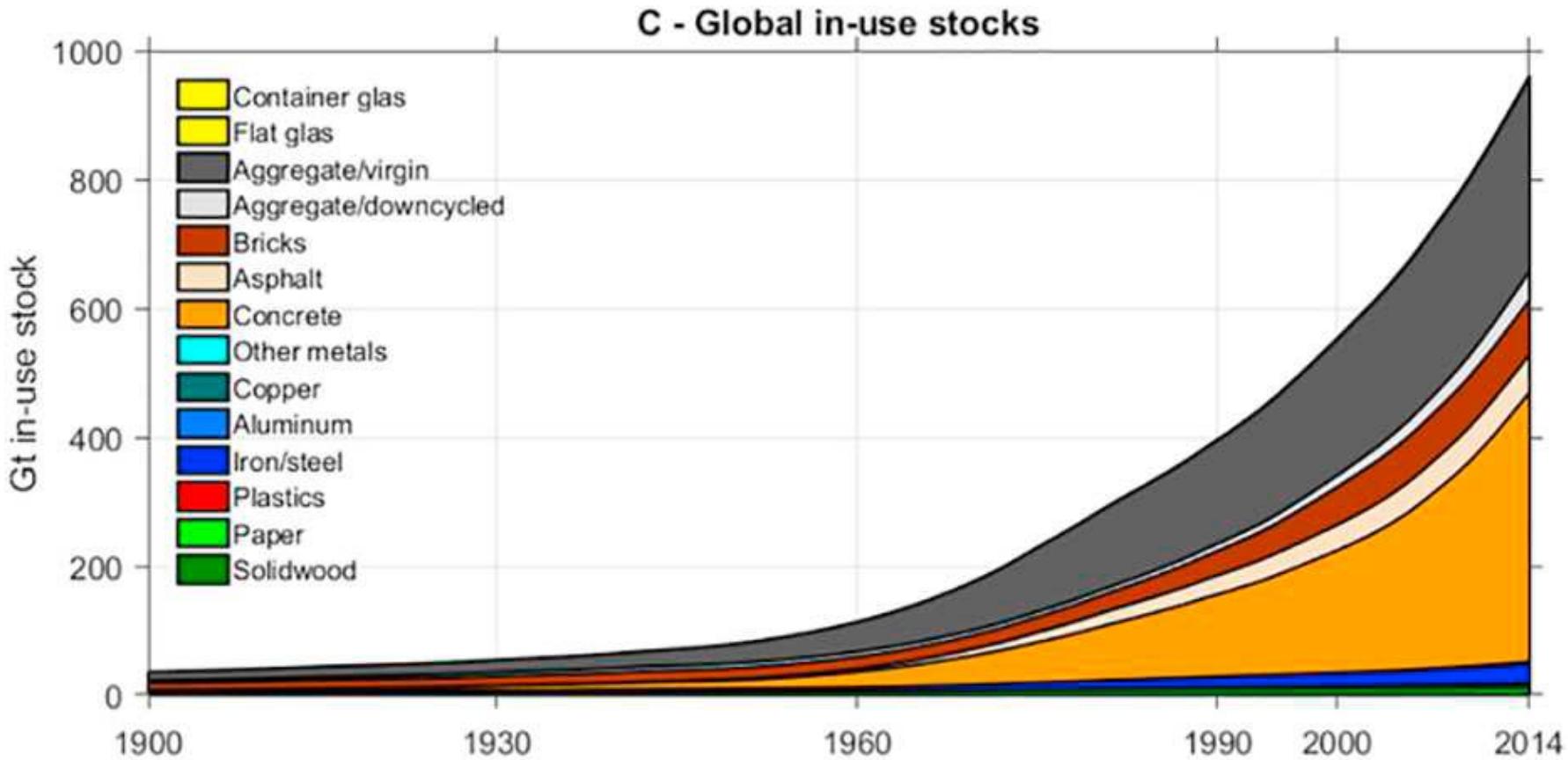
Materials and Sustainability

Materiais, principal utilização



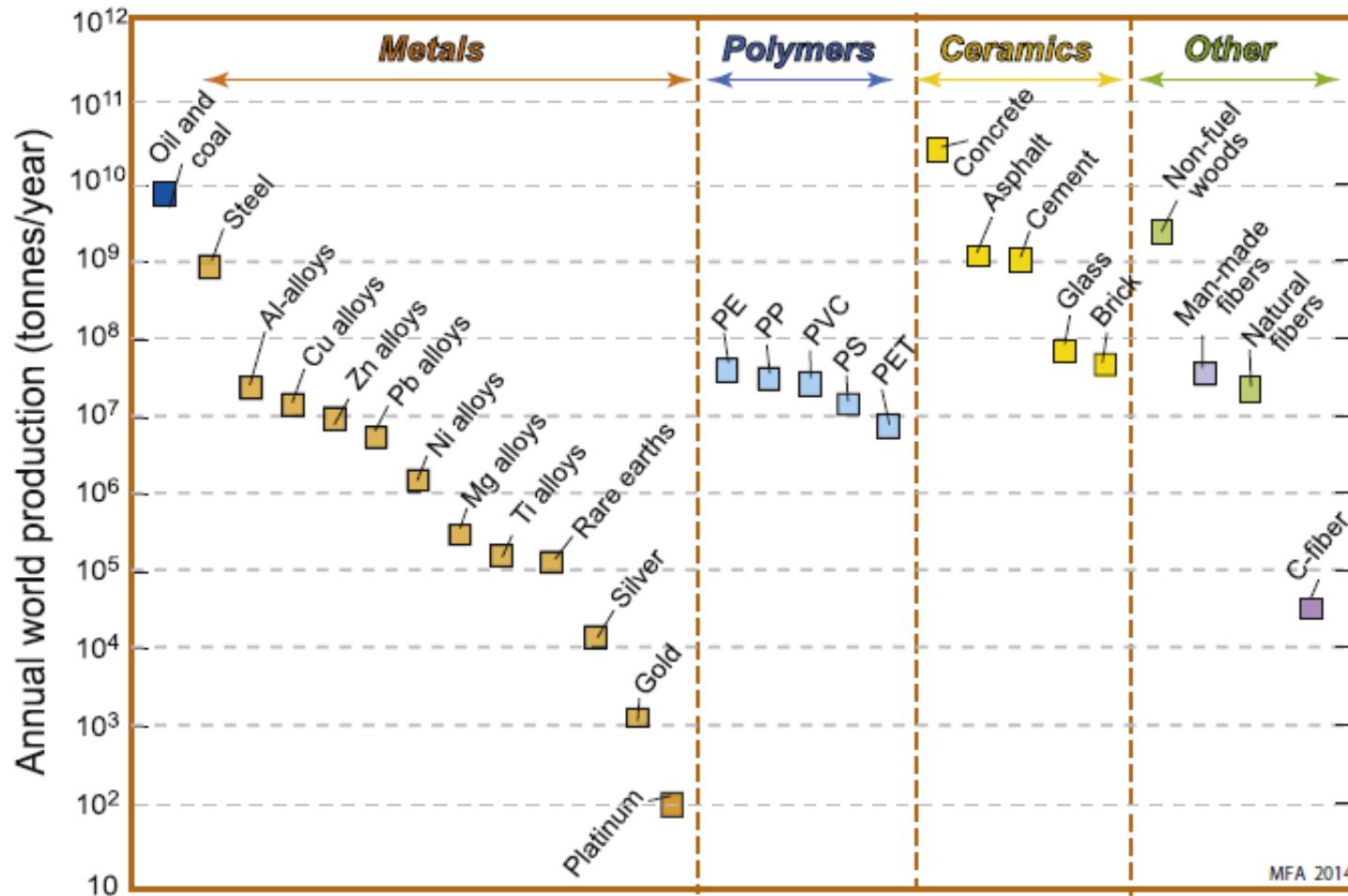
Materials and Sustainability

Materiais, tipologia



Materials and Sustainability

Produção anual de alguns materiais



Materials and Sustainability

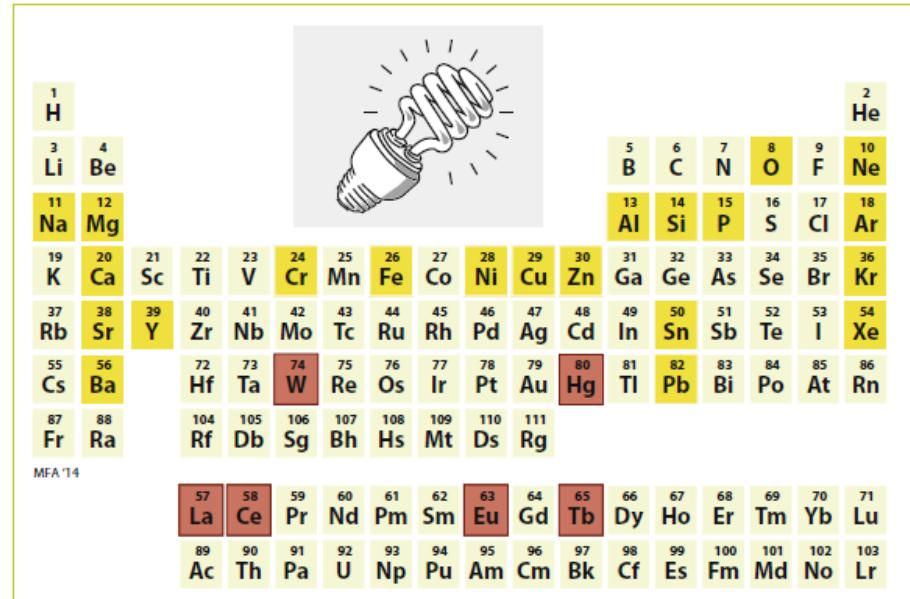
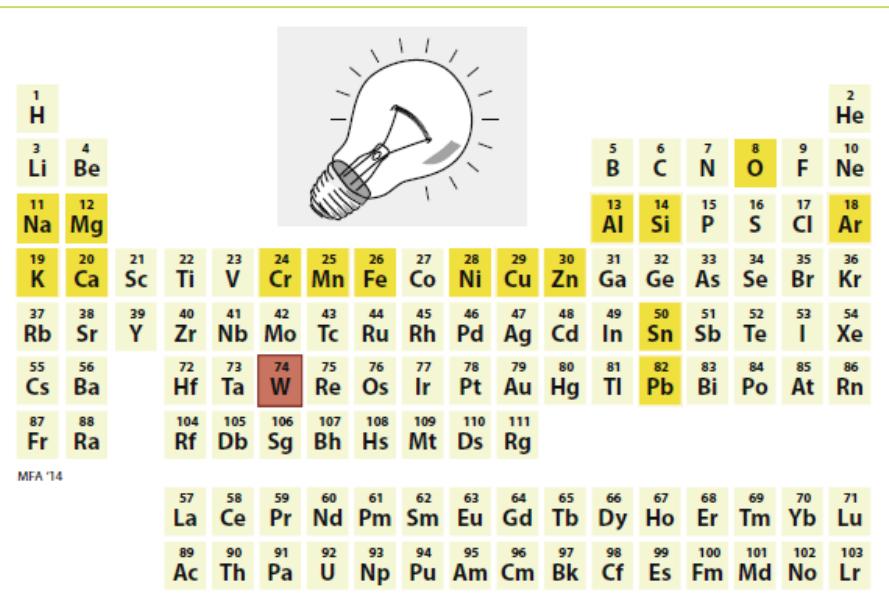
O desenvolvimento de materiais com maior funcionalidade tem um custo associado...

Table 1.2 The Increasing Diversity of Elements Used in Materials and Devices over the Past 75 Years

Alloys and Devices	Changing Demand for Elements over Time	
	75 Years Ago	Today
Iron-based alloys*	Fe, C	Al, Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Nb, Ni, Si, Ta, Ti, V, W
Aluminum alloys*	Al, Cu, Si	Al, Be, Ce, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Si, I, V, Zn, Zr
Nickel alloys*	Ni, Cr	Al, B, Be, C, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Si, Ta, Ti, W, Zr
Copper alloys*	Cu, Sn, Zn	Al, Be, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Nb, P, Pb, Si, Sn, Zn
Magnetic materials*	Fe, Ni, Si	Al, B, Co, Cr, Cu, Dy, Fe, Nd, Ni, Pt, Si, Sm, V, W
Displays	W	Eu, Ge, Ne, Si, Tb, Xe, Y
(Micro) electronics	Cu, Fe, W	As, Ga, In, Sb, Si
Low-C energy (Solar, Wind)	Cu, Fe	Ag, Dy, Ga, Ge, In, Li, Nd, Pd, Pt, Re, Se, Si, Sm, Te, Y

Materials and Sustainability

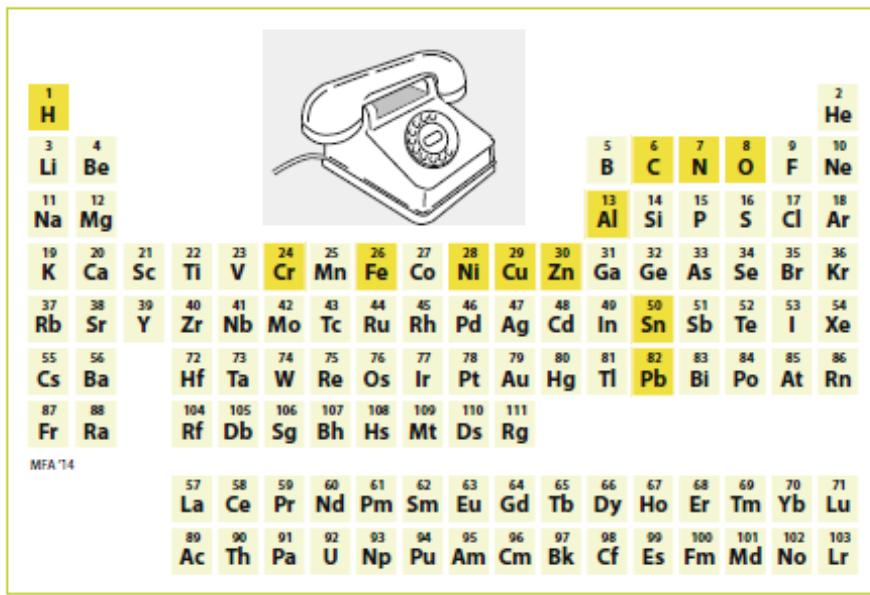
Funcionalidade vs complexidade



Nota: os materiais críticos encontram-se assinalados a vermelho.

Materials and Sustainability

Funcionalidade vs complexidade



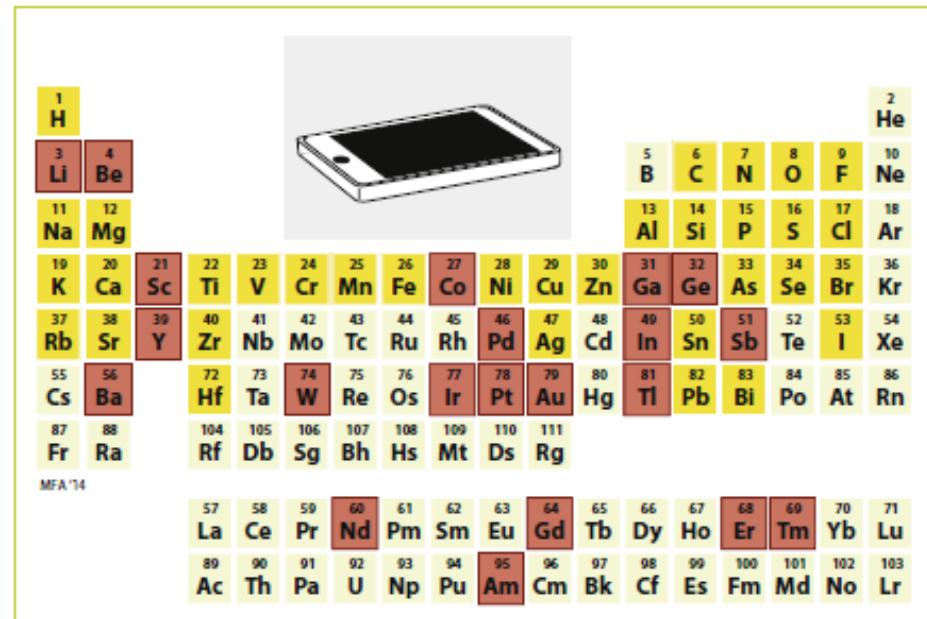
Telefone dos anos 60:

12 elementos.



Smartphone:

55 elementos, dos quais **21** são
considerados “críticos”!



Materials and Sustainability

As matérias-primas provenientes de fontes não renováveis, são finitas e o aumento sem precedentes da sua extração/consumo leva a receios acerca da sua disponibilidade num futuro próximo.



Escassez de matérias-primas??

Materials and Sustainability

➤ Escassez futura dos materiais, exploração exaustiva

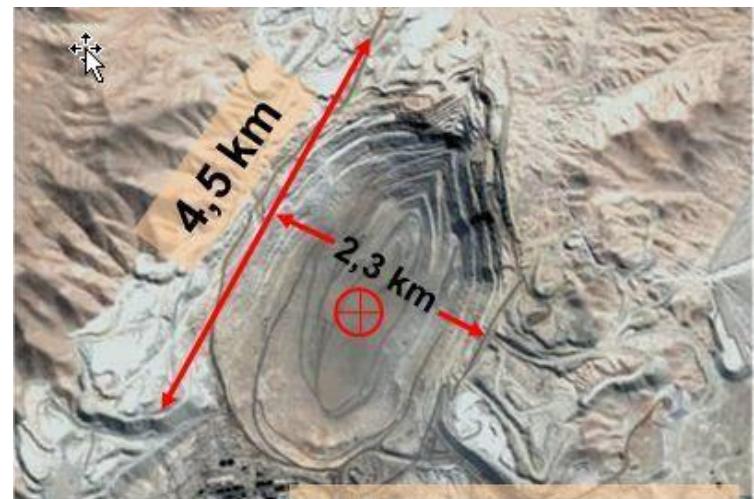
Falando de uma forma global, nós consumimos cerca de 10^{10} toneladas de materiais de engenharia por ano, o que dá uma média de 1,5 ton/pessoa.



Mina de Chuquicamata (Chile) é uma das maiores minas de cobre a céu-aberto do mundo.

Materials and Sustainability

➤ Mina de Chuquicamata (Chile)



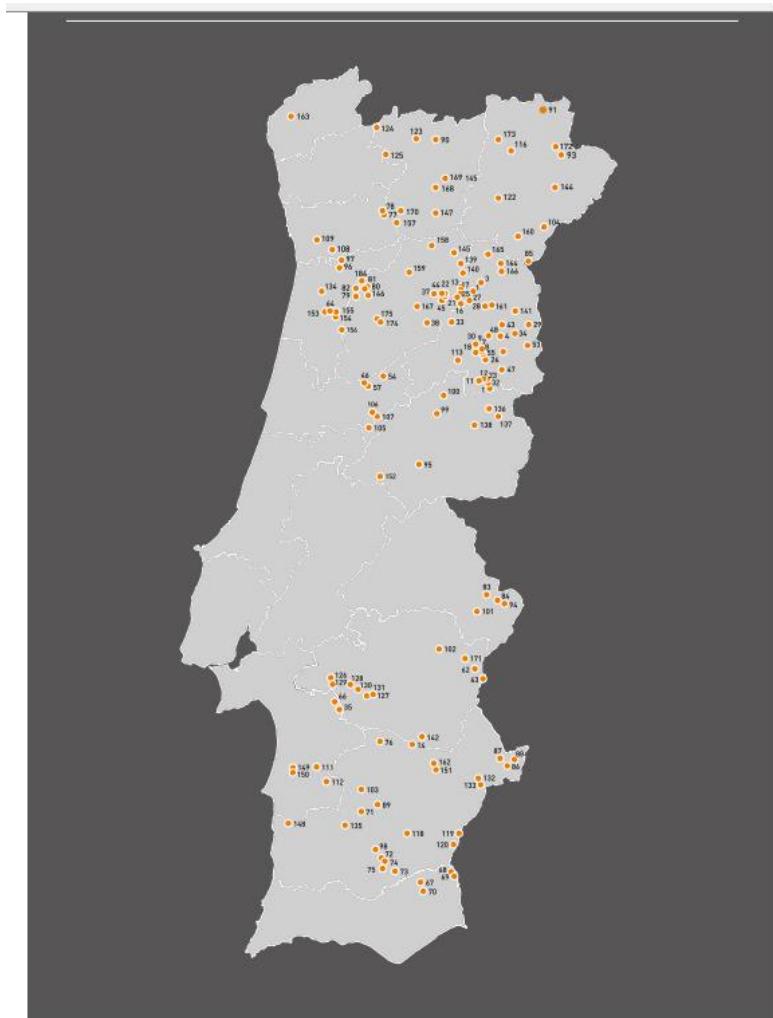
Sustainability: materials



Alguns exemplos de grandes explorações mineiras a céu aberto.

Sustainability: materials

List of abandoned mines in Portugal



Fonte: "A Herança das minas abandonadas. O enquadramento e a actuação em Portugal", EDM (2011).

Sustainability: materials

MAPA DOS TESOUROS

A abertura de uma mina envolve grandes investimentos. Sem capacidade para atrair os gigantes do setor, Portugal tem apostado nas companhias juniores. Os (magros) resultados estão à vista:



Sustentabilidade: materiais

Problemas ambientais – drenagem ácida das minas

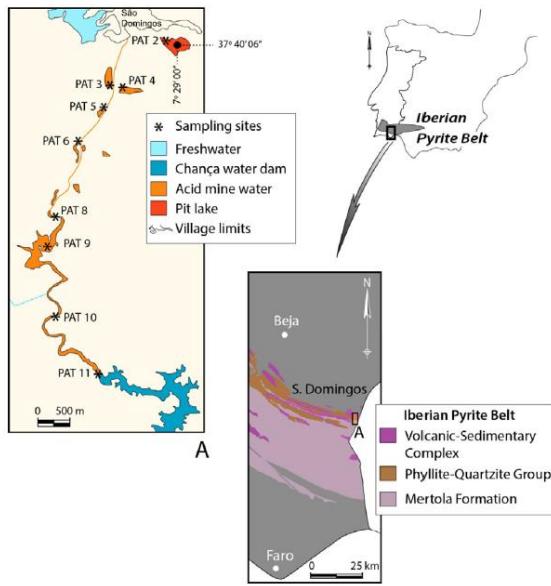


Fig. 1. Location of the study area in the Portuguese sector of the Iberian Pyrite Belt. Sampling sites in the São Domingos complex are also represented (PAT2-PAT11).

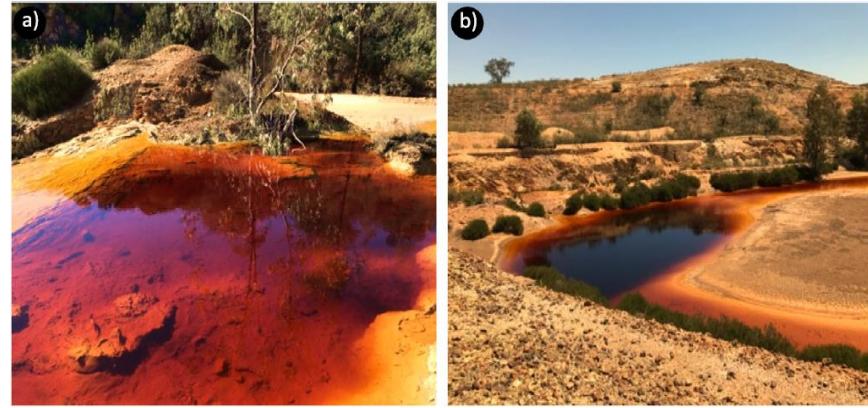
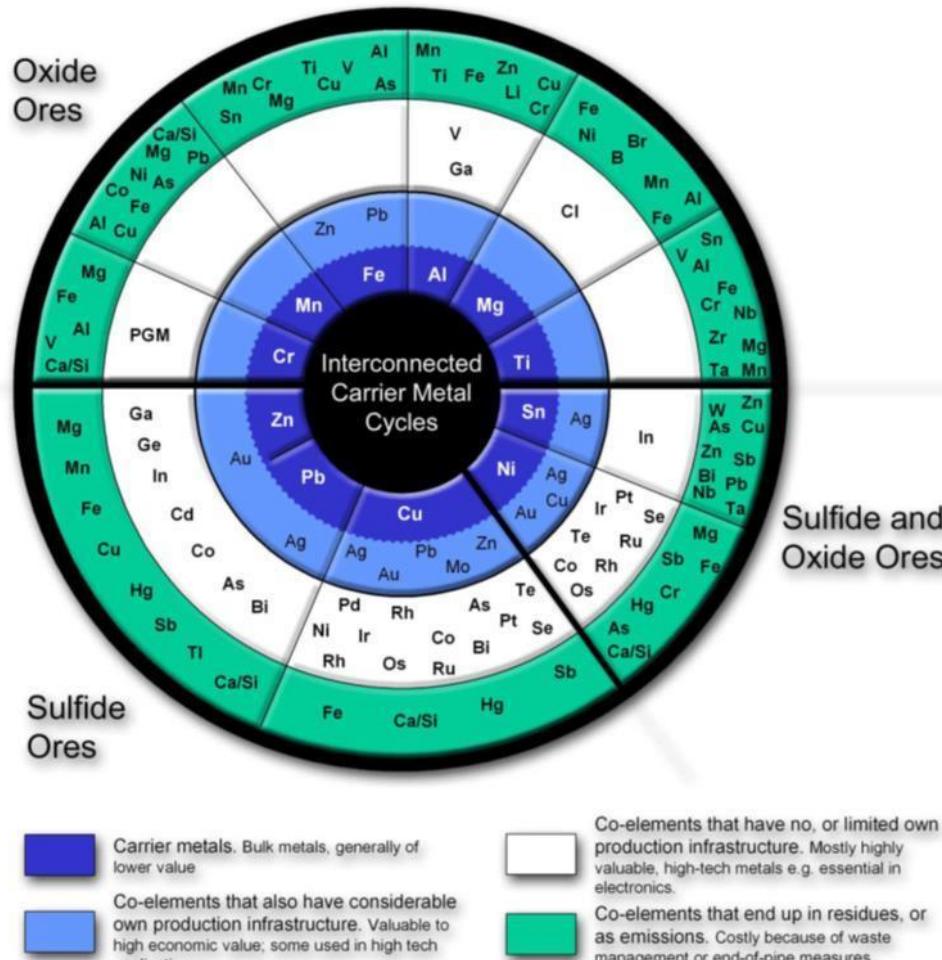


Table 1
Major cations and potentially toxic elements in the two sampling campaigns.

Campaign	Samples	Al (mg/L)	Mg	Mn	Ca	Fe	As	Cd	Cu	Zn
Oct/17	PAT 2	295	787	150	646	876	1.62	0.928	77.8	158
	PAT 3	251	169	14.7	163	170	25.8	36.2	22.2	10.5
	PAT 4	176	189	30.0	105	120	15.0	103	1.81	83.2
	PAT 5	675	252	37.2	205	801	6.26	1.30	83.9	199
	PAT 6	7.14	35.7	3.50	36.3	3.84	0.003	0.009	0.614	1.85
	PAT 8	238	123	10.6	189	193	96.5	74.6	1233	29.4
	PAT 9	90.3	40.1	3.34	57.8	56.9	<0.003	0.047	7550	10.0
	PAT10	296	636	42.8	658	112	0.072	0.204	13.0	37.6
	PAT 11	41.6	40.4	3.08	62.7	15.5	0.066	0.026	2.33	5.14
	PAT 2	206	659	135	490	711	820	899	74.4	140
	PAT 3	85.4	57.9	6.38	80.1	22.1	<0.003	21.0	7.78	5.21
Feb/18	PAT 4	166	138	29.5	69.6	116	<0.003	111	2.17	82.2
	PAT 5	275	112	17.0	115	184	670	230	30.5	38.3
	PAT 6	56.1	42.3	4.34	51.3	32.0	100	60.0	6.51	11.7
	PAT 8	107	60.3	9.30	80.5	147	50.0	65.0	10.0	21.3
	PAT 9	94.9	42.7	5.33	56.6	96.4	100	66.0	11.6	15.8
	PAT10	122	109	8.28	144	23.7	540	171	10.1	21.8
	PAT 11	711	101	5.57	135	2.91	15.0	90.0	6.33	12.7

Sustentabilidade: materiais

Desafio adicional: coprodução de materiais / associação natural



Materiais e sustentabilidade

Notícia

JE O Jornal Económico

“Transição energética mundial enfrenta escassez de metais raros”

Nos próximos 30 anos, as economias ricas têm de assegurar recursos africanos para alimentar as suas indústrias de energia renovável.



Autor: Luís Naves,
20 Fevereiro 2020

O problema das alterações climáticas provocadas pelo uso generalizado de combustíveis fósseis pode levar, nos próximos 30 anos, a uma **corrida pelo desenvolvimento de tecnologias e equipamentos que permitam a chamada transição energética**. Esta é a designação dada a um complexo processo de mudança para novos tipos de produção de energia, mais sustentáveis e que não incluam a queima de combustíveis fósseis.

Materiais e sustentabilidade

Notícia

JE O Jornal Económico

Com estas transformações, a economia mundial vai ser muito diferente da atual, sendo contudo difícil de prever se esta transição será total. A questão é também estratégica, pois os países ricos que vão desenvolver estas novas tecnologias precisam de ter acesso a **recursos minerais imprescindíveis**, e quem garantir esses mesmos recursos terá uma vantagem competitiva. Ora, sem as matérias-primas africanas, é pouco provável que a transição energética seja concretizada, pois as indústrias de energia têm de construir baterias, redes elétricas e turbinas com resistência a altas temperaturas, usando **componentes difíceis de encontrar na natureza**.

Muitas tecnologias necessárias para produzir energia de fontes renováveis requerem minerais que só se encontram em alguns locais do planeta. O melhor exemplo é o **cobalto**, sem o qual as baterias podem explodir. Este metal, extraído de minas de cobre e ferro, também serve para turbinas a gás e motores de avião, mas é **caro e pouco abundante**. A **República Democrática do Congo produz dois terços do cobalto mundial**. O restante encontra-se sobretudo na Zâmbia, Rússia, China e Canadá, mas em menor quantidade.

São produzidas anualmente mais de 100 mil toneladas de cobalto, mas as necessidades devem aumentar de forma dramática ao longo do tempo, sobretudo por causa das baterias de automóvel. Neste momento, o preço é inferior ao de 2016, devido à queda generalizada das matérias-primas (consequência do arrefecimento da economia mundial), mas as **minas são remotas**, estão num **país instável** e a **dependência de um único fornecedor pode tornar-se a maior limitação**. Mesmo que as baterias tenham um rácio menor de cobalto, esta matéria-prima ameaça tornar-se numa grande dor de cabeça para algumas indústrias, sobretudo na Europa e Estados Unidos, onde as empresas têm tentado criar stocks.

Materiais e sustentabilidade

Notícia

JE O Jornal Económico

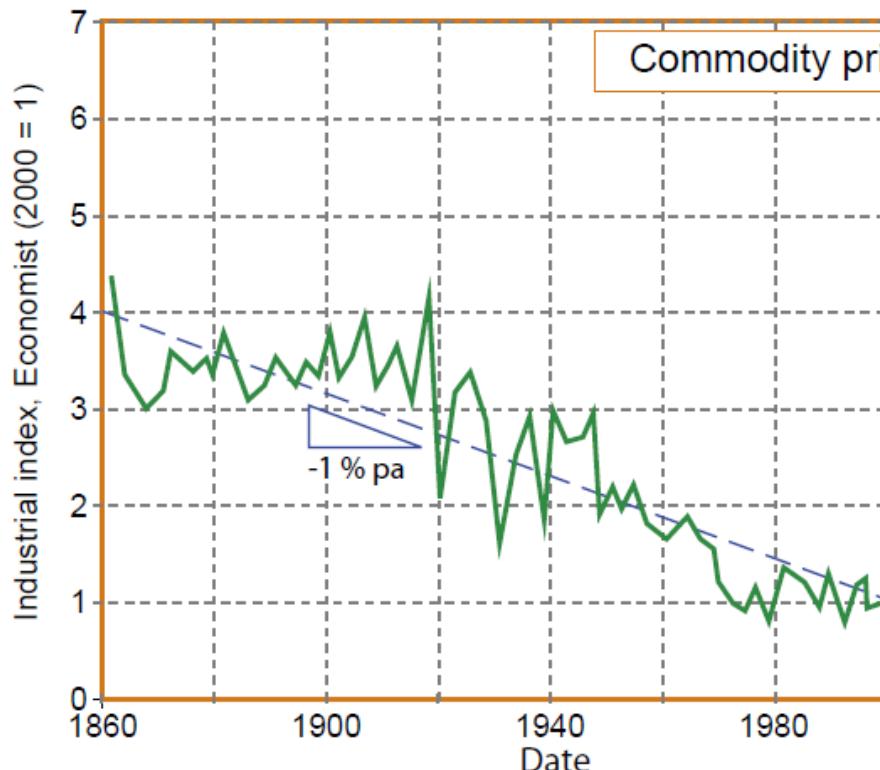
A África do Sul é o maior produtor mundial de platina (70%) e o segundo maior de paládio, dois elementos cruciais para a **emergente indústria energética**. A platina é utilizada em redes e veículos elétricos; o paládio é crucial nas células de hidrogénio, onde reações entre hidrogénio e oxigénio criam eletricidade, calor e água. Há outros nomes a que nos vamos habituar, como manganês ou as chamadas terras raras, um grupo de 17 elementos químicos usados em ligas metálicas resistentes a altas temperaturas, com um nome algo enganador, pois alguns destes metais não são assim tão raros.

O consumo mundial de terras raras cresceu sete vezes nos últimos 50 anos. A relativa escassez de alguns destes metais, como lantânio e térbio, tem sido um problema para a produção, por exemplo, de telefones móveis e ecrãs de televisão, mas há também numerosas aplicações militares. A China é o maior produtor mundial de terras raras e os EUA, que compram 78% das suas necessidades aos chineses, têm tentado encontrar outras fontes, nomeadamente em África, onde foram feitas descobertas, por exemplo na Zâmbia, Moçambique e Malawi. **Conciliar o ambiente com a economia terá, provavelmente, esta dificuldade adicional.**

Materiais e sustentabilidade

As sociedades sustentáveis continuam dependentes da utilização de diversos materiais...

- ✓ No século passado, as nações desenvolvidas utilizavam recursos locais, provenientes das suas colónias ou de locais sob o seu controlo.



Materiais e sustentabilidade

- ✓ Nos nossos dias, os materiais são extraídos e adquiridos globalmente entre nações com autonomia e agenda própria.



Esta mudança traz consigo **riscos de fornecimento de materiais** que se intensificam à medida que a procura aumenta.

Materiais e sustentabilidade

Restrições na utilização de matérias-primas

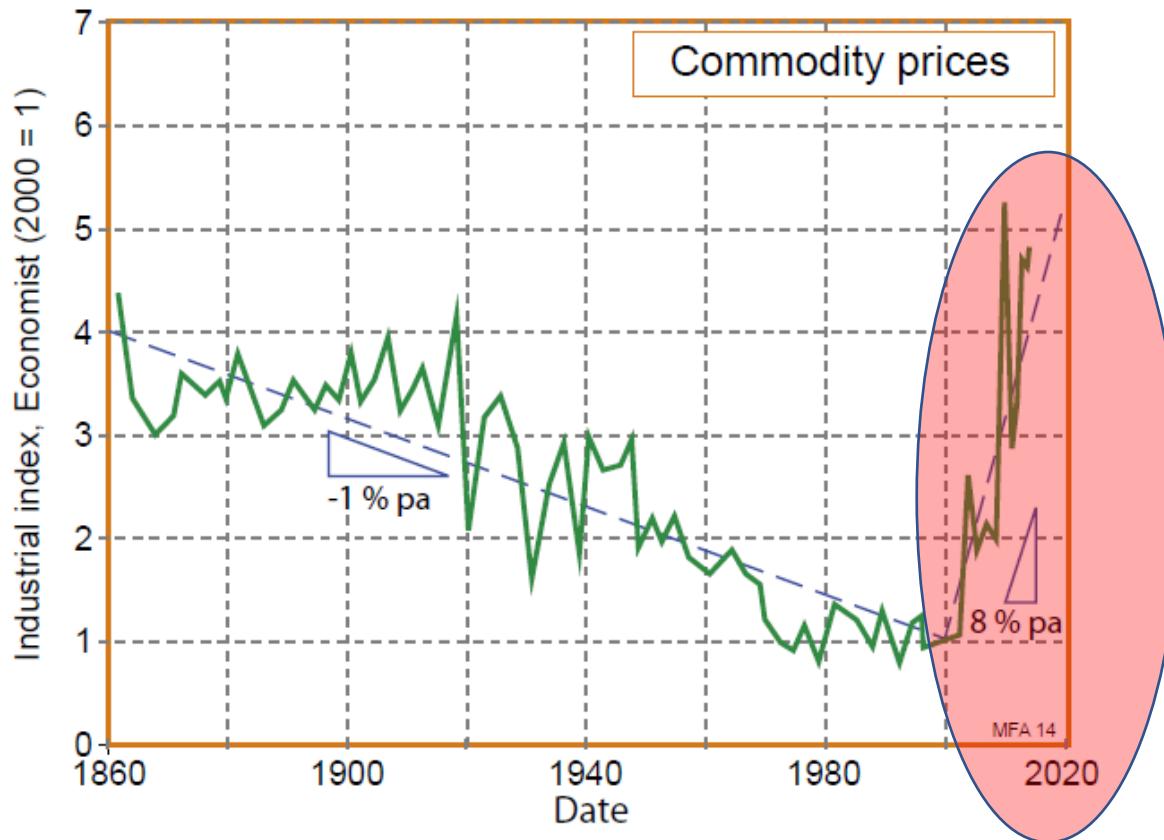


FIGURE 5.1

The movement of price of a portfolio of materials. Data from the World Bank, 2013 and the Economist, 2011.

Materials and Sustainability

News

Europe in race to secure raw materials critical for energy transition



Business
PLANET

are likely to soon be more important
than oil and gas,

Materiais e sustentabilidade

Materiais, riscos de distribuição

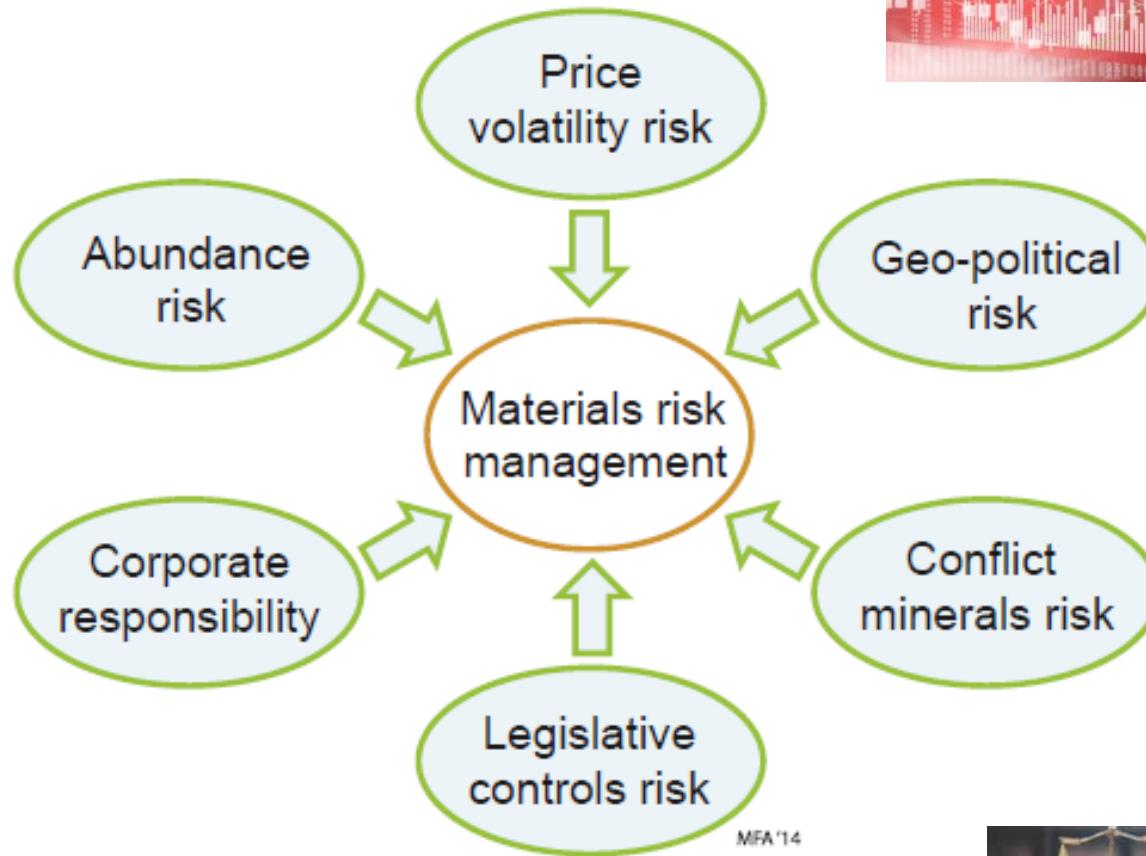
Neste sentido os materiais de elevado interesse estratégico ou comercial são avaliados quanto aos riscos associados à sua extração/distribuição, sendo que em alguns casos os materiais são classificados como sendo “**críticos**”.

- ✓ Muitos dos **materiais críticos** são provenientes de um local ou de um número reduzido de nações, expondo a sua cadeia de distribuição a restrições de índole geoeconómicas ou geopolíticas.



Materiais e sustentabilidade

Materiais, riscos de distribuição

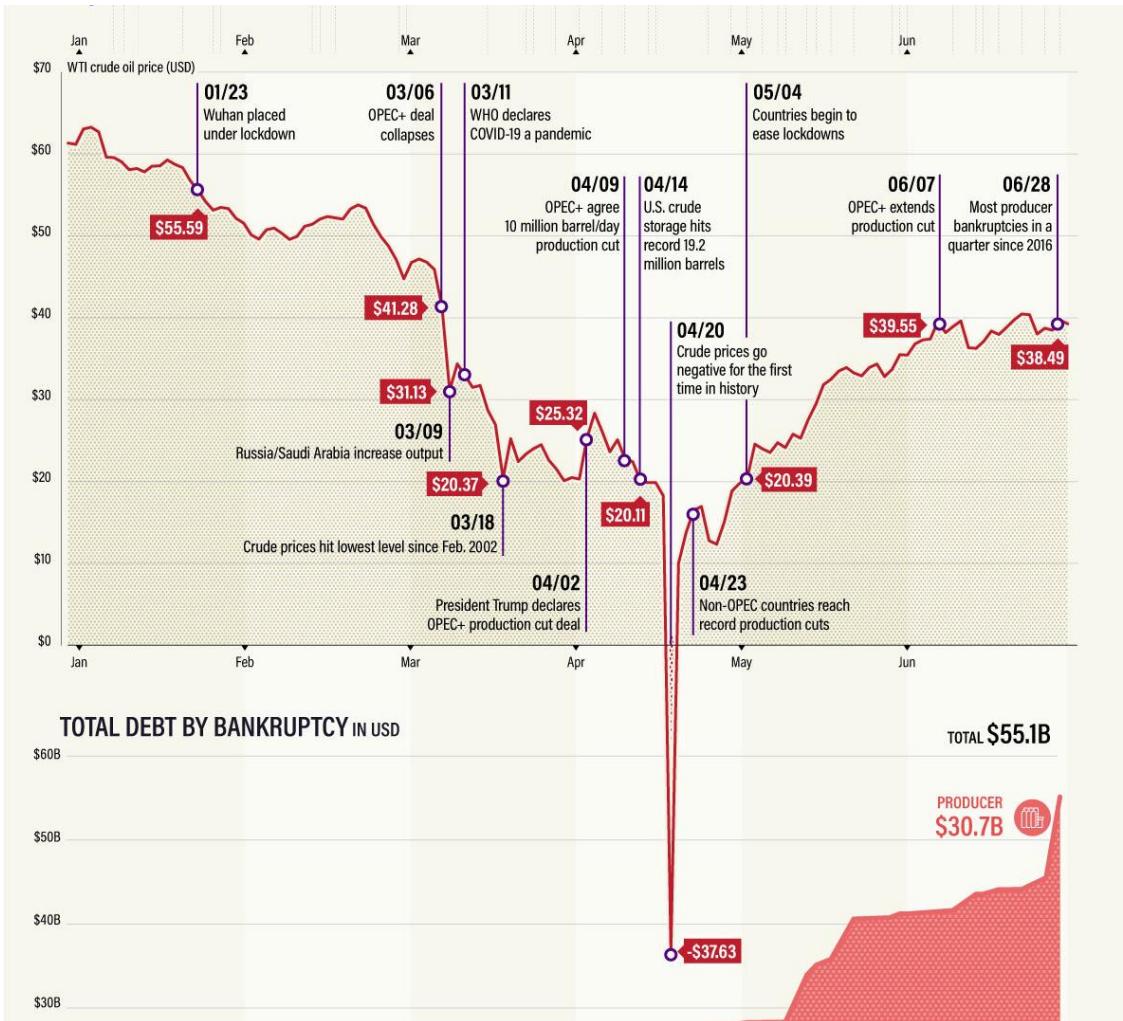


Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: volatilidade do preço

2020

Exemplo: preço do petróleo (US)



Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: volatilidade do preço

Exemplo: preço do petróleo (US)

2022

Oil continues to rise

Brent crude, the global benchmark, climbed above \$115 a barrel Thursday on fears of a supply shock.

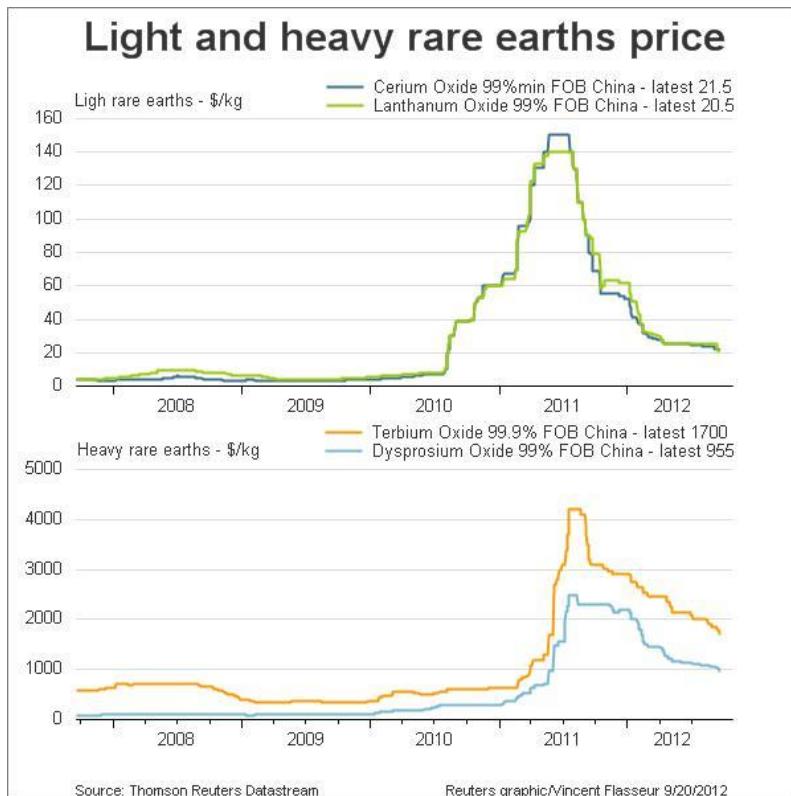
Brent crude oil futures



Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: monopólio e por motivos geopolíticos

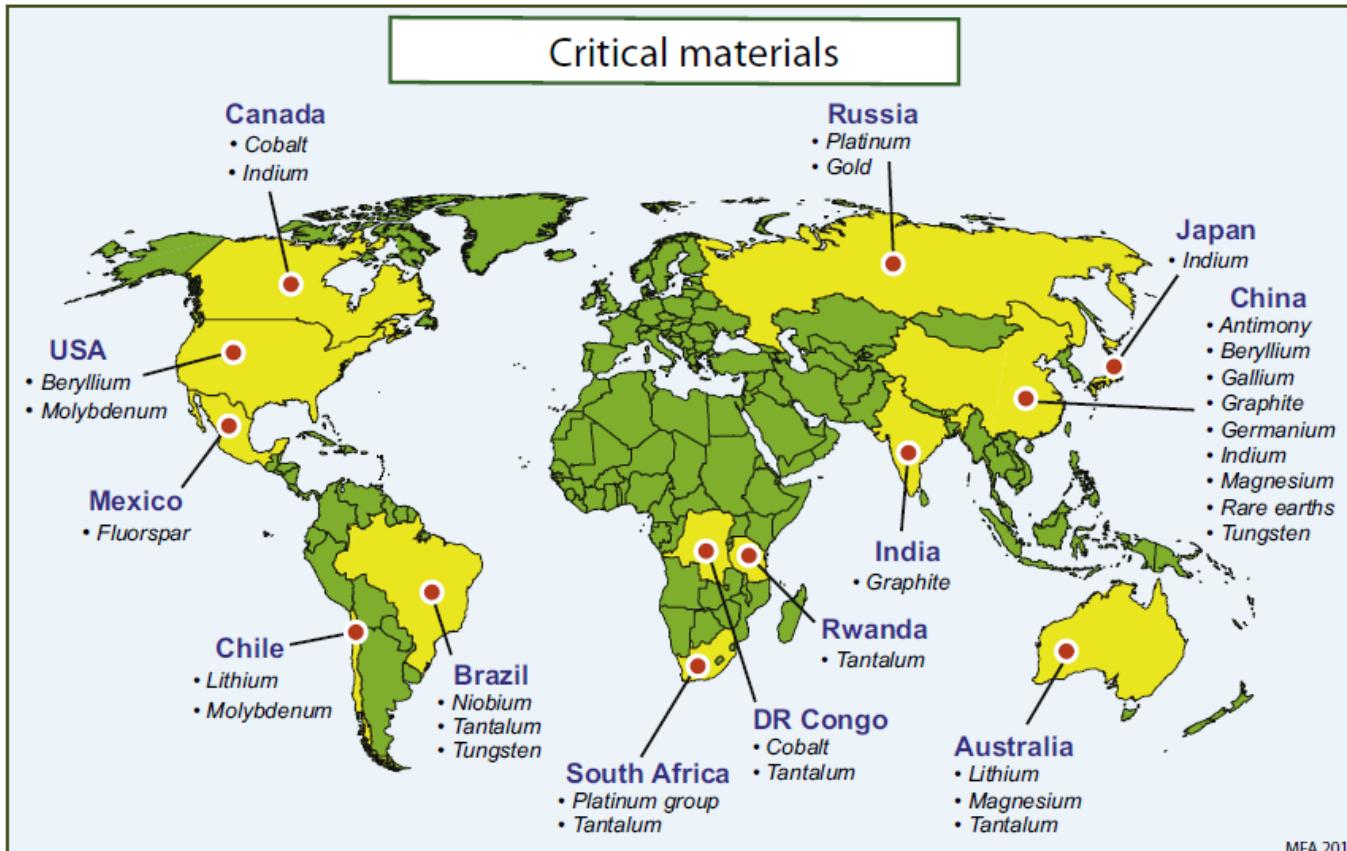
Exemplo: limitação de exportação de terras raras por parte da China (2010)



Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: monopólio e por motivos geopolíticos

Principais países contendo materiais críticos



Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: monopólio e por motivos geopolíticos

O **índice Herfindhal-Hirschman (IHH)** é uma medida do risco associado à distribuição de um dado material quando o mesmo é controlado por uma ou por um número limitado de nações.

$$IHH = \sum_{i=1}^n f_i^2$$

Em que f_i representa a fração de mercado proveniente da nação i , e n o número total de nações. O valor de IHH varia entre 0 e 1. Se uma nação tem o monopólio de mercado, o índice será $IHH = 1$; se duas nações tiverem igual cota de mercado então o $IHH = 0,5^2 + 0,5^2 = 0,5$.

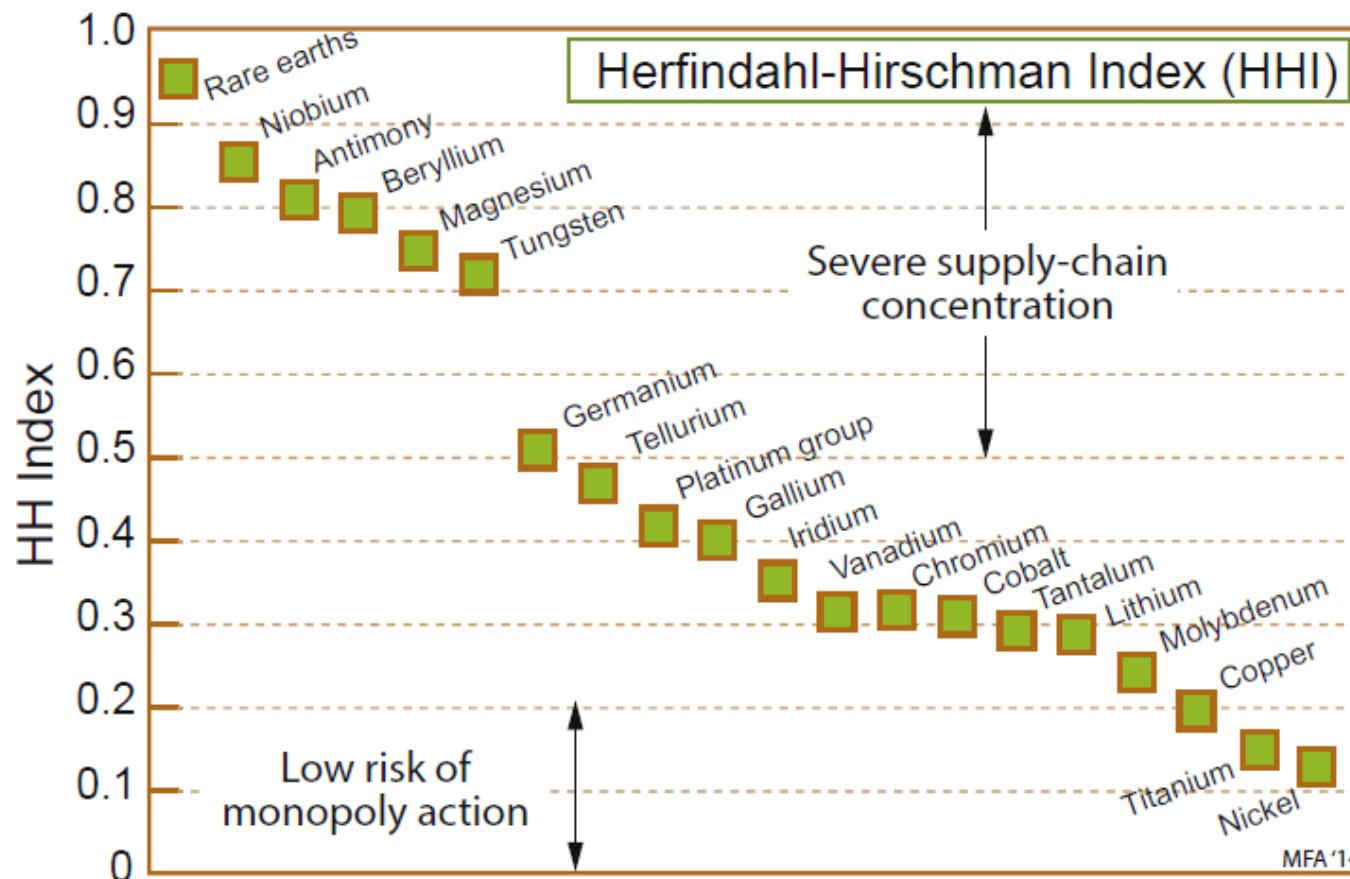
$IHH < 0,1$ – indicador de um mercado sem restrições.

$IHH > 0,25$ – indicador de restrições severas nas cadeias de distribuição.

Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: monopólio e por motivos geopolíticos

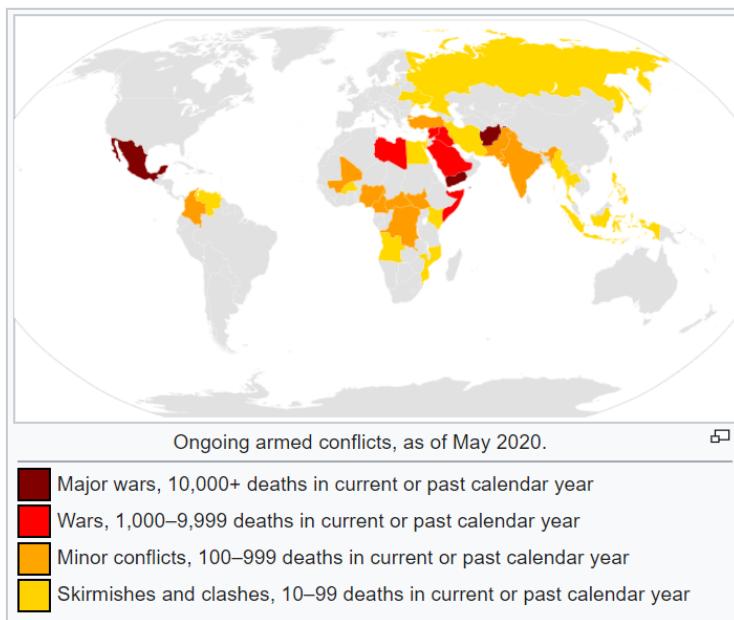
Índice Herfindhal-Hirschman (IHH)



Materiais e sustentabilidade

Materiais: risco de conflito

A instabilidade política ou os conflitos armados podem suspender temporariamente a distribuição de um dado recurso. A quebra na produção/distribuição leva a um aumento exponencial do preço desse recurso estimulando a produção desse recurso em outras nações ou a procura por materiais alternativos de forma a reestabelecer o equilíbrio.



Exemplo: guerra na República Democrática do Congo (2007)



Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: legislação em vigor ou previsão de alteração

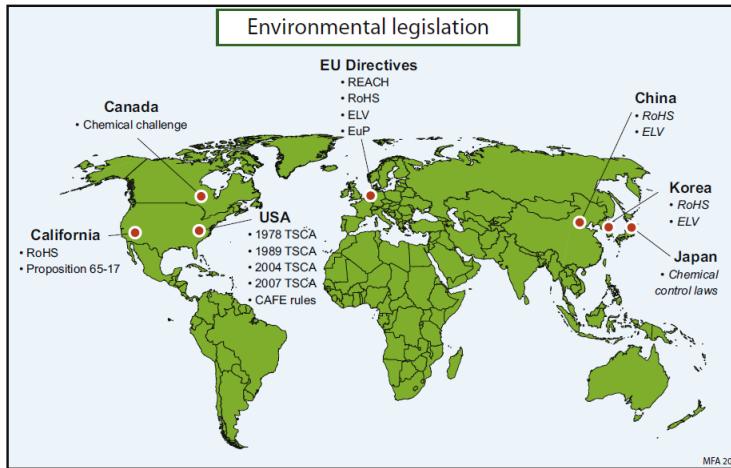
A legislação e as normas regulamentam os impactos dos produtos, e os materiais que eles contêm, no ambiente, na saúde e na sociedade. São contabilizados todas as etapas do produto (ciclo de vida) deste os materiais usados na sua produção até ao descarte no fim de vida do produto.

Table 5.1 Examples of Legislation that Affect the Use of Materials, Energy and Water

Sector	Legislation
Registration and control of hazardous materials and chemicals	EU Registration Evaluation & Authorization of Chemicals Directive (REACH) EU Restriction of Hazardous Substances Directive (RoHS) EU Volatile Organic Compounds Directive (VOC) US Toxic Substances Control Act (TSCA) California Green Chemistry Initiative Norwegian Restriction of Hazardous Substances (RoHS) China REACH China Restriction of Hazardous Substances (RoHS)
Ethical material sourcing	US Frank-Dodd Act
Energy and product design	EU Energy-using Products Directive (EuP) EU Energy-efficient Building Directive (EEB) France Grenelle 2 Regulations
Water usage	EU Water Framework Directive
End-of-life and control of waste	EU Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (WEEE) EU End of Life Vehicles (ELV) Directive EU Batteries Directive Japanese Household Appliance Recycling Law (HARL)

Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: legislação em vigor ou previsão de alteração



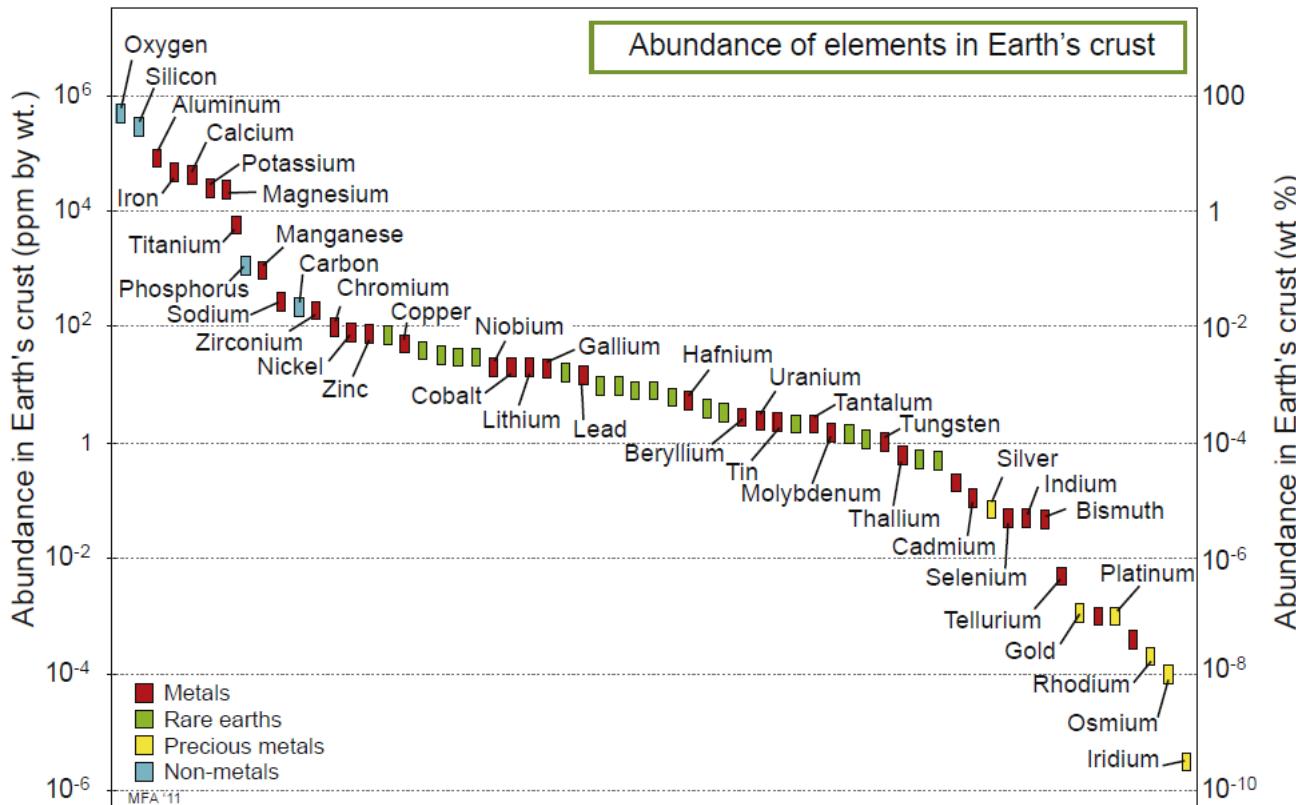
- As baterias recarregáveis contêm cádmio
- Os processos de cromagem envolvem a utilização de crómio VI altamente tóxico
- Muitos polímeros contêm retardadores de chama ou plastificantes, alguns banidos recentemente, outros em lista de espera.

A legislação nacional tem implicações globais!

Cada vez mais, os fabricantes são responsabilizados pelos materiais no final da vida útil do produto.

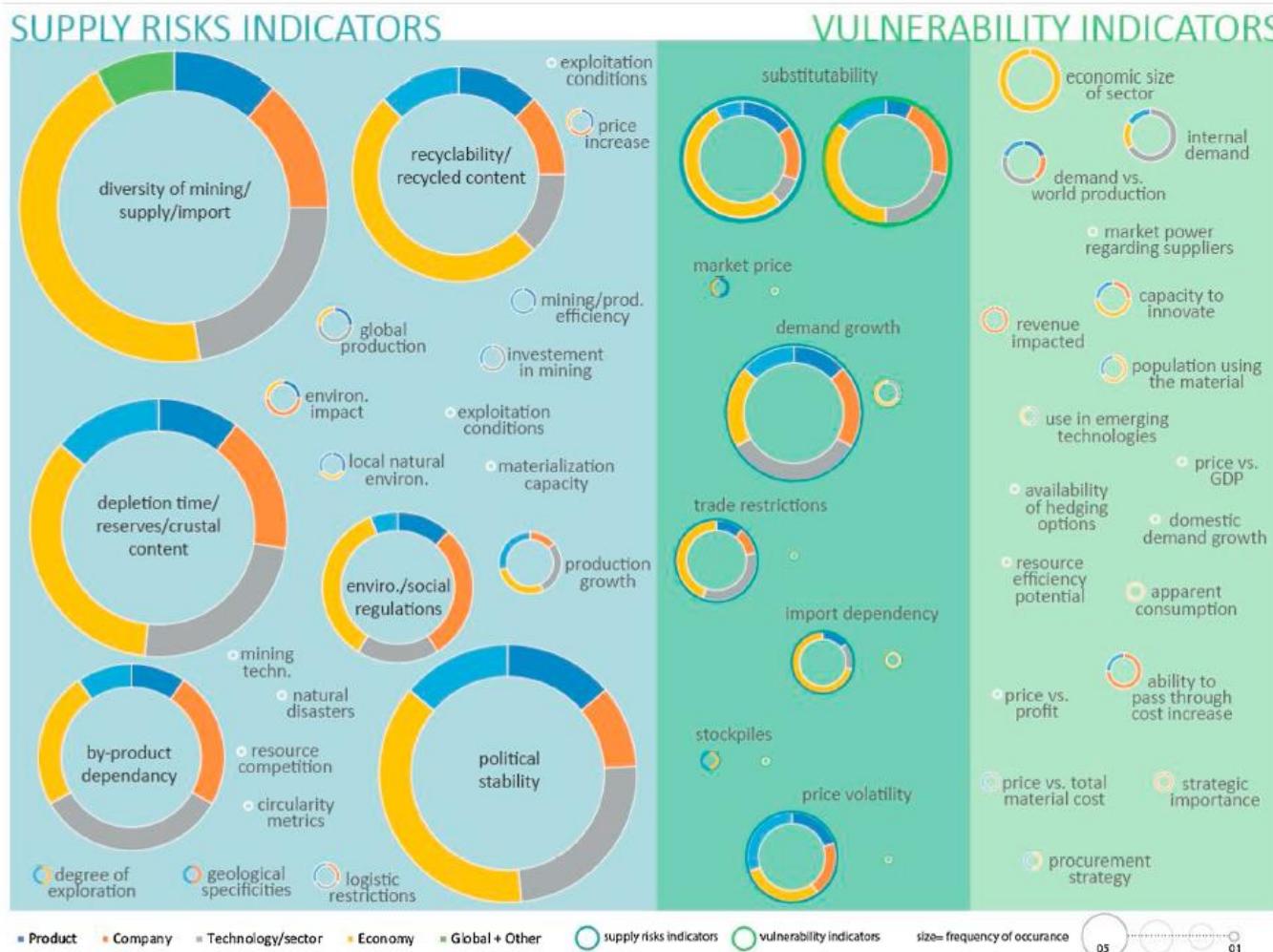
Materiais e sustentabilidade

Materiais – risco: escassez



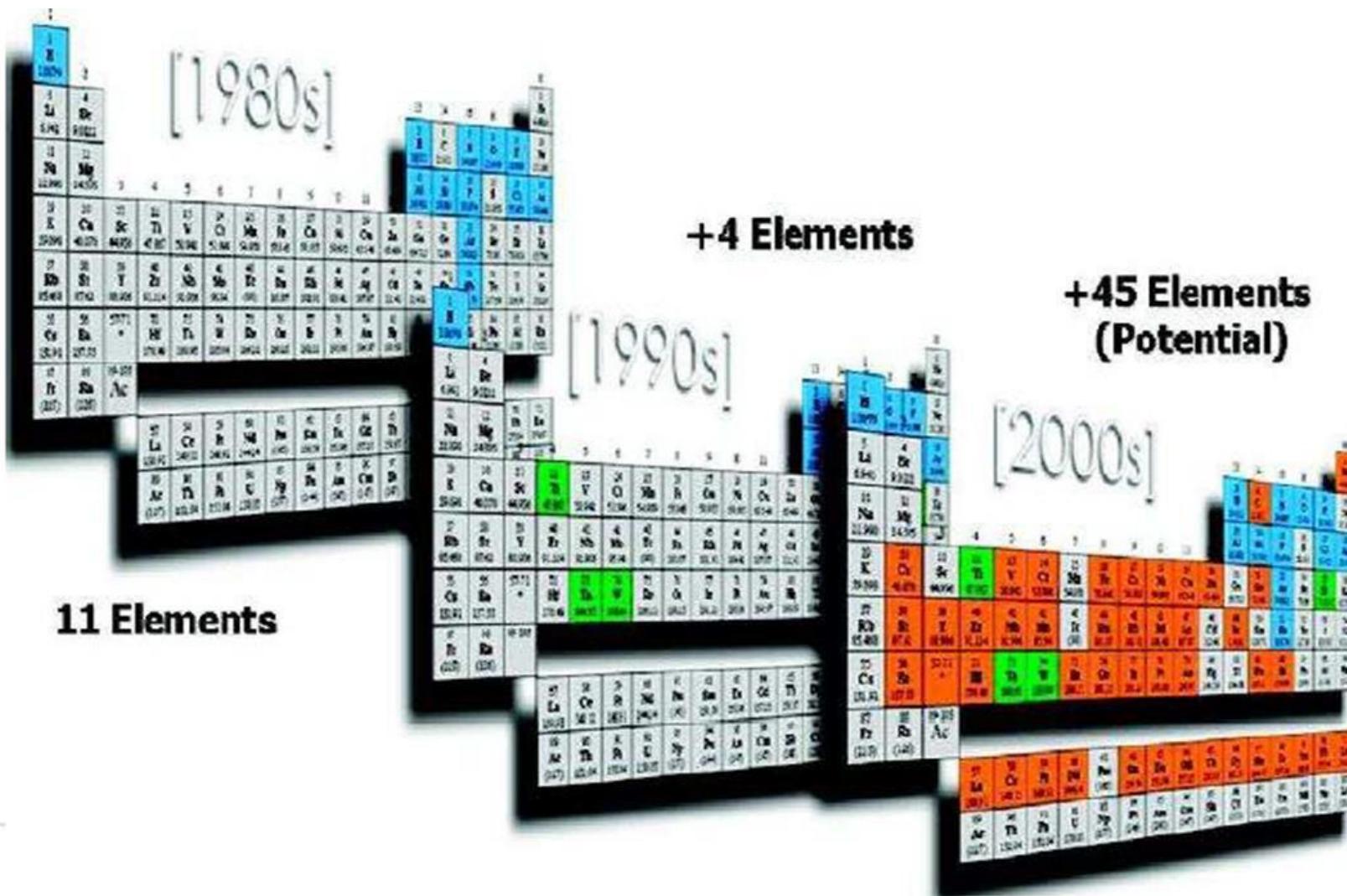
Materiais e sustentabilidade

Como podemos estimar a vulnerabilidade e a escassez dos materiais?



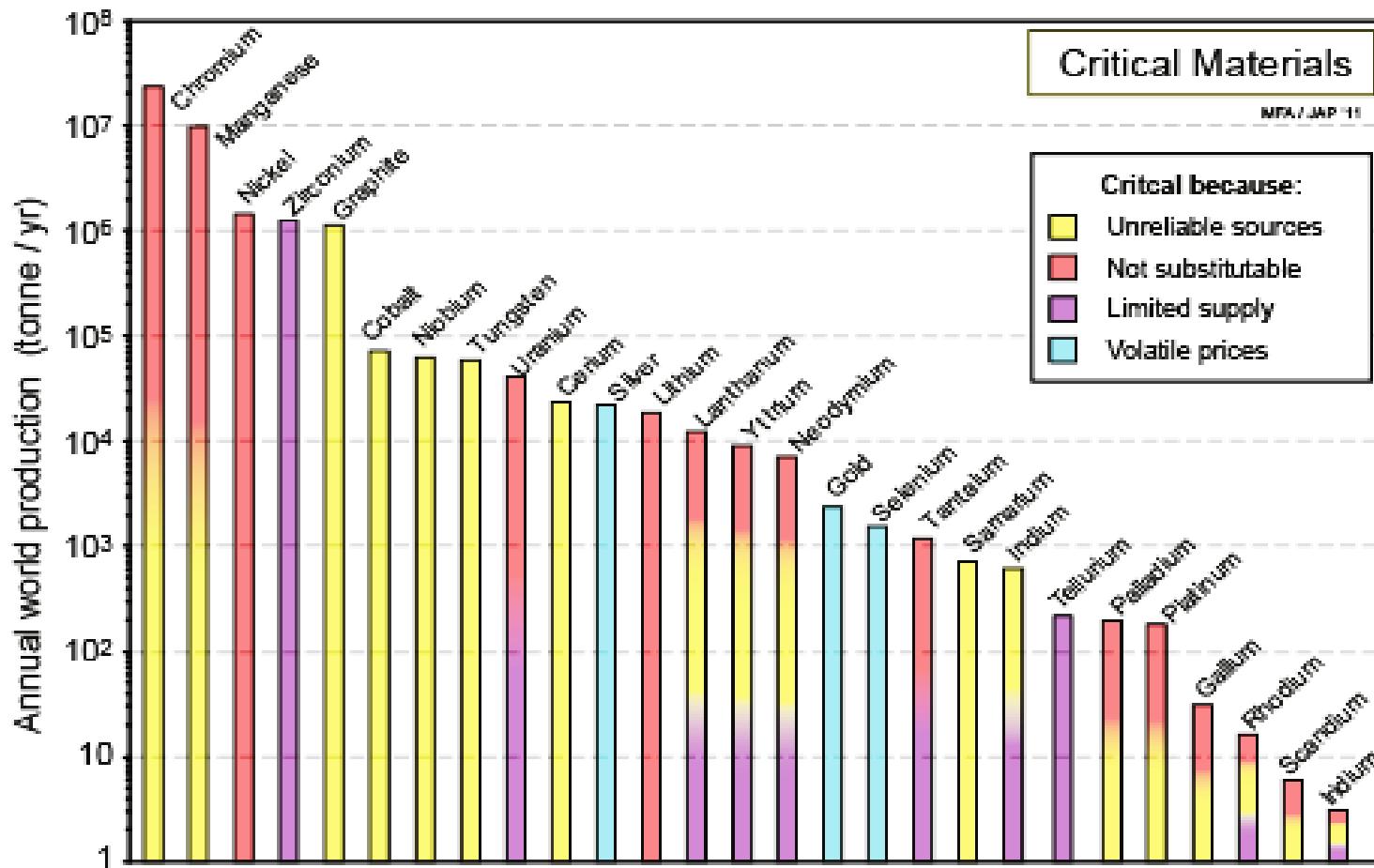
Fonte: "A review of methods and data to determine raw material criticality", Resources, Conservation & Recycling 155 (2020) 104617.

Materiais e sustentabilidade



- Evolução do número de elementos da tabela periódica com uso acrescido e potencial existência crítica.

Materiais e sustentabilidade



- Produção mundial anual de 27 materiais críticos (ano 2010), com indicação das razões para serem identificados como “críticos”.

Materiais e sustentabilidade

Materiais críticos e sua utilização

Raw material	Emerging technologies (selected)
Antimony	ATO, micro capacitors
Cobalt	Lithium-ion batteries, synthetic fuels
Gallium	Thin layer photovoltaics, IC, WLED
Germanium	Fibre optic cable, IR optical technologies
Indium	Displays, thin layer photovoltaics
Platinum (PGM)	Fuel cells, catalysts
Palladium (PGM)	Catalysts, seawater desalination
Niobium	Micro capacitors, ferroalloys
Neodymium (rare earth)	Permanent magnets, laser technology
Tantalum	Micro capacitors, medical technology

Materials and Sustainability

Materiais críticos (critical raw materials)

The first assessment (2011) identified 14 CRMs out of the 41 candidate raw materials, in 2014, 20 out of 54 candidates, in 2017, 27 CRMs out of 78 candidates, and in 2020, 30 out of 83 candidates. **The 2023 assessment screened between 87 individual raw materials, 34 raw materials proposed for the CRM list 2023:**

Main results of the 2023 criticality assessment

The following 34 raw materials are proposed for the CRM list 2023:

2023 Critical Raw Materials (new CRMs in <i>italics</i>)			
aluminium/bauxite	coking coal	lithium	phosphorus
antimony	<i>feldspar</i>	LREE	scandium
<i>arsenic</i>	fluorspar	magnesium	silicon metal
baryte	gallium	<i>manganese</i>	strontium
beryllium	germanium	natural graphite	tantalum
bismuth	hafnium	niobium	titanium metal
boron/borate	<i>helium</i>	PGM	tungsten
cobalt	HREE	phosphate rock	vanadium
		<i>copper</i> *	<i>nickel</i> *

*Copper and nickel do not meet the CRM thresholds, but are included as Strategic Raw Materials.

Materials and Sustainability

Materiais críticos (critical raw materials)

2023 CRMs vs. 2020 CRMs			
aluminium/bauxite	gallium	phosphate rock	vanadium
antimony	germanium	phosphorus	arsenic
baryte	hafnium	PGM	feldspar
beryllium	HREE	scandium	helium
bismuth	lithium	silicon metal	manganese
borate	LREE	strontium	copper
cobalt	magnesium	tantalum	nickel
coking coal	natural graphite	titanium metal	<i>indium</i>
fluorspar	niobium	tungsten	natural rubber

Legend:

Black: CRMs in 2023 and 2020

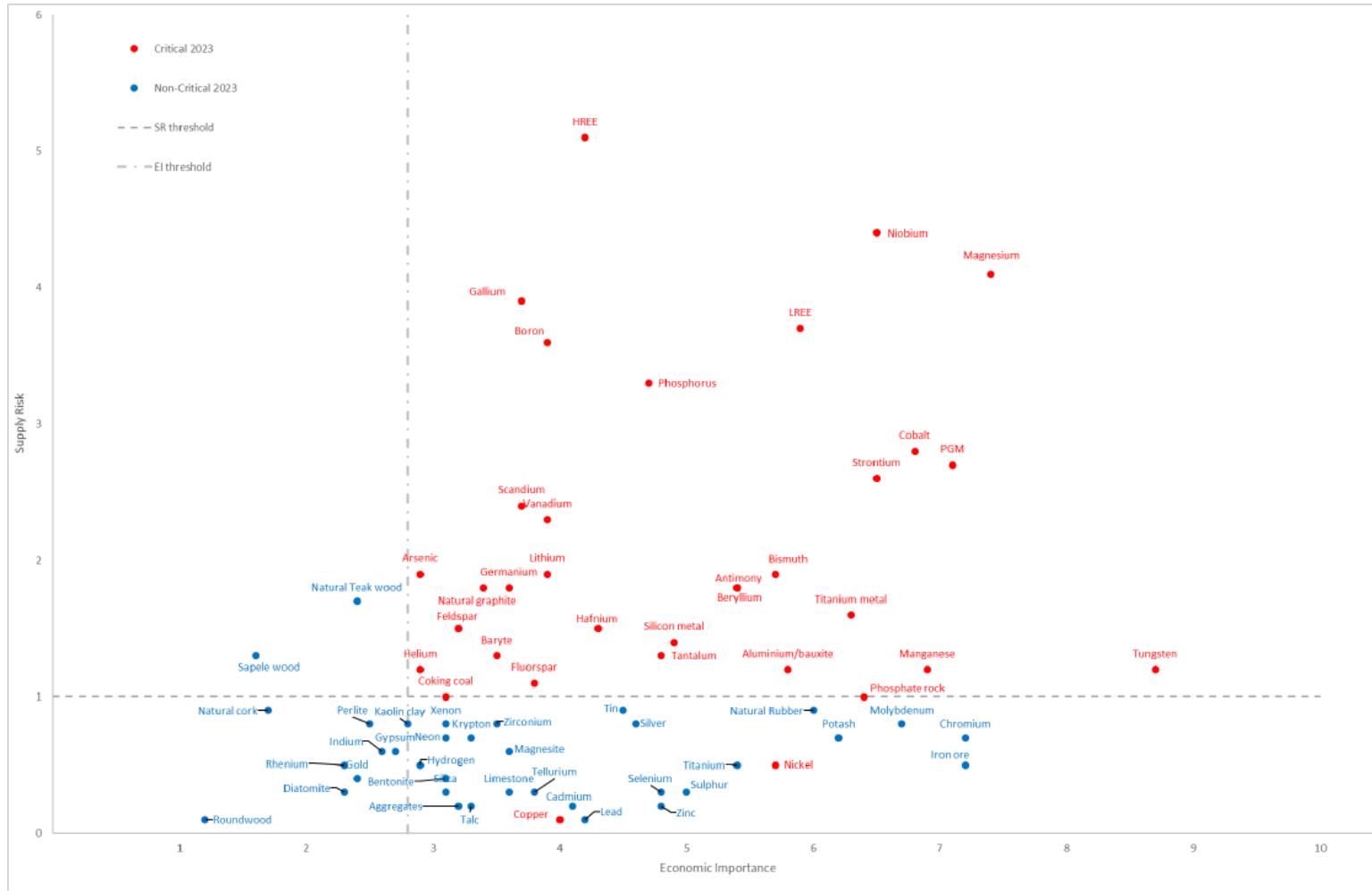
Red: CRMs in 2023, non-CRMs in 2020

~~Strike~~: Non-CRMs in 2023 that were critical in 2020

Materials and Sustainability

Materiais críticos (critical raw materials)

Figure A: Results of the 2023 EU criticality assessment⁵



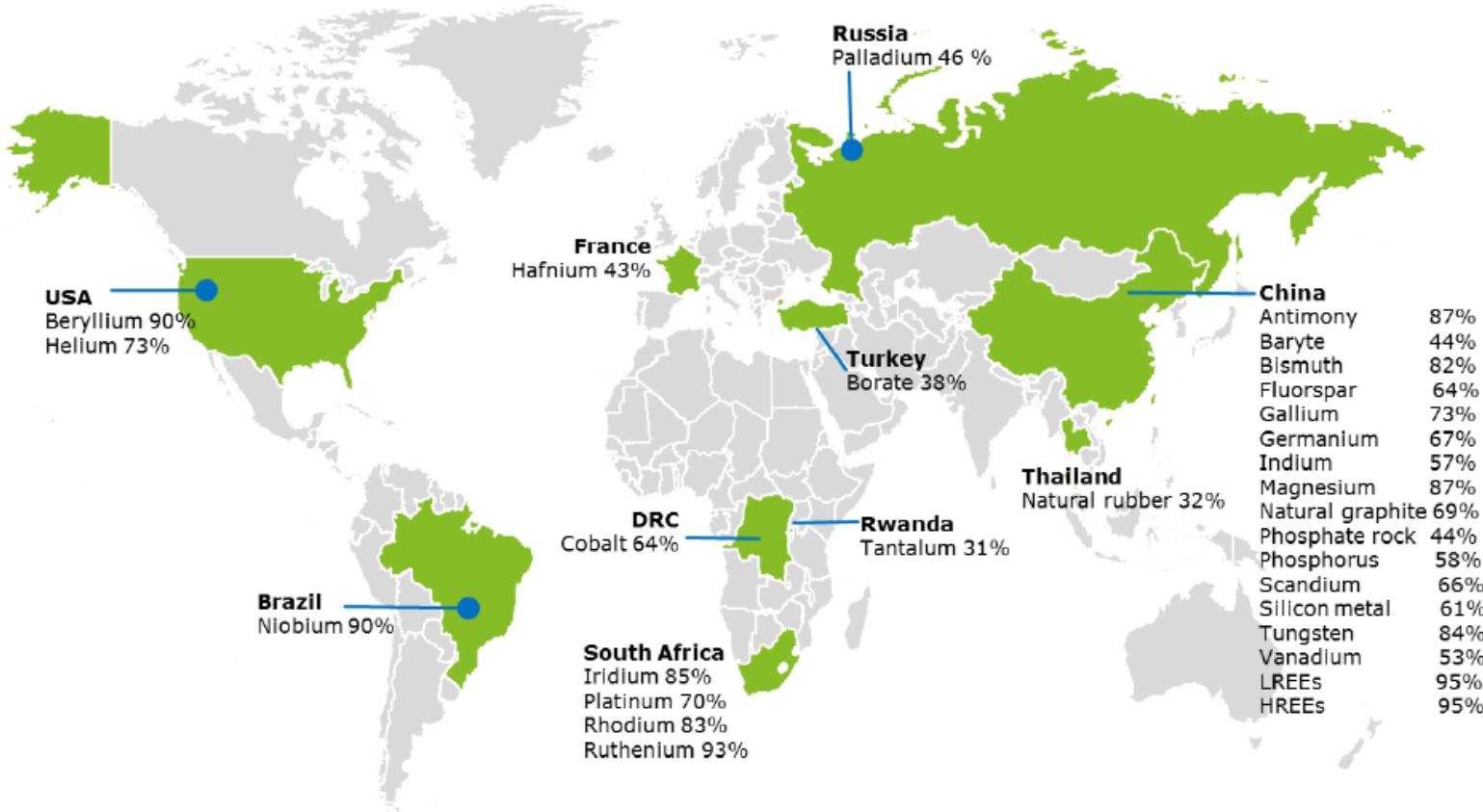
Source: Milan Grohol, Constanze Veeh. Study on the Critical Raw Materials for the EU2023: final report. DG GROW, European Commission (2023).

Materials and Sustainability

Main global suppliers of CRMs

2020

Figure B: Countries accounting for largest share of global supply of CRMs



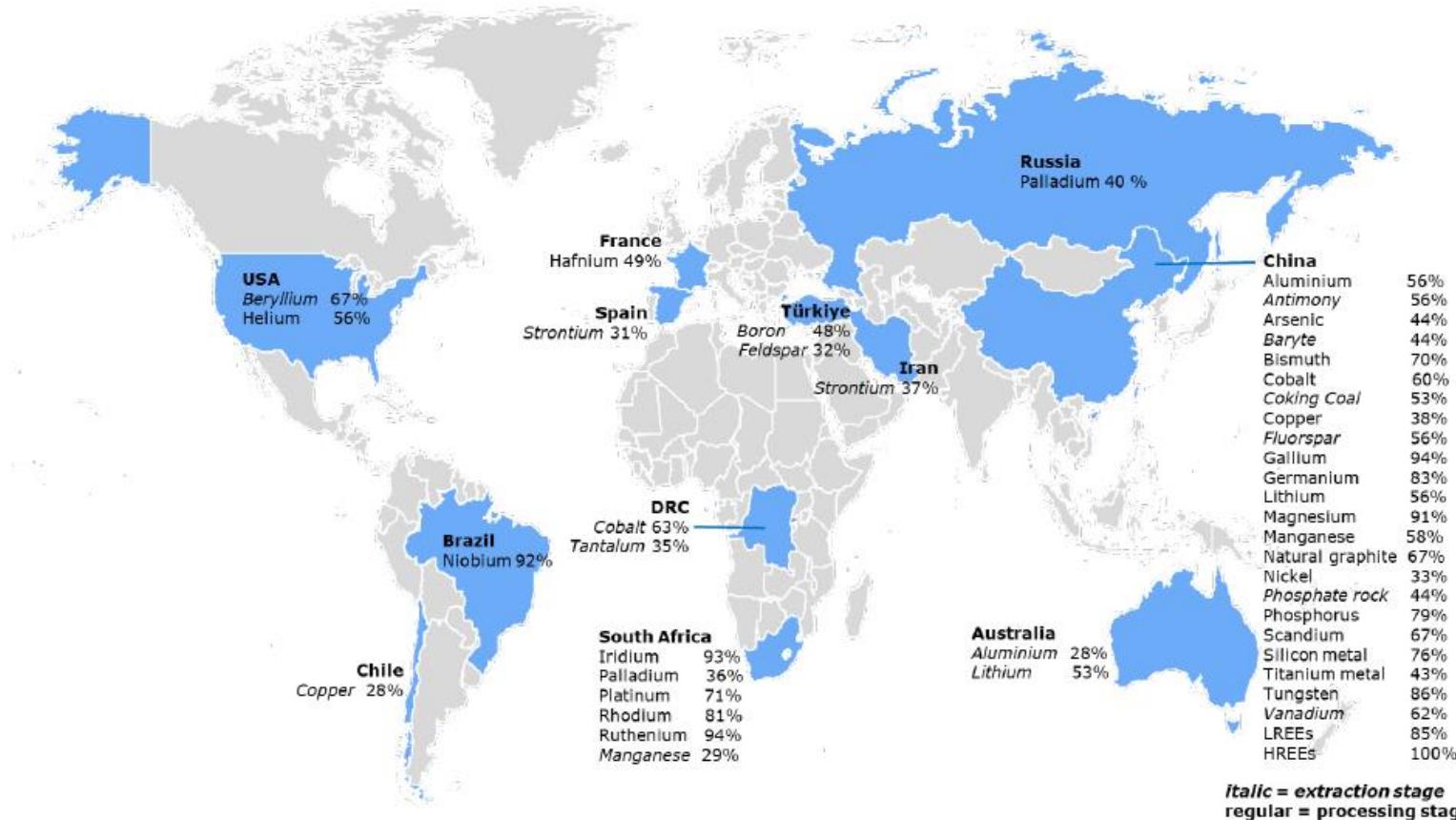
Fonte: "Study on the review of the list of Critical Raw Materials: final report", European Commission (2017).

Materials and Sustainability

Main global suppliers of CRMs

2023

Figure B: Countries accounting for largest share of global supply of CRMs



Source: Milan Grohol, Constanze Veeh. Study on the Critical Raw Materials for the EU2023: final report. DG GROW, European Commission (2023).

Materials and Sustainability

Materiais críticos (critical raw materials)

Exemplo: Lithium plays a unique role in batteries, in steel and aluminium metallurgy. It is considered critical material in both the EU and US lists.

Produção de Lítio (2022) (toneladas)	
Argentina	6200
Austrália	61000
Brasil	2200
Canada	500
Chile	39000
China	19000
Portugal	600
Zimbabué	800
Total mundial	129300

Materials and Sustainability

Major global supplier countries of CRMs

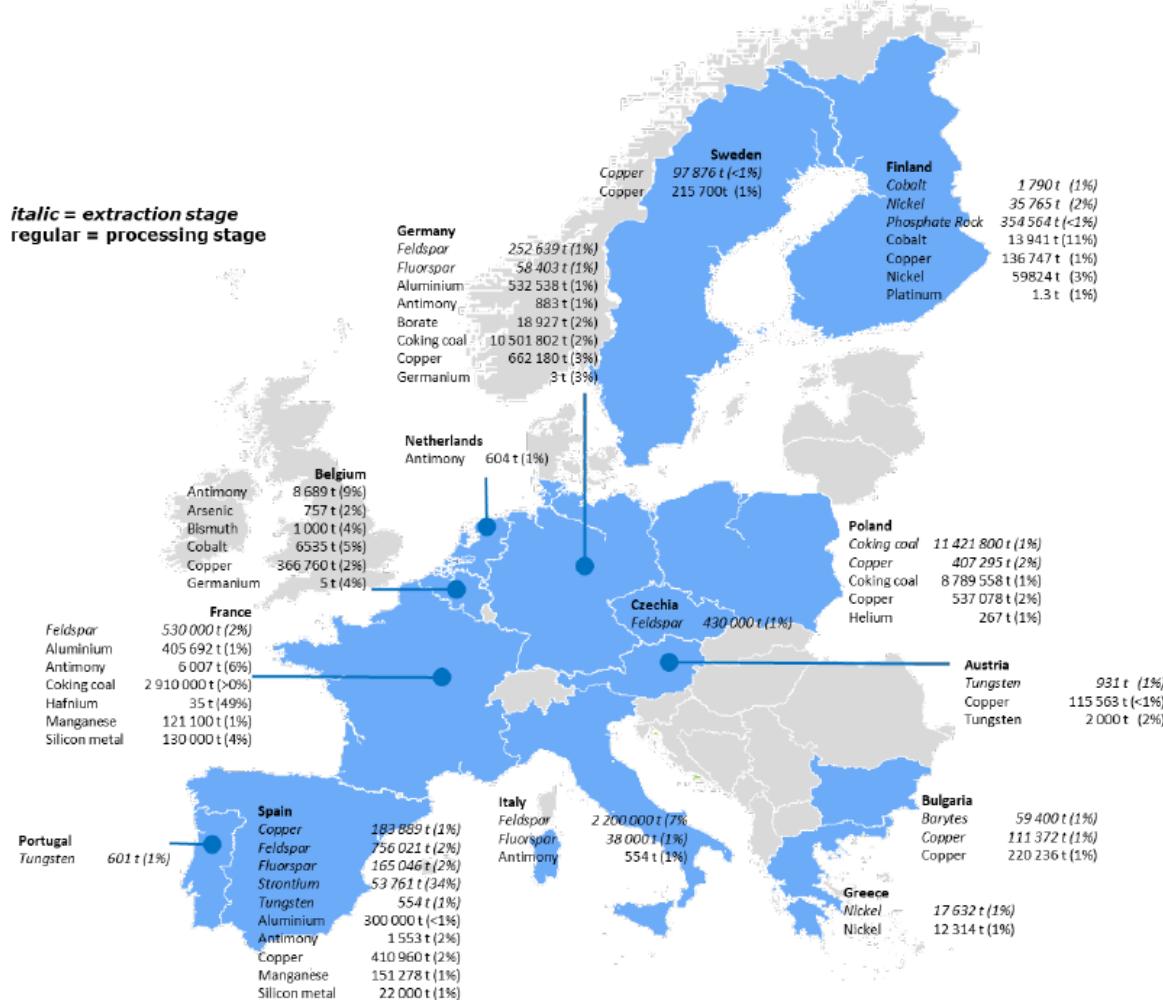
	Material	Stage *	Main global supplier	Share		Material	Stage *	Main global supplier	Share
1	aluminium	E	Australia	28%	27	magnesium	P	China	91%
2	antimony	E	China	56%	28	manganese	P	S. Africa	29%
3	arsenic	P	China	44%	29	natural graphite	E	China	67%
4	baryte	E	China	44%	30	neodymium	P	China	85%
5	beryllium	E	USA	88%	31	niobium	P	Brazil	92%
6	bismuth	P	China	70%	32	nickel	P	China	33%
7	boron	E	Türkiye	48%	33	palladium	P	Russia	40%
8	cerium	P	China	85%	34	phosphate rock	E	China	48%
9	cobalt	E	DRC	63%	35	phosphorus	P	China	74%
10	coking coal	E	China	53%	36	platinum	P	S. Africa	71%
11	copper	E	Chile	28%	37	praseodymium	P	China	85%
12	dysprosium	P	China	100%	38	rhodium	P	S. Africa	81%
13	erbium	P	China	100%	39	ruthenium	P	S. Africa	94%
14	europeum	P	China	100%	40	samarium	P	China	85%
15	feldspar	E	Türkiye	32%	41	scandium	P	China	67%
16	fluorspar	E	China	56%	42	silicon metal	P	China	76%
17	gadolinium	P	China	100%	43	strontium	E	Spain	31%
18	gallium	P	China	94%	44	tantalum	E	DRC	35%
19	germanium	P	China	83%	45	terbium	P	China	100%
20	hafnium	P	France	49%	46	thulium	P	China	100%
21	helium		USA	56%	47	titanium metal	P	China	43%
22	holmium	P	China	100%	48	tungsten	P	China	86%
23	iridium	P	S. Africa	93%	49	vanadium	E	China	62%
24	lanthanum	P	China	85%	50	ytterbium	P	China	100%
25	lithium	P	Australia	53%	51	yttrium	P	China	100%
26	lutetium	P	China	100%					

Materials and Sustainability

EU producers of CRMs

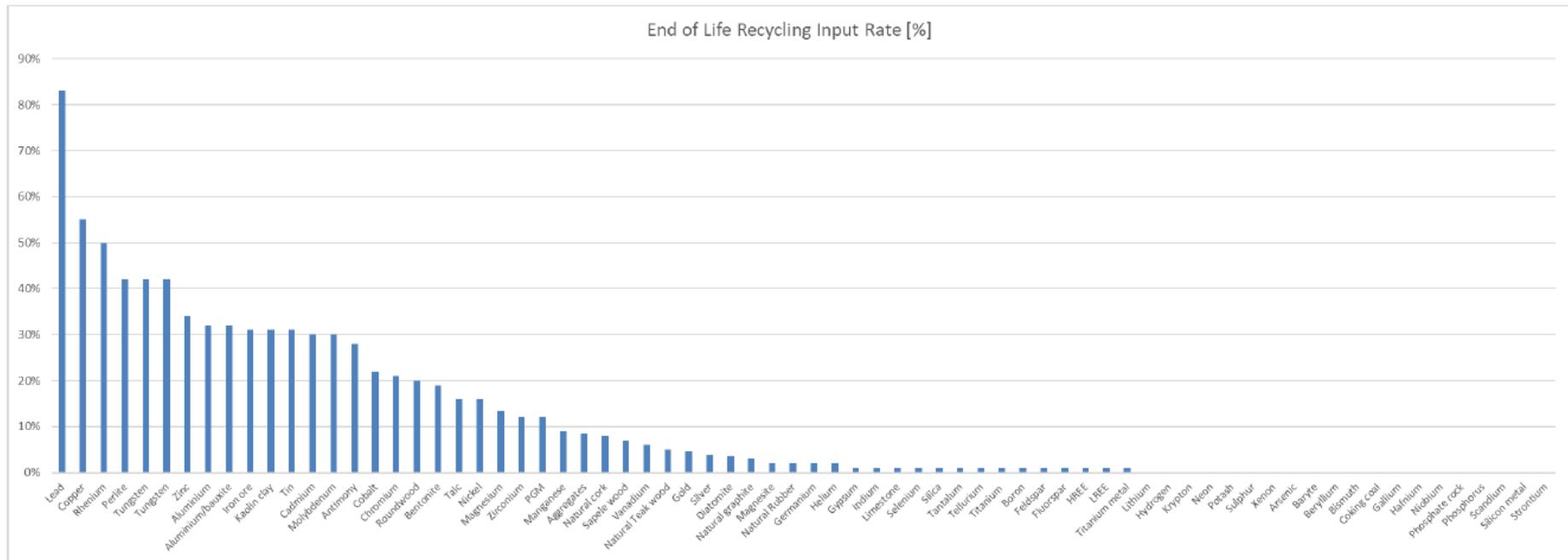
2016-2020

Figure C: EU producers of CRMs, in brackets shares of global supply, 2016-2020⁷



Materials and Sustainability

End of life recycling input rate (EOL-RIR)

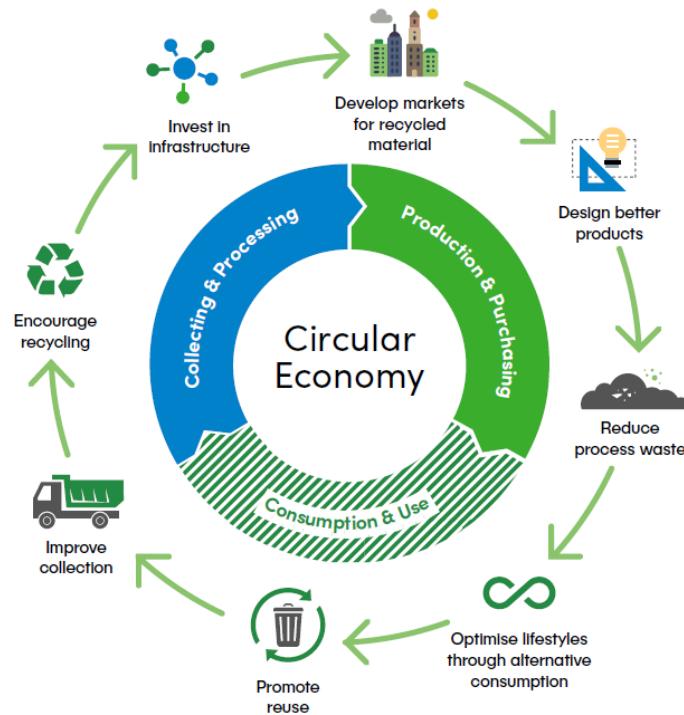


A reciclagem

Reciclagem (definição; fonte: infopédia):

“tratamento de resíduos ou materiais usados, de forma a poderem ser reutilizados ou transformados em novas matérias-primas e novos produtos”.

Economia circular



Materiais e sustentabilidade

Resíduos:
empecilho ou oportunidade??



Circular economy

Wastes – **burden** or opportunity??

Case studies: Critical raw materials in smartphones



Critical elements	Concentrations in phones, wt %		Typically mined ore grade, wt %
Platinum	0.07	↔ 280	0.00025
Gold	0.014	↔ 7.7	0.0018
Silver	0.13	↔ 2.4	0.055
Cobalt	1.9	↔ 3.8	0.5
Copper	7	↔ 2.7	2.6